

# Milieux Réactifs

Mini projet  
Plasma-assisted ignition of a hydrogen-air gas turbine

Kilian Pouderoux  
Allan Attia-Chemla

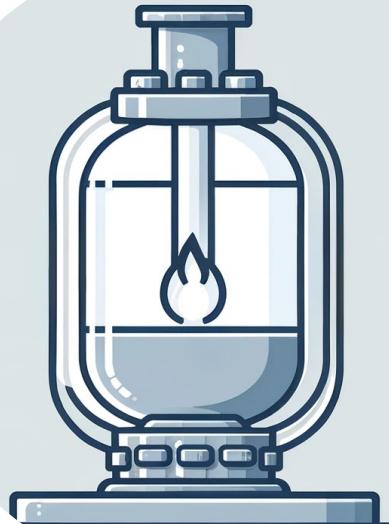
# Contexte et enjeux

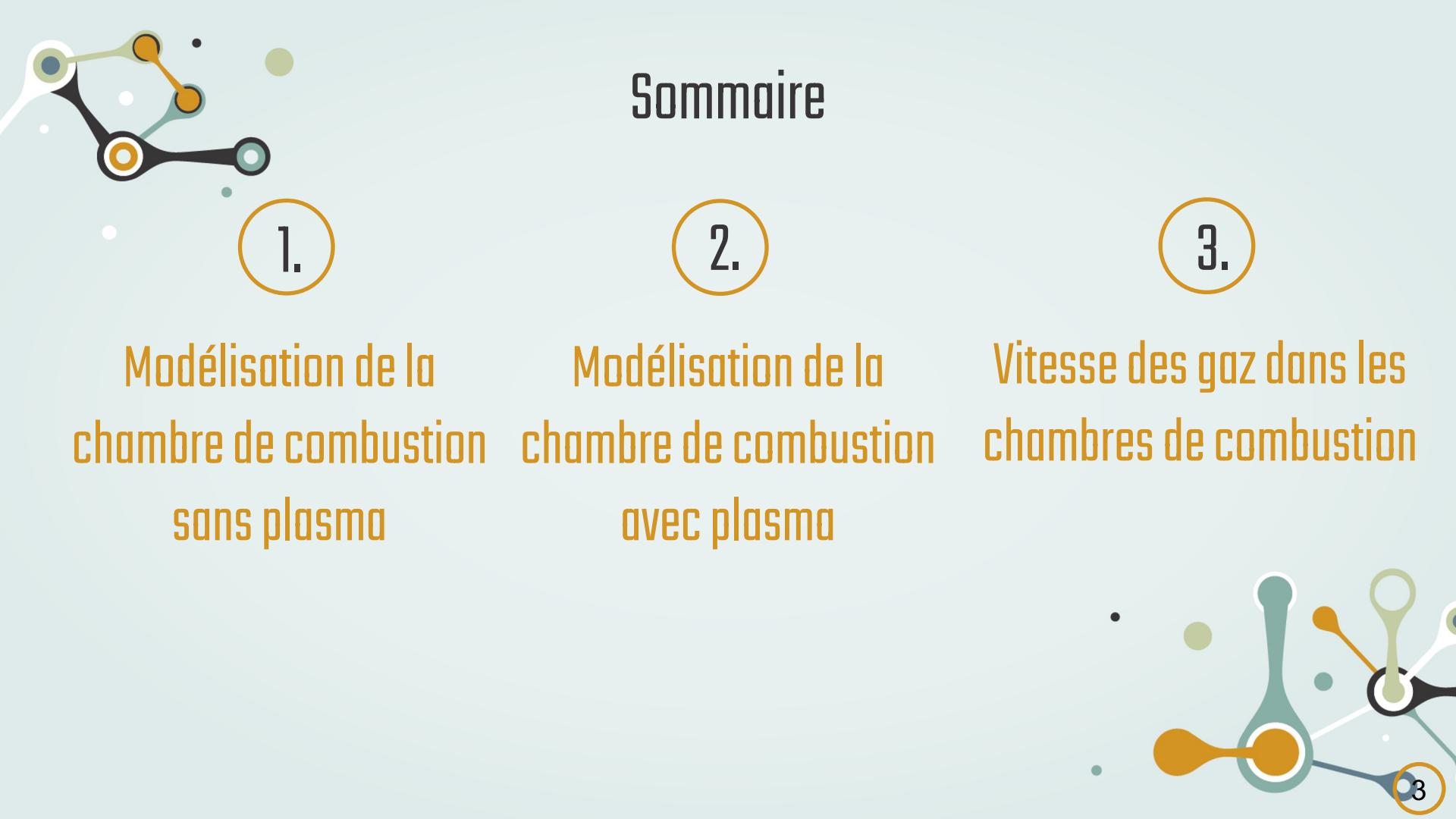
La production de NOx est un problème majeur dans l'industrie actuelle

→ Solution : utiliser des mélanges pauvres et limiter la température de la flamme

Difficultés à allumer les mélanges

Ralentissement des réactions chimiques





# Sommaire

1.

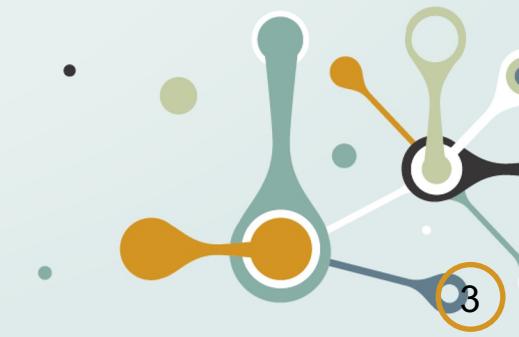
Modélisation de la  
chambre de combustion  
sans plasma

2.

Modélisation de la  
chambre de combustion  
avec plasma

3.

Vitesse des gaz dans les  
chambres de combustion





# Modélisation de la chambre de combustion sans plasma



# Modèle : Perfectly Stirred Reactor (PSR)

Hypothèses :

- Pression constante
- Fresh Gases mélangés instantanément et brûlés homogènement
- Néglige les pertes de chaleur

Le réacteur est caractérisé par :

- Température d'entrée  $T^{FG}$
- Composition  $Y_k^{FG}$
- Temps de résidence  $\tau$

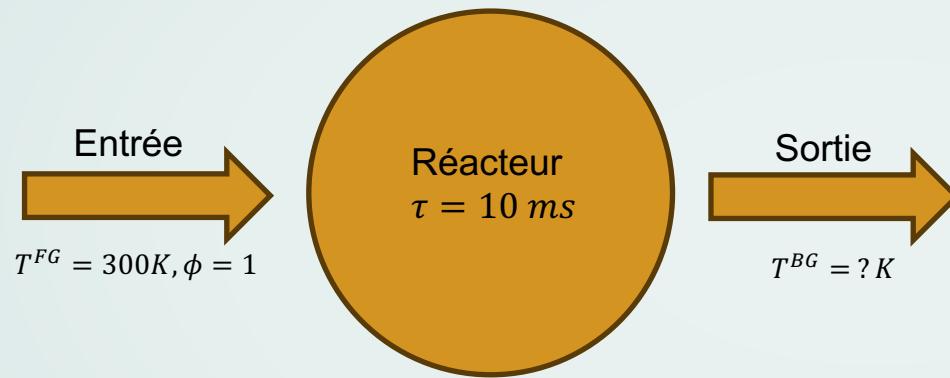
Evolution temporelle de la température et des fractions massiques :

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho C_p} \sum_{k=1}^K h_k \dot{\omega}_k^c M_k + \frac{1}{\tau C_p} \left( \sum_{k=1}^K Y_k^{FG} h_k^{FG} - \sum_{k=1}^K Y_k^{FG} h_k \right) \quad (1)$$

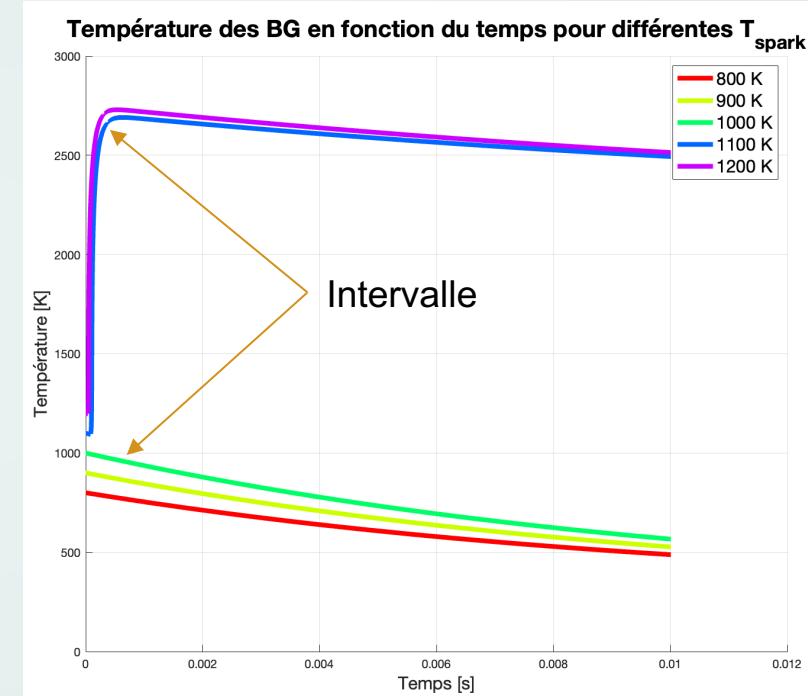
$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{1}{\tau} (Y_k^{FG} - Y_k) + \frac{M_k \dot{\omega}_k^c}{\rho} \quad (2)$$



# Détermination de $T^{\text{spark}}$



On cherche  $T^{\text{spark}}$  telle que le mélange s'enflamme dans des conditions stœchiométriques



$T^{\text{spark}}$  se trouve dans l'intervalle  $[1000 \text{ K}, 1100 \text{ K}]$



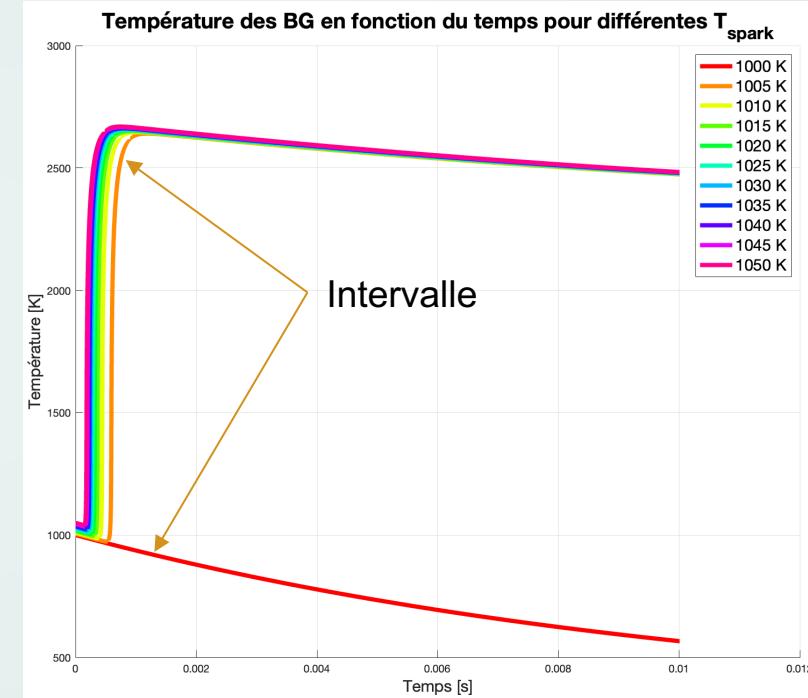
# Détermination de $T^{\text{spark}}$

$T^{\text{spark}}$  se trouve dans l'intervalle  $[1000K, 1100K]$

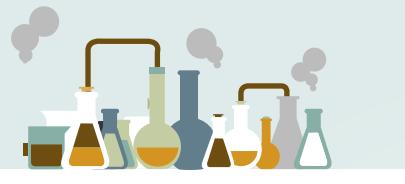
$[1000, 1001, 1002, 1003, 1004, 1005]$

De manière itérative, on trouve

$T^{\text{spark}} = 1002 \text{ K}$

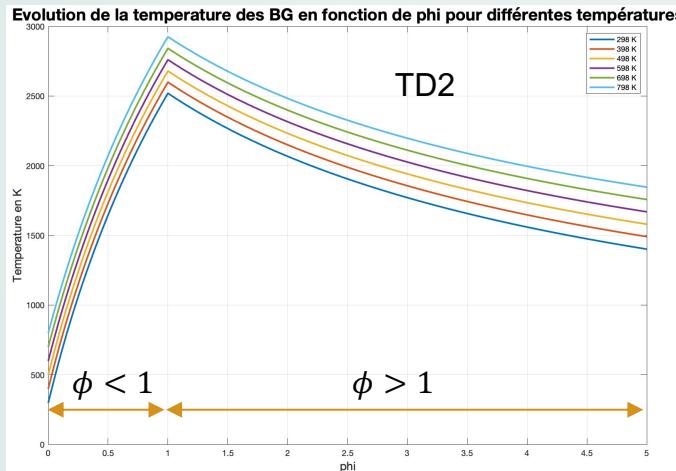


Déterminons maintenant la valeur de  $\phi$  optimale pour notre application

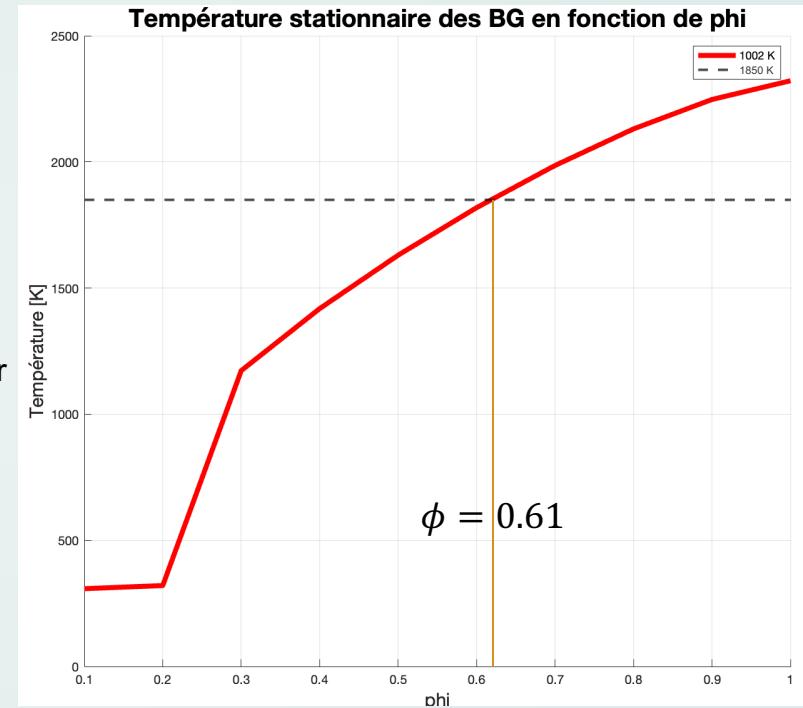


# Détermination de $\phi$

On cherche  $\phi$  telle que  $T^{BG}$  reste inférieure à 1850 K pour éviter la production de NOx



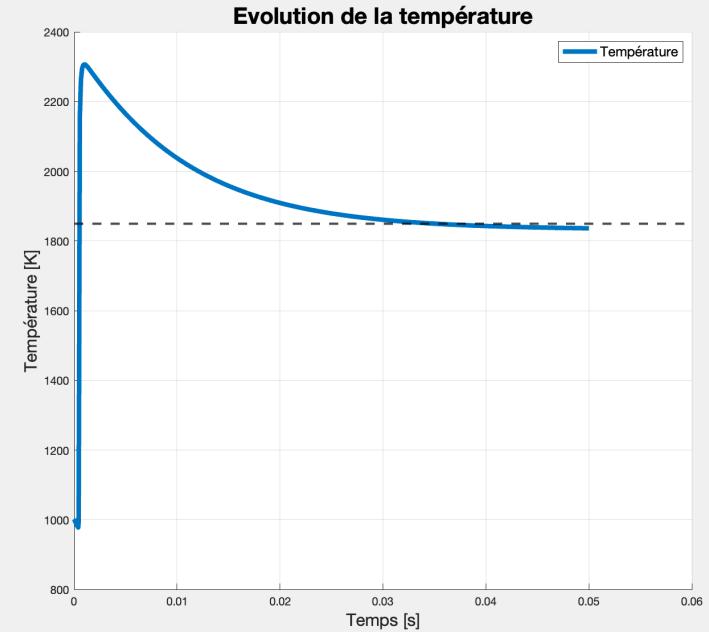
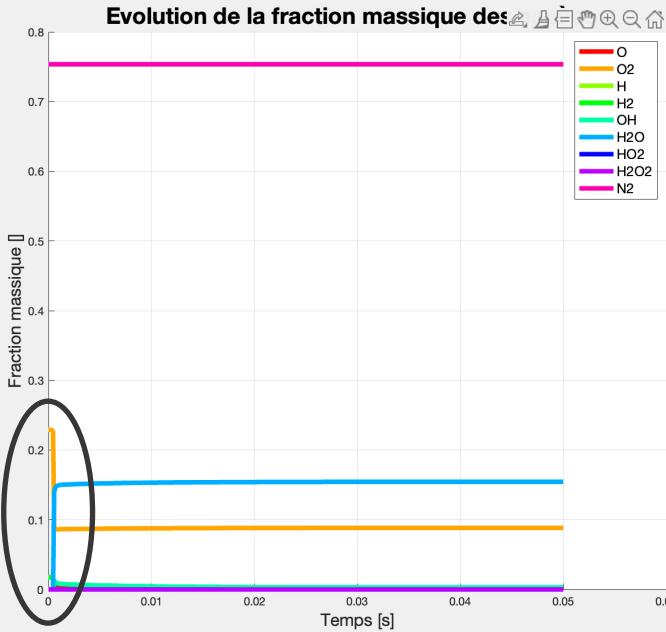
On choisit  $\phi < 1$  pour diminuer  $T^{BG}$  et économiser  $H_2$



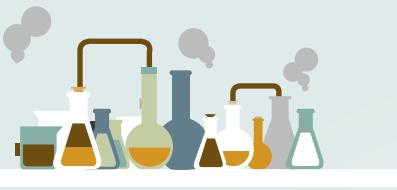
On trouve  $\phi = 0.61$



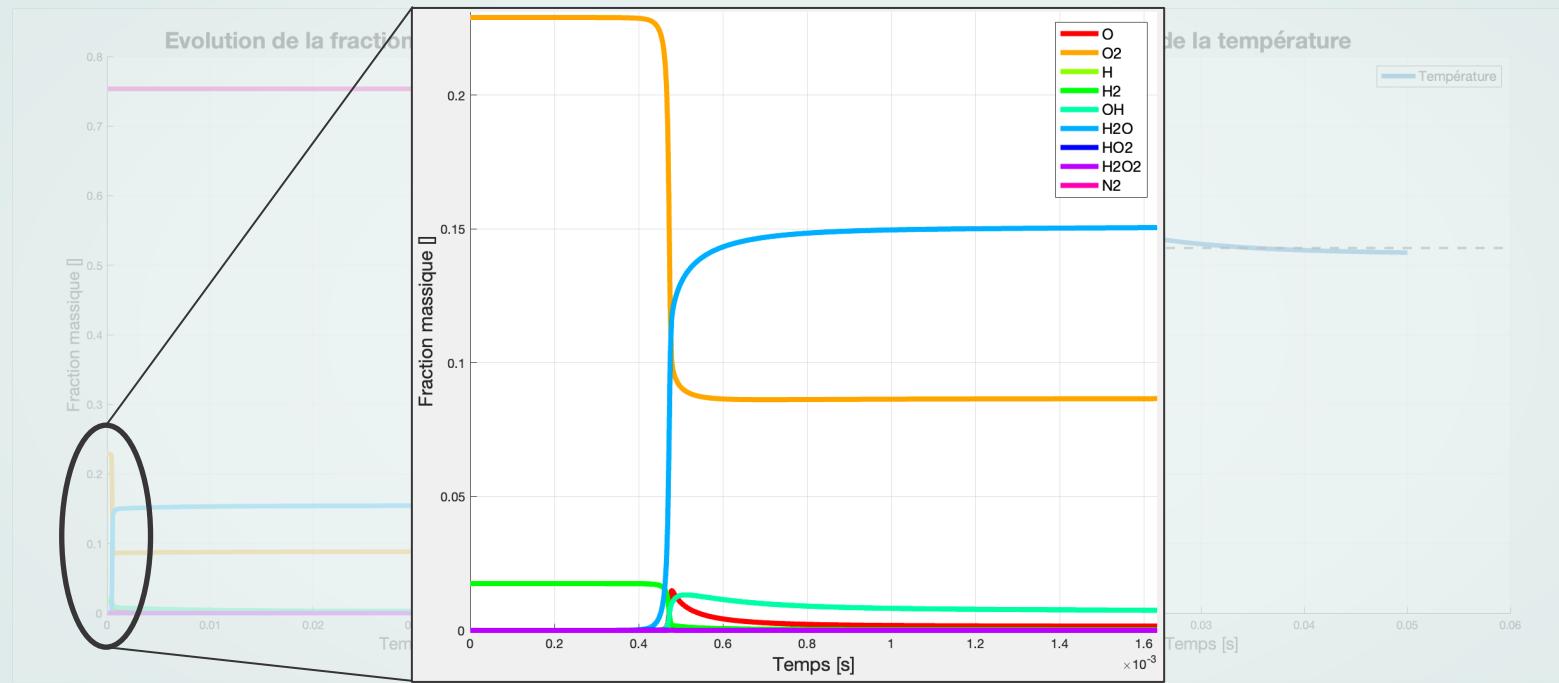
# Vérification



On vérifie que la combustion a bien lieu et que  $T^{BG} < 1850 \text{ K}$  à l'état stationnaire



# Vérification



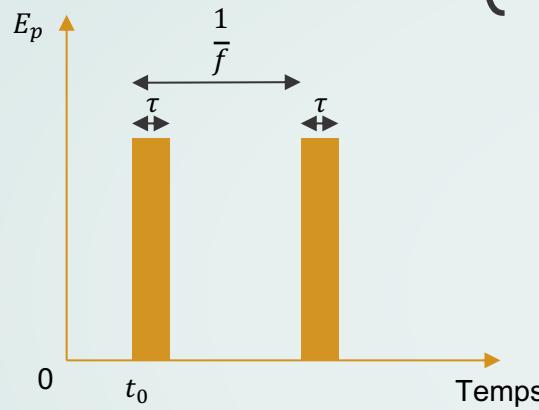
On vérifie que la combustion a bien lieu et que  $T^{BG} < 1850 \text{ K}$  à l'état stationnaire

# Modélisation de la chambre de combustion avec plasma





# Utilisation d'impulsions répétitives à la nanoseconde (Nanosecond Repetitively Pulsed NRP)



$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho C_p} \sum_{k=1}^K h_k (\dot{\omega}_k^c + \dot{\omega}_k^p) M_k + \frac{1}{\tau C_p} \left( \sum_{k=1}^K Y_k^{FG} h_k^{FG} - \sum_{k=1}^K Y_k^{FG} h_k \right) + \boxed{\frac{\dot{E}^p}{\rho C_p}}$$

$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{1}{\tau} (Y_k^{FG} - Y_k) + \frac{M_k \dot{\omega}_k^c}{\rho} + \boxed{\frac{M_k \dot{\omega}_k^p}{\rho}}$$

$$\dot{E}^p = \frac{E_d}{V_d * \tau_d} \quad \dot{\omega}_O^p = \eta \frac{Y_{O_2}}{Y_{O_2}^f} \frac{\dot{E}^p}{(h_O - h_{O_2}) M_O}$$

$$\dot{\omega}_{O2}^p = -\frac{M_O}{M_{O2}} \dot{\omega}_O^p$$

$$\dot{\omega}_k^p = 0 \text{ if } k \neq O_2, O$$

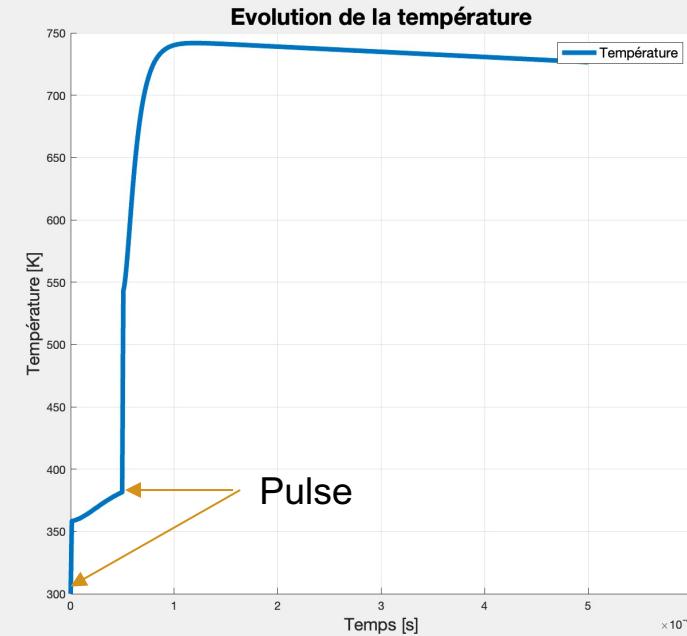
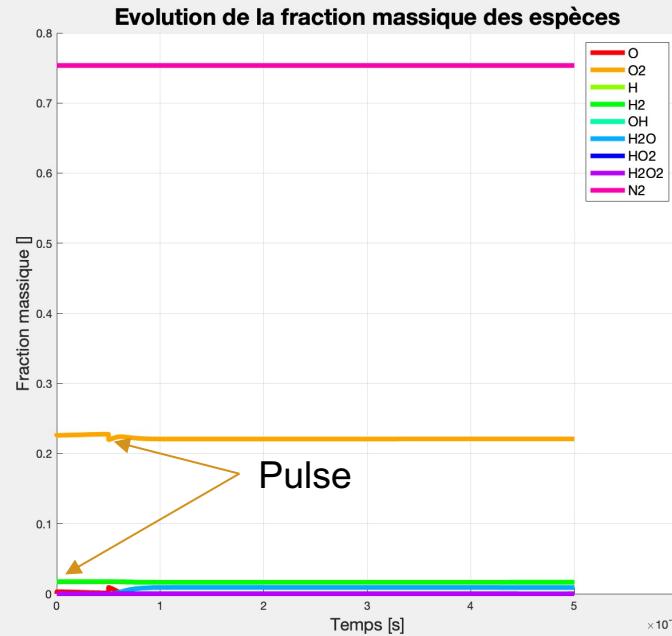
Il y a un pulse de plasma si :

$$t \in \left[ t_0 + \frac{n}{f}, t_0 + \frac{n}{f} + \tau \right], n \in [0, 1, \dots, N_{pulse}]$$

Combien de pulse pour allumer le mélange ?



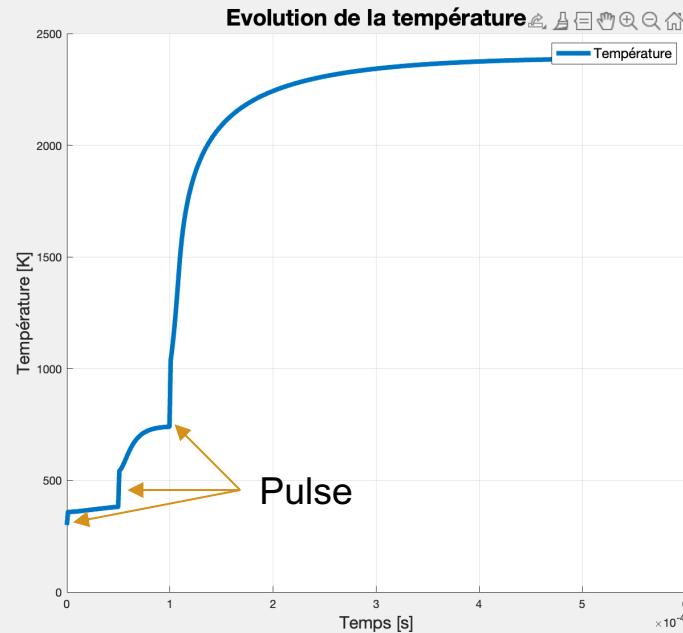
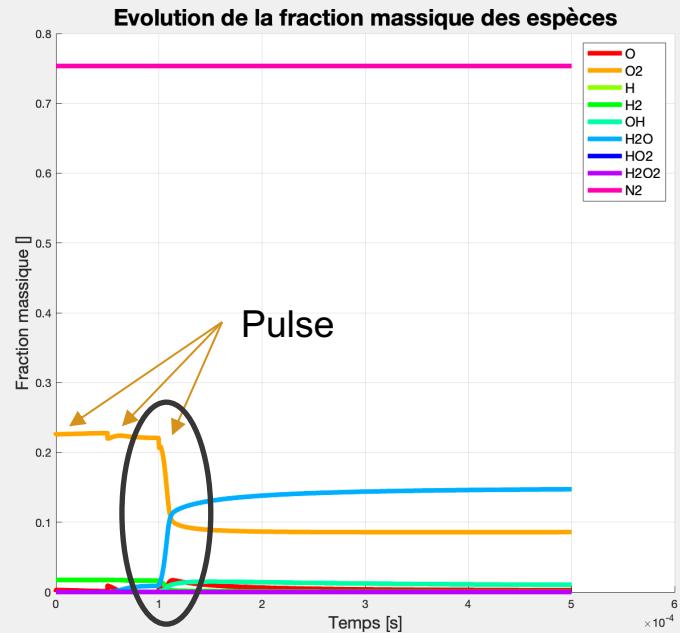
# Un premier essai avec deux pulsations



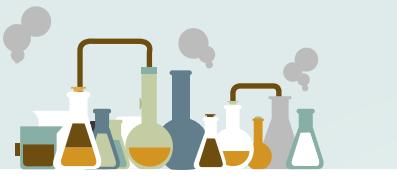
Pas d'inflammation... Il faut  $N_{pulse} > 2$



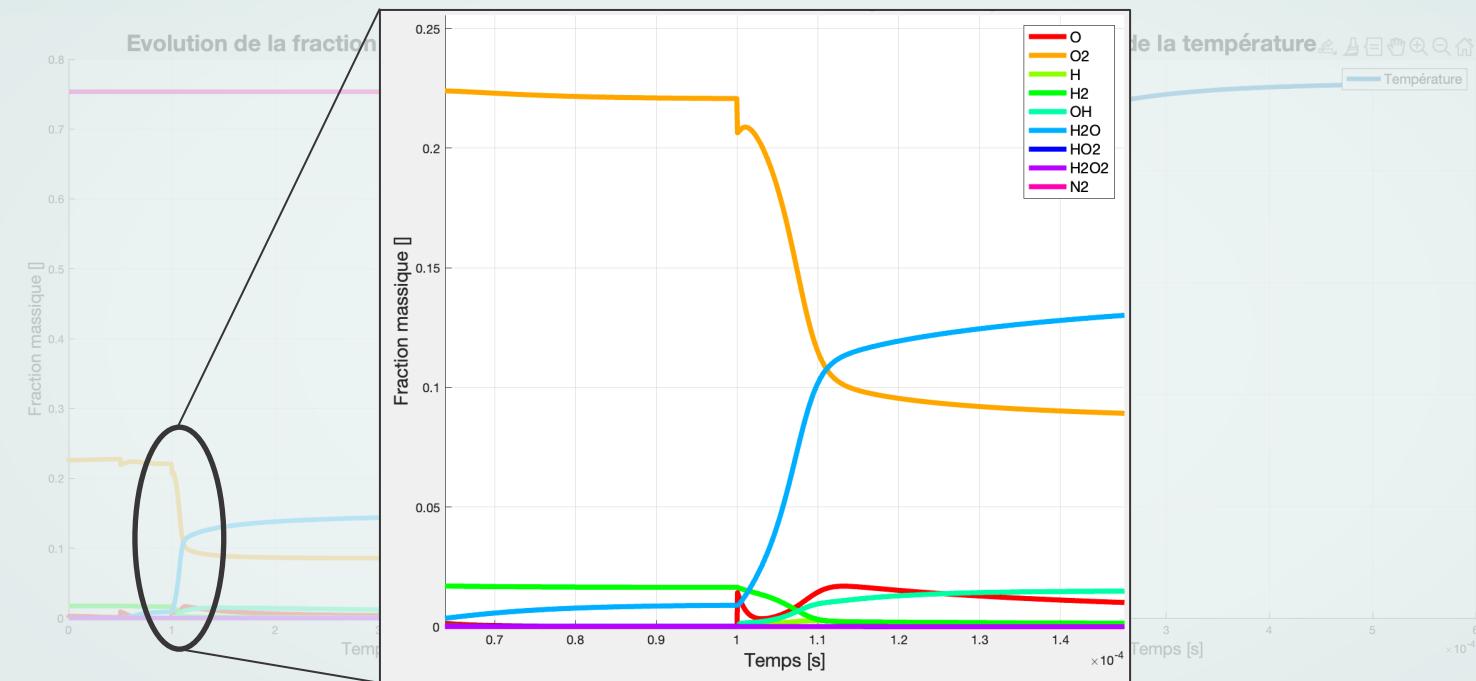
# Combustion assistée par plasma réussie



Inflammation ! On prend donc  $N_{pulse} = 3$

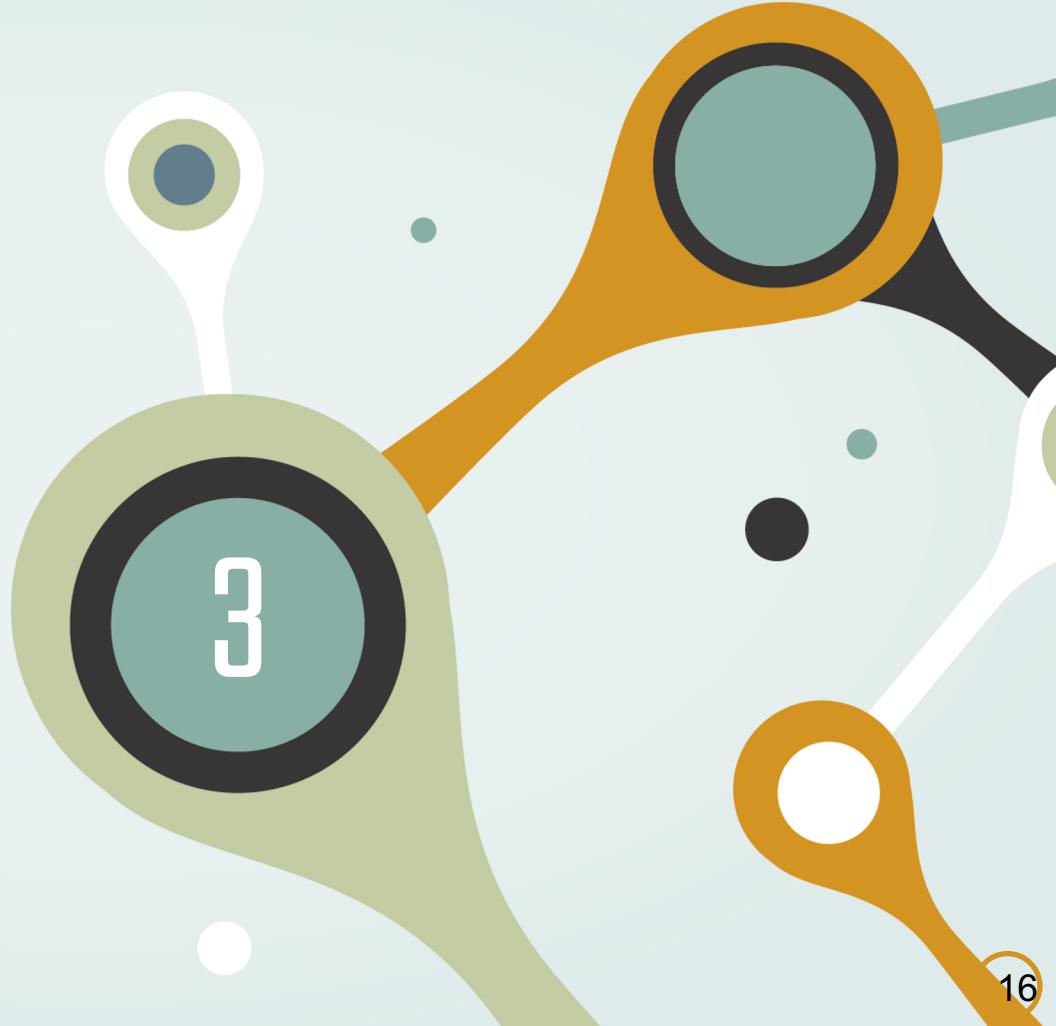


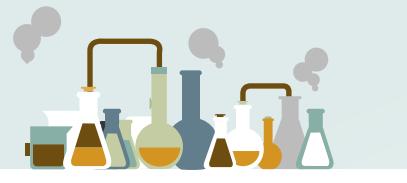
# Vérification



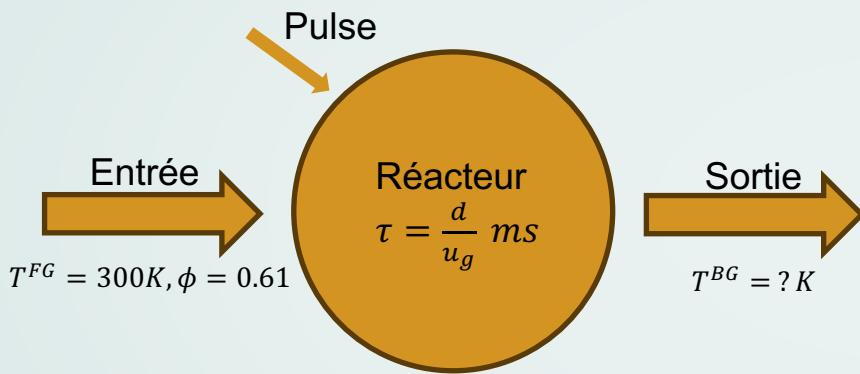
Inflammation ! On prend donc  $N_{pulse} = 3$

# Vitesse des gaz

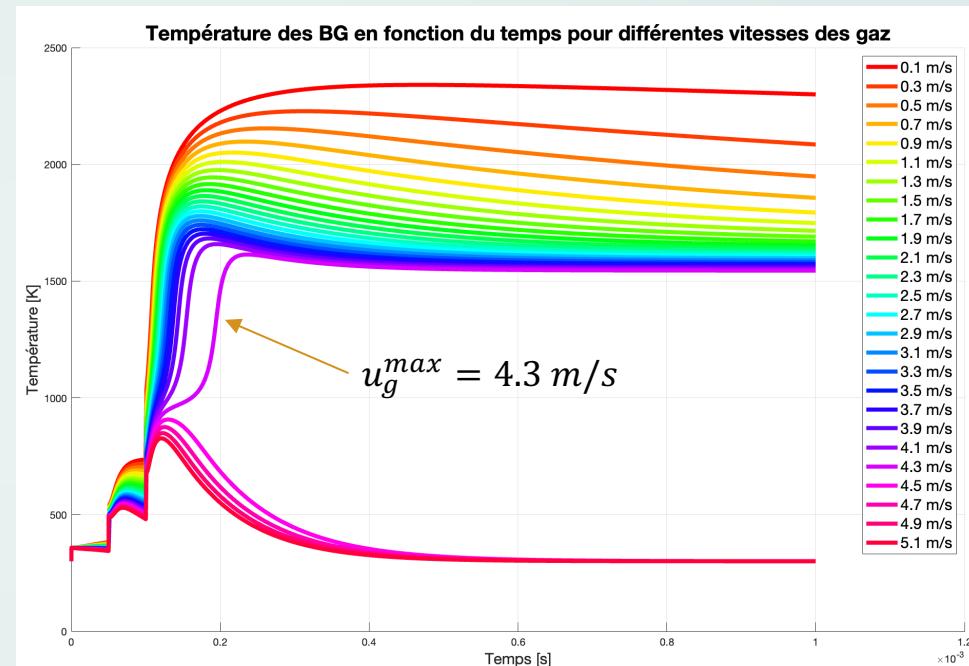




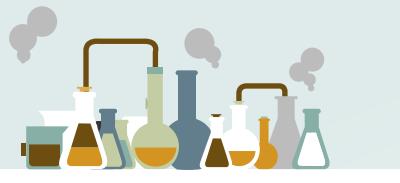
# Vitesse maximale des gaz avec plasma



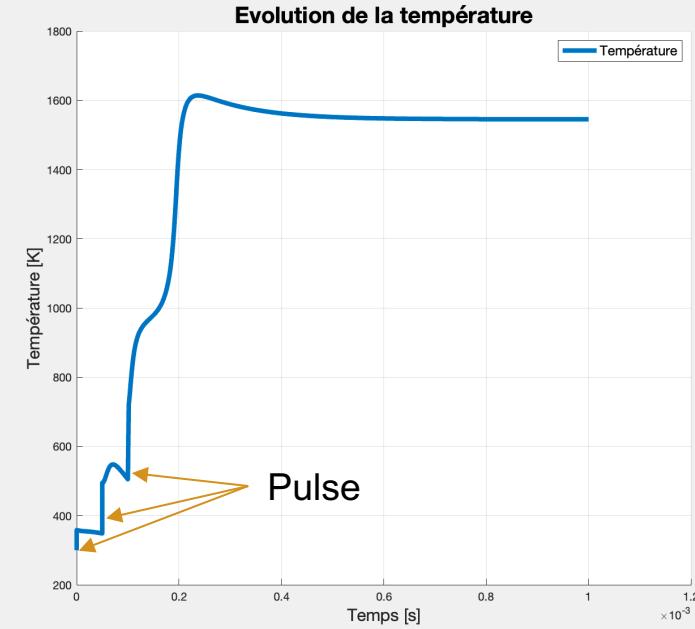
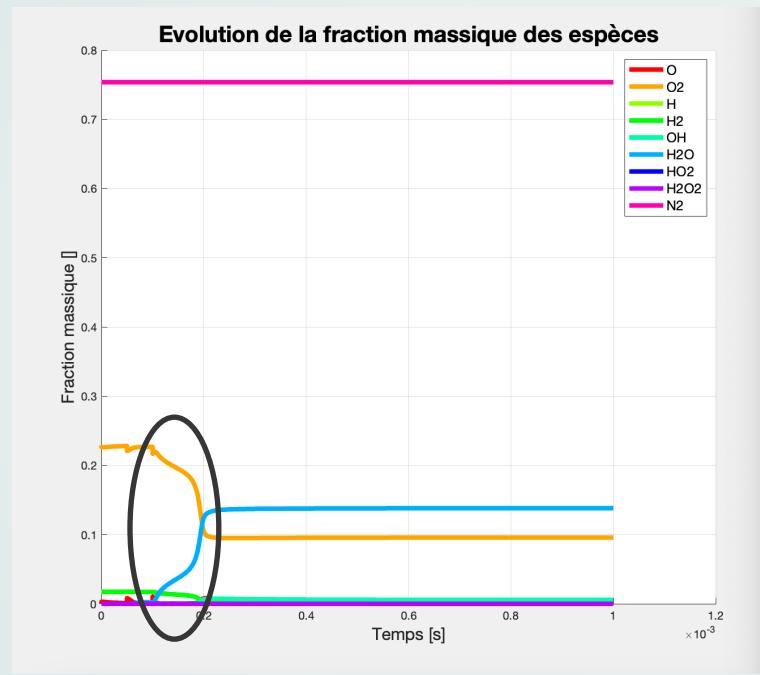
On fait varier la vitesse des gaz pour voir l'impact sur l'inflammation des gaz



On trouve  $u_g^{\max} = 4.3 \text{ m/s}$



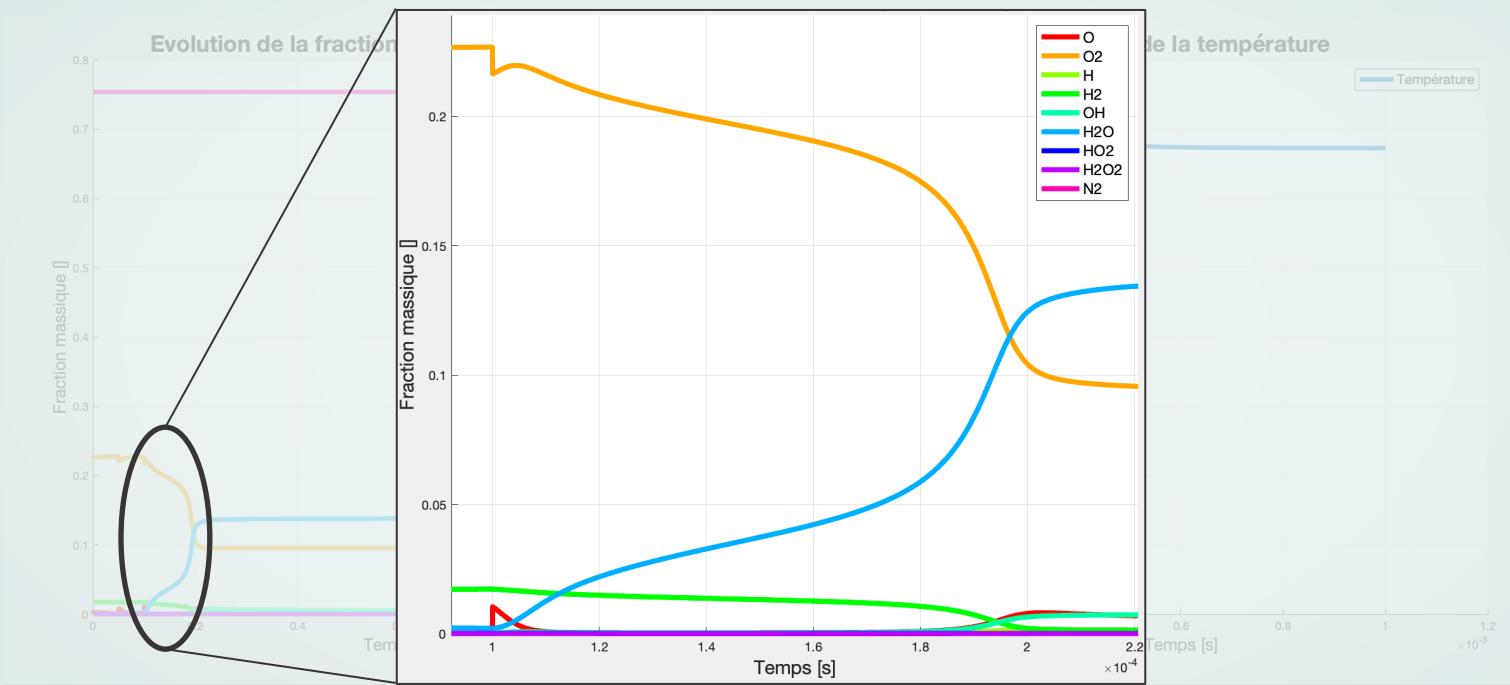
# Combustion assistée par plasma réussie



Vérification des courbes pour  $N_{pulse} = 3$  et  $u_g^{max} = 4.3 \text{ m/s}$



# Vérification



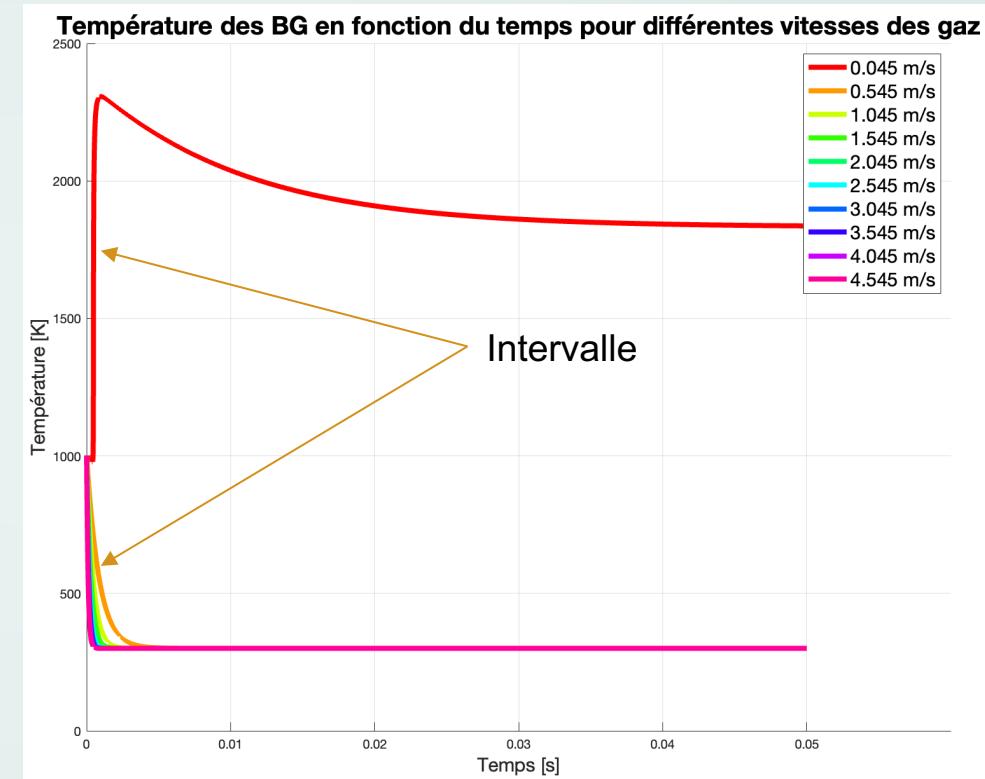
Vérification des courbes pour  $N_{pulse} = 3$  et  $u_g^{max} = 4.3 \text{ m/s}$



# Vitesse maximale des gaz sans plasma

A première vue, l'absence de dissociation du dioxygène diminue fortement la vitesse maximale admissible des gaz.

On vérifie que pour  
 $u_g = 0.045 \text{ m/s} \Leftrightarrow \tau = 10 \text{ ms}$   
On a bien l'inflammation du mélange



$u_g^{max}$  se trouve dans l'intervalle  $[0.045\text{m/s}, 0.545\text{m/s}]$



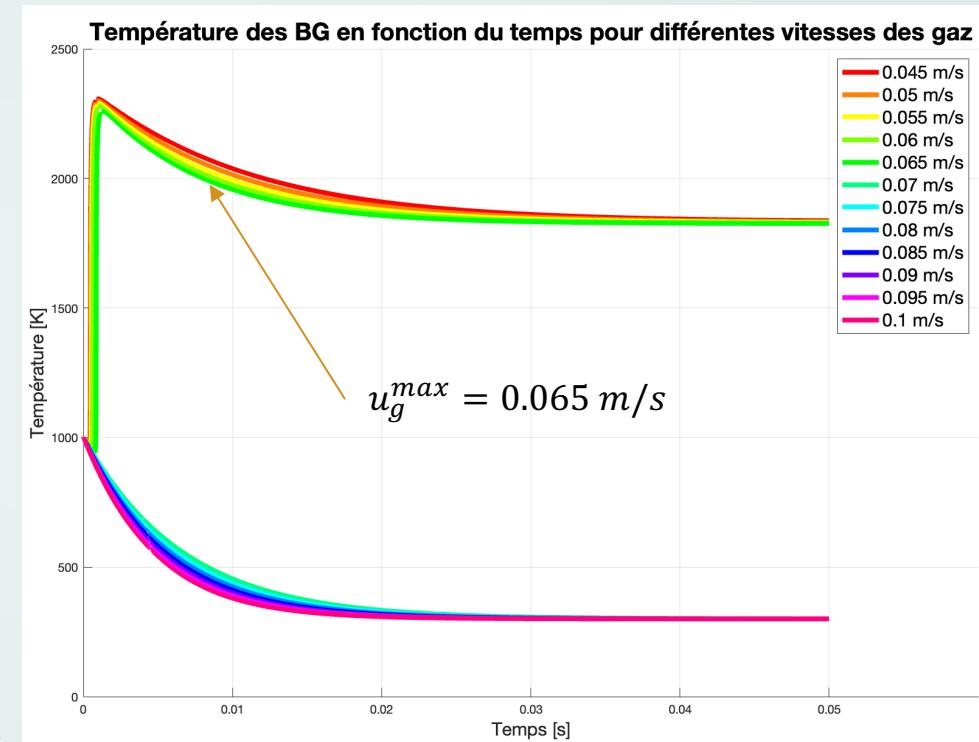
# Vitesse maximale des gaz sans plasma

$u_g^{max}$  se trouve dans l'intervalle  $[0.045\text{m/s}, 0.545\text{m/s}]$

De manière itérative, on trouve

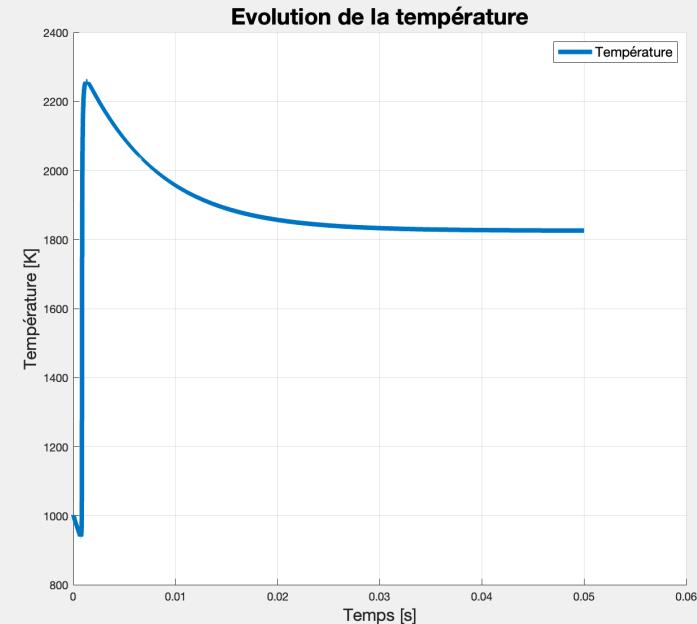
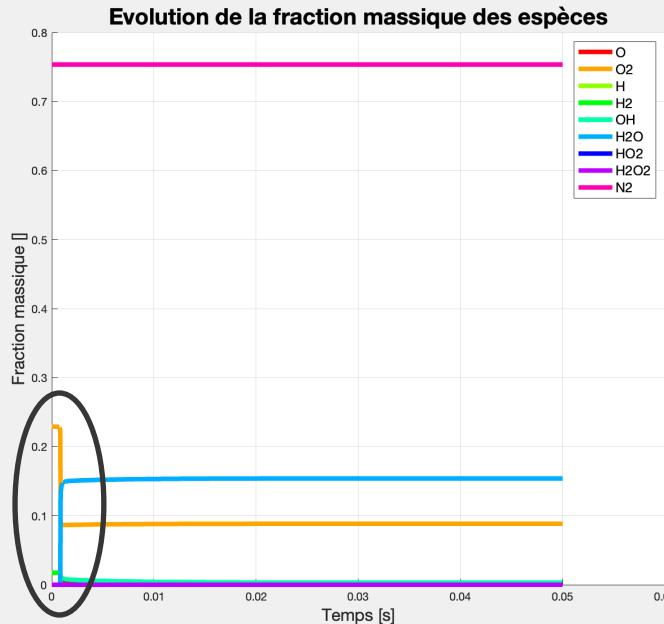
$$u_g^{max} = \mathbf{0.065 \text{ m/s}}$$

Dans une chambre de combustion non assistée par plasma, les gaz vont environ **66 fois moins vite** que dans celle assistée par plasma





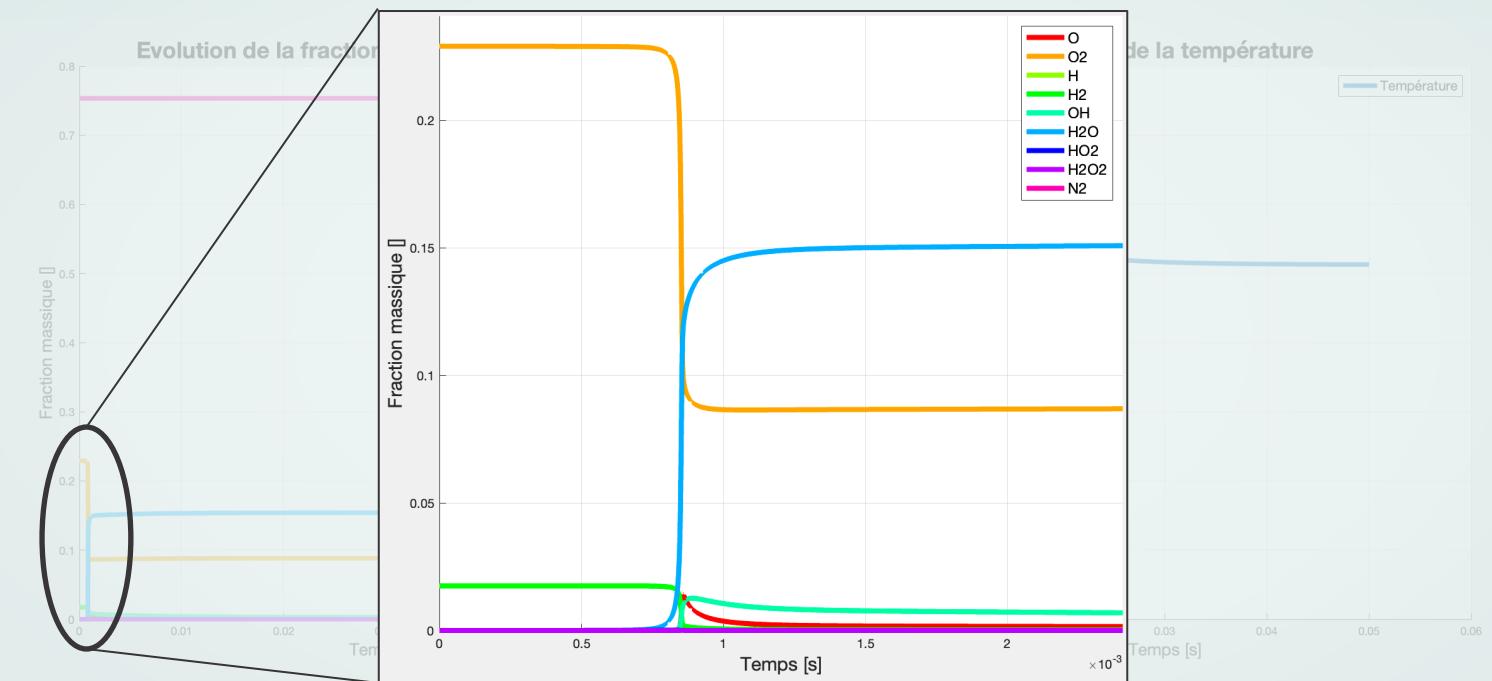
# Vérification



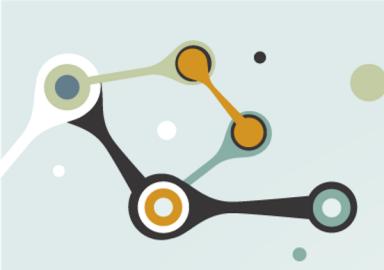
Vérification des courbes pour  $u_g^{max} = 0.065 \text{ m/s}$



# Vérification



Vérification des courbes pour  $u_g^{max} = 0.065 \text{ m/s}$



# CONCLUSION

## Combustion sans plasma

- ✗ Chauffage complet des gaz à  $T^{Spark}$
- ✗ Vitesse des gaz faible
- ✓ Mise en place simple

## Combustion avec plasma

- ✓ Inflammation d'une petite partie des gaz
- ✓ Vitesse des gaz élevée
- ✗ Mise en place et contrôle complexe

Malgré une mise en place complexe, les NRP sont prometteuses et permettent d'augmenter les performances des turbines



# MERCI