

STABILISATION, ALLUMAGE, INTERACTION FLAMME/PAROIR

Comment on allume une flamme

Comment elle se propage

Comment on la stabilise (ce qui est un autre problème)

Ce qui se passe quand une flamme touche une paroi

De la culture combustion utile pour le futur...
Mais rien de cela le jour du contrôle !

T. Poinsot
Poinsot@imft.fr

ALLUMAGE: comment ?

Deux catégories:

- **Allumage commandé par bougie** (ou un laser ou un jet de gaz chaud): les gaz sont trop froids pour que la combustion puisse démarrer

- Moteurs à piston (essence)
- Moteurs à détonation pulsés
- Turbines à gaz ou hélicoptère

- **Autoallumage**: un des deux gaz injectés est assez chaud pour causer un autoallumage

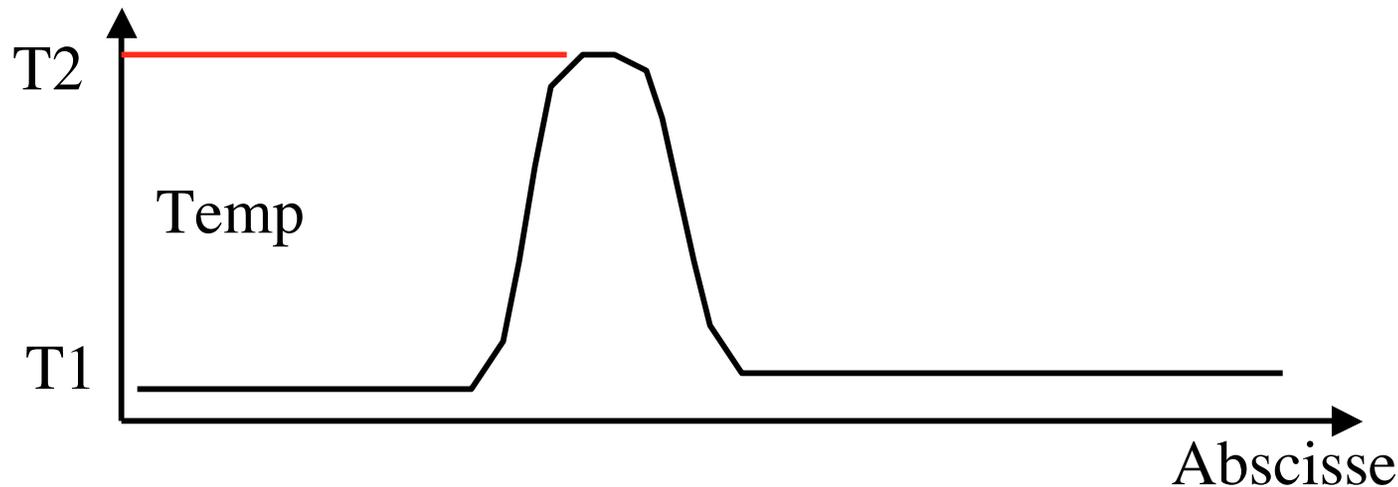
- Moteurs à piston (Diesel)
- Turbines étagées
- Combustion supersonique

Différence entre allumage et propagation / stabilisation

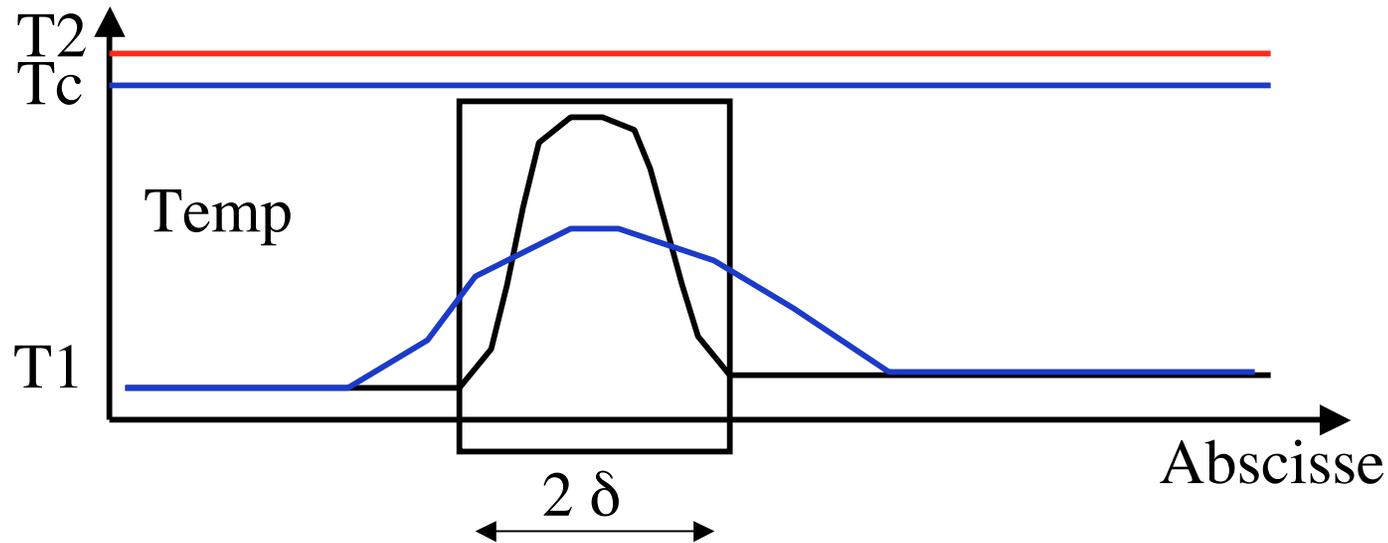
- Allumage: naissance du premier noyau de flamme
- Propagation: si ce noyau est assez 'fort', il va grandir et aller allumer d'autres parties de la chambre
- Stabilisation: c'est l'état de la chambre une fois que tout y est allumé.
- Stabilité: c'est le fait que, une fois allumée, la chambre n'exhibe pas d'instabilités de combustion

Allumage: l'énergie minimum

- On prend un gaz prémélangé
- Combien faut il déposer d'énergie pour qu'une flamme prémélangée s'y allume ?
- Ordre de grandeur:

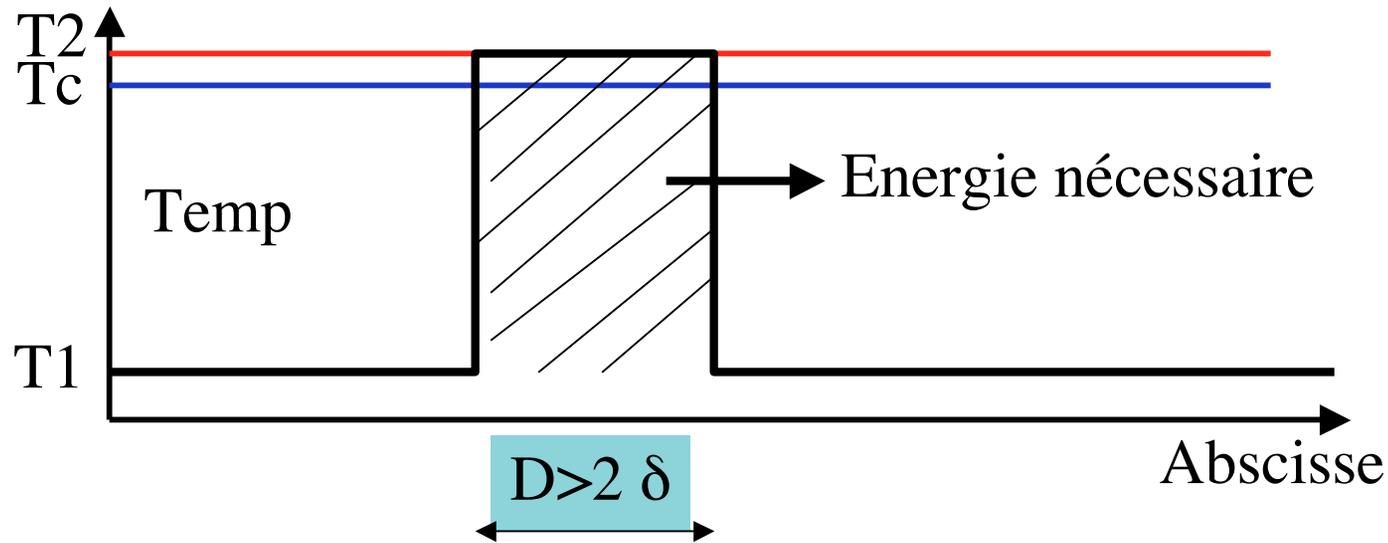


Allumage: l'énergie minimum (2)



- Il faut au moins que la température atteigne $T_c = T_2 * (1 - 1/\beta) = T_2$
 - Il faut au moins que la largeur D dépasse deux fois l'épaisseur de flamme δ . Sinon la diffusion va dissiper le pic de température
- => On doit déposer une sphère ou la température atteint $T_c = T_2$ et qui ait un rayon δ

Allumage: l'énergie minimum (3)



$$E = \frac{4}{3} \pi \delta^3 \rho C_p (T_2 - T_1)$$

Application numérique à 1 bar et 300 K pour CH₄/air:

$\delta = 0.5 \text{ mm}$

$C_p = 1200 \text{ J/kgK}$

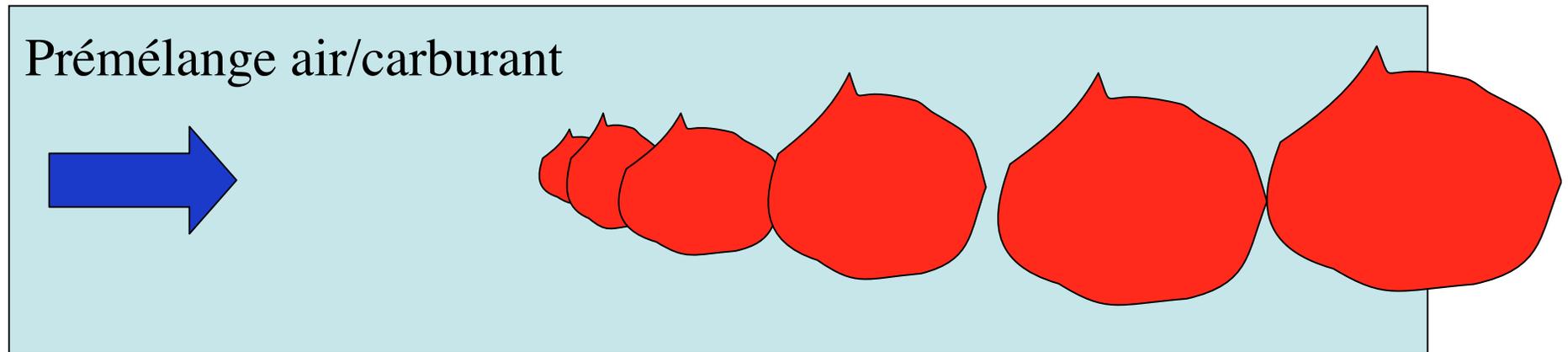
$T_2 - T_1 = 2000 \text{ K}$

$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$

$E = 1 \text{ mJ}$

Dans les bougies réelles, on dépose 50 fois plus

Allumage et stabilisation

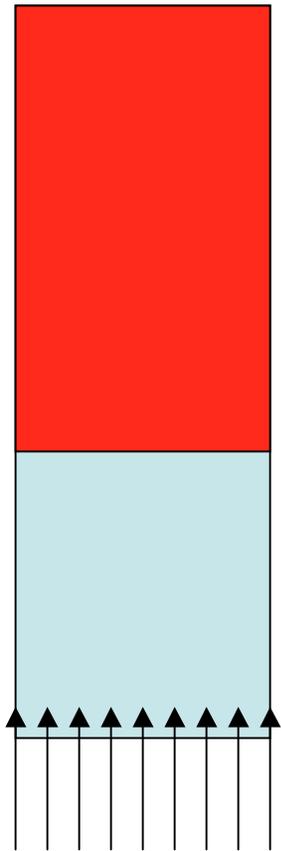


$U = 10 \text{ m/s}$

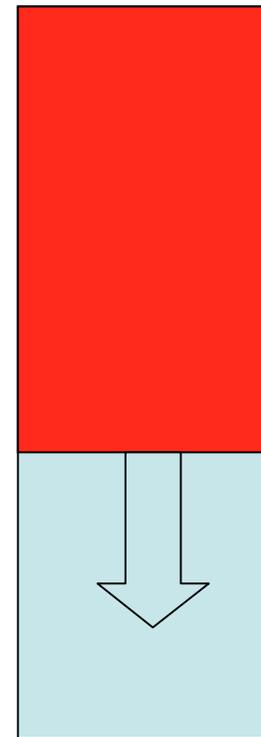
Ici, on a allumé mais on n'a pas été capable de stabiliser car l'écoulement va plus vite que la flamme !

- Les chambres de combustion doivent comporter des systèmes de stabilisation de flamme (des 'accroche flamme' ou flameholders)
- La stabilisation dépend du régime: on ne stabilise pas une flamme de diffusion et une flamme de prémélange de la même façon. La stabilisation dépend aussi de la puissance !

Stabilisation 'comme dans le cours sur le prémélangé laminaire'



$U = Sl$ (exactement)



Ou alors

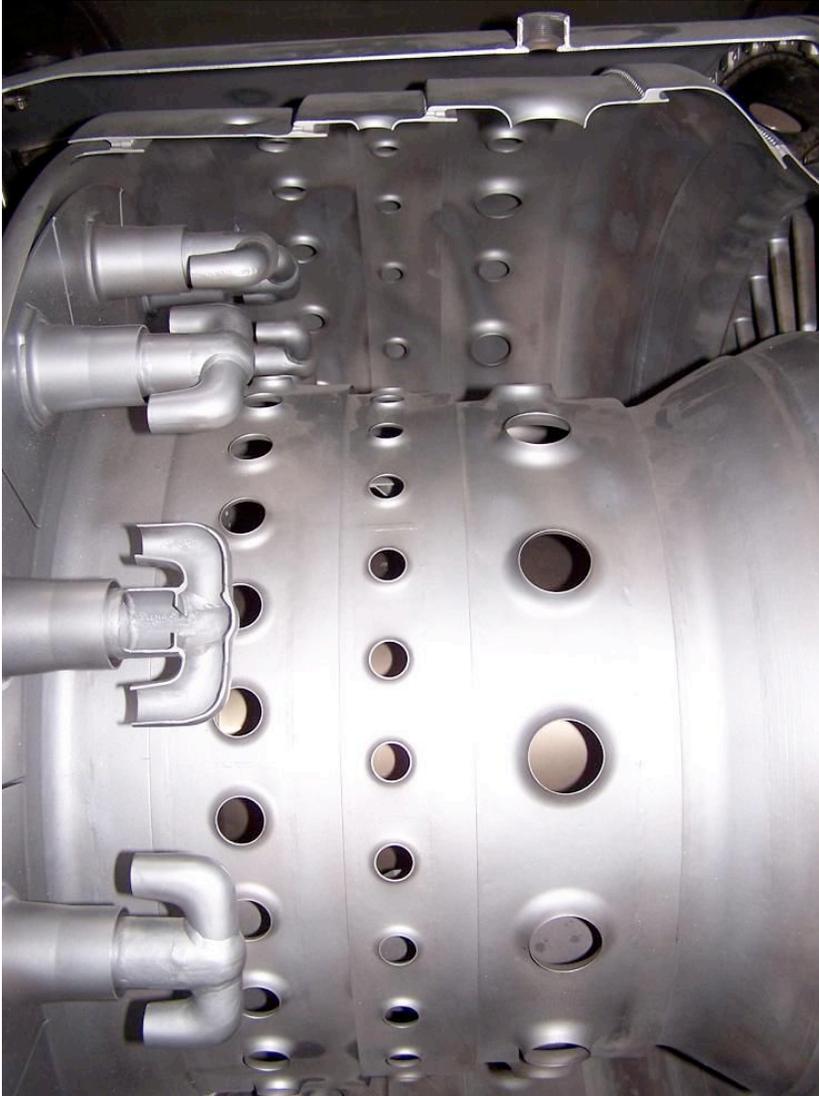
On allume (rallume) à chaque fois que c'est nécessaire:

- moteurs à combustion essence avec bougie
- moteurs à détonation propagative (PDWE)

MOTEUR A PISTON ESSENCE



Turbine à gaz: ré allumage indispensable !



On ajoute une bougie

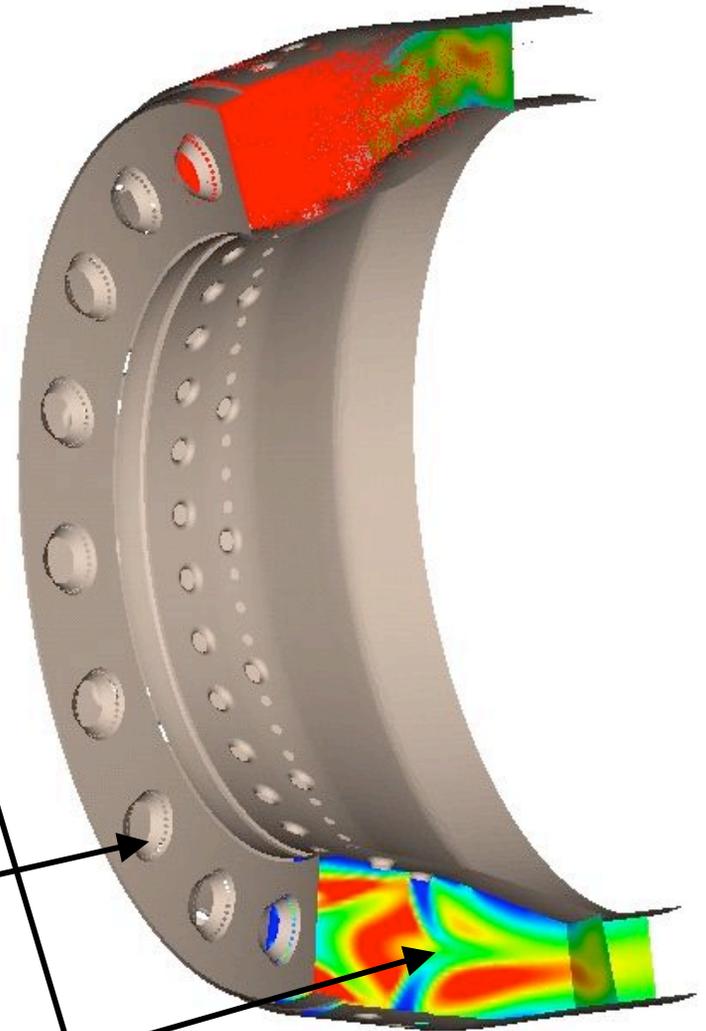
OU

Un second injecteur qui produit
des gaz chauds

OU

Un laser

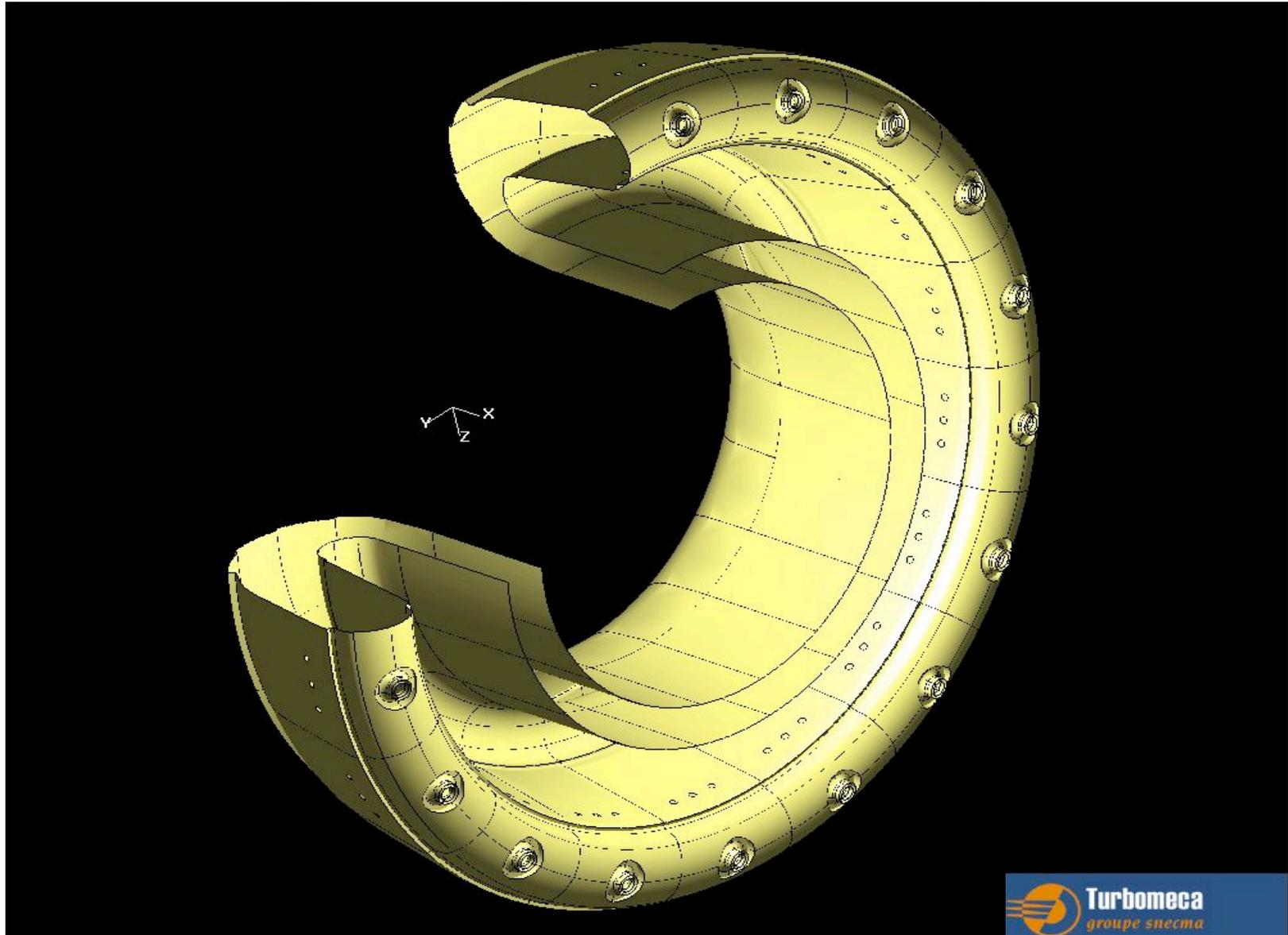
Placer les allumeurs est difficile: ils ne doivent pas fondre et il n y a pas beaucoup de place !

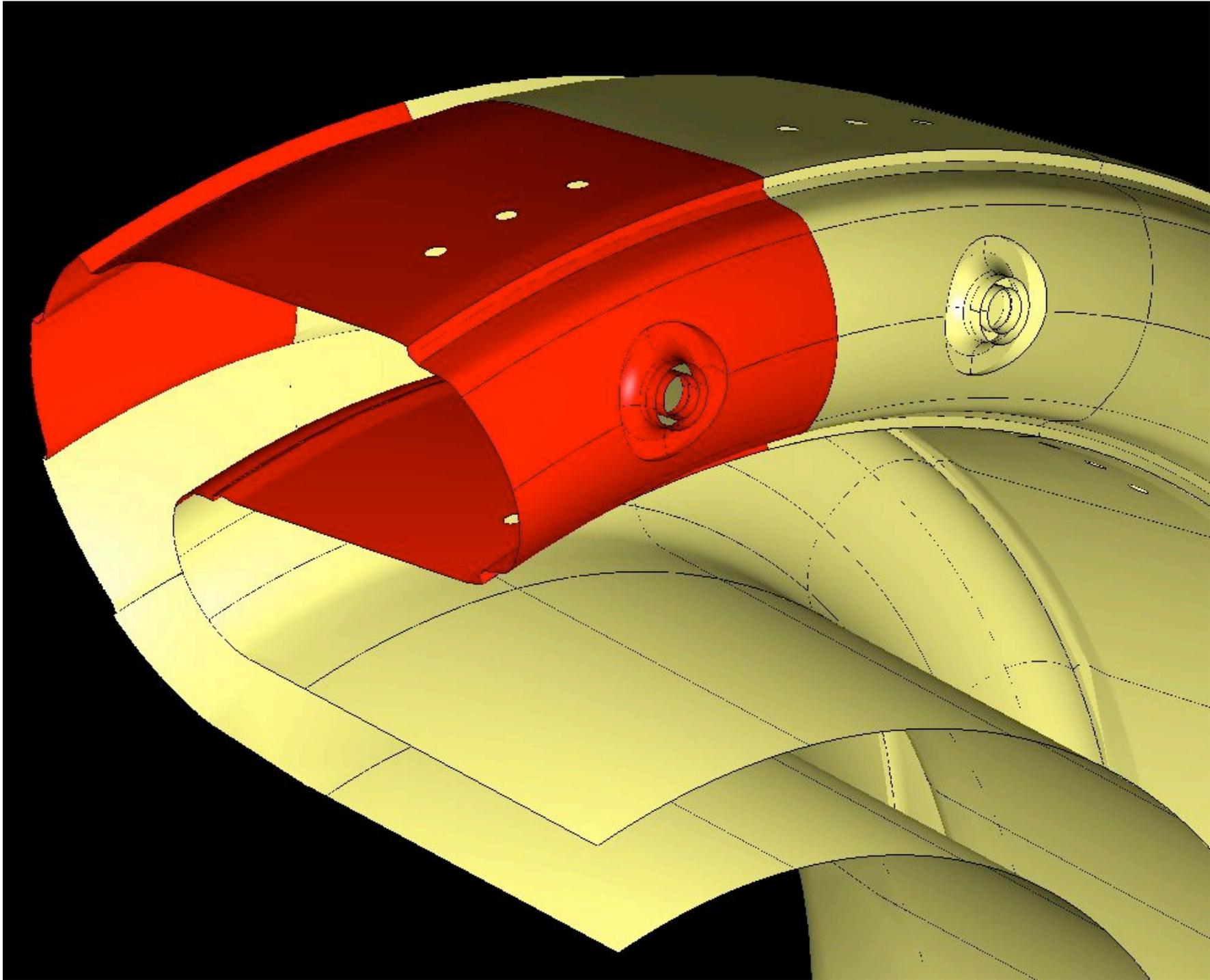


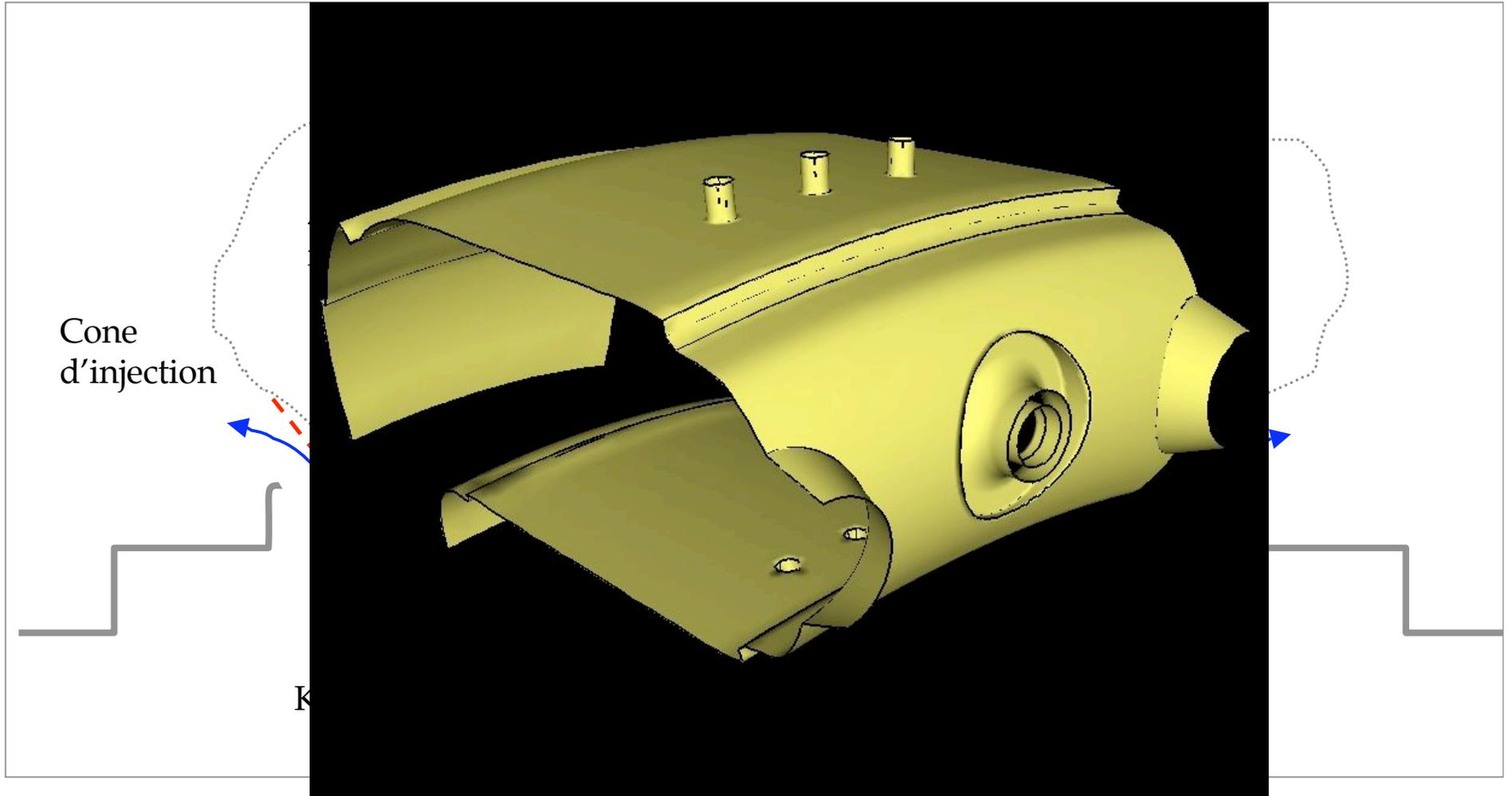
BRULEUR

CHAMBRE DE COMBUSTION

Turbine à gaz hélicoptère: on allume un injecteur principal avec des jets chauds





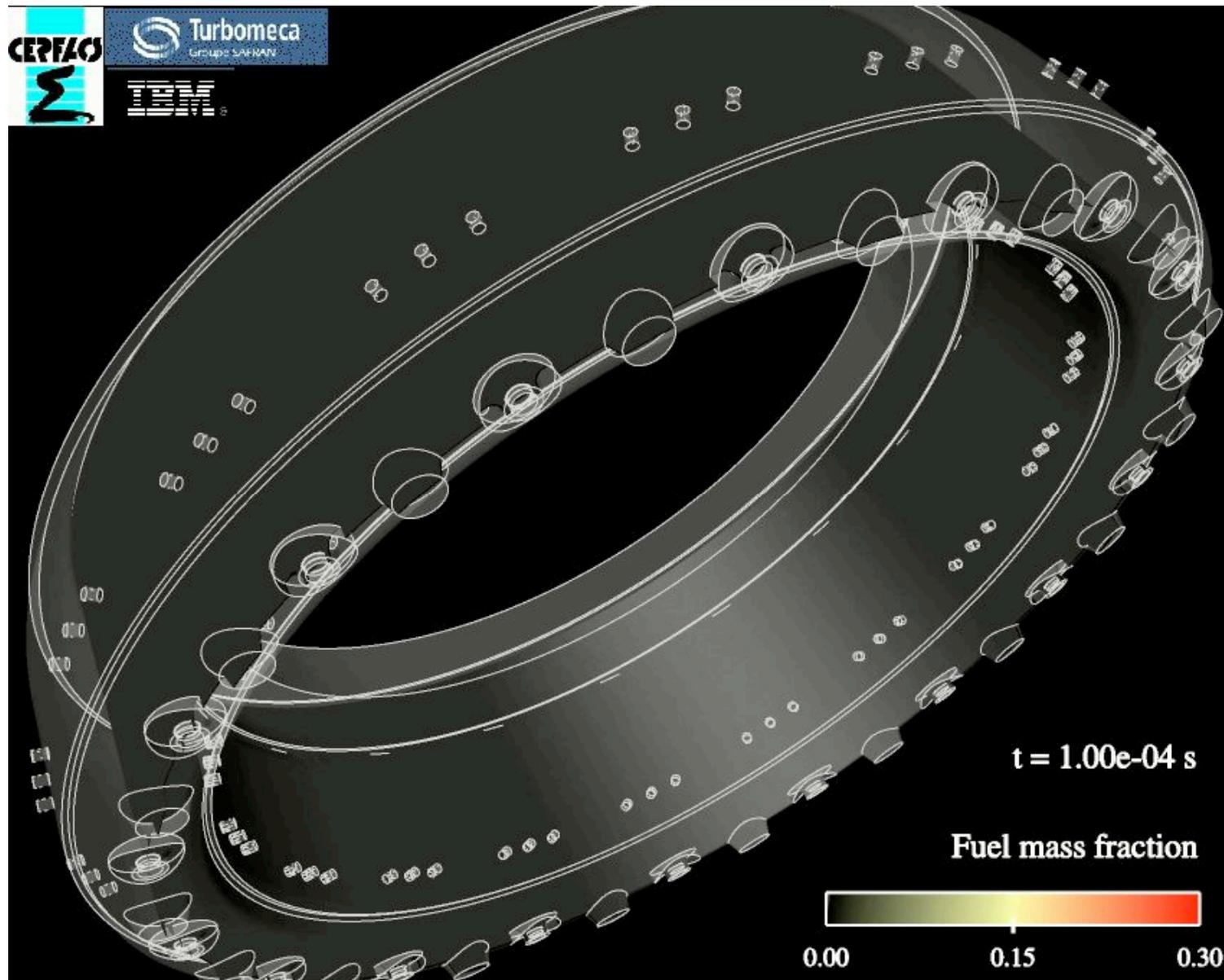


On a allumé UN brûleur, quid des autres ?

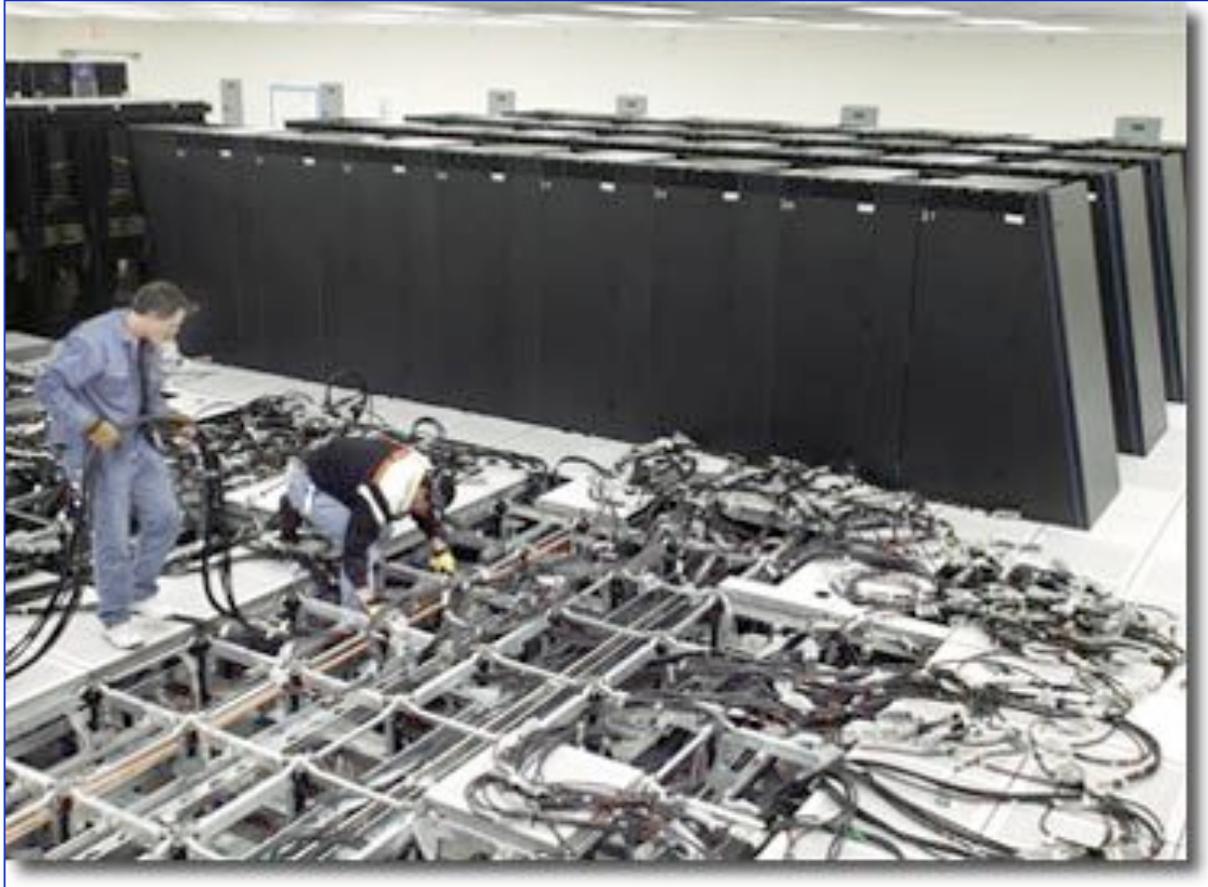


Exemple expérimental vu du fond de chambre

Et on essaie de le faire numériquement:



Calcul sur 40 millions de cellules: fait avec AVBP (CERFACS) sur 2000 à 5000 processeurs BlueGene (Top 1).



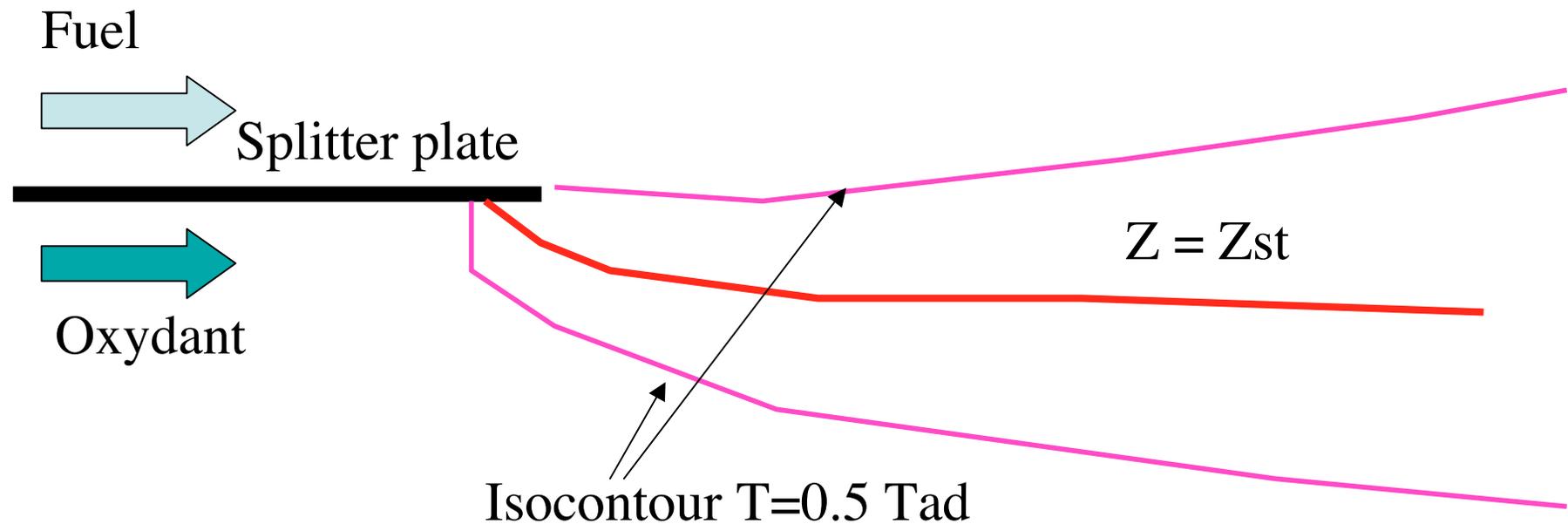
Retour aux bases:
pourquoi une flamme
's'accroche' t elle quelque part ?
(ou pas ...)

Pourquoi cette flamme est elle restée
accrochée ici ?



STABILISATION EN DIFFUSION (1)

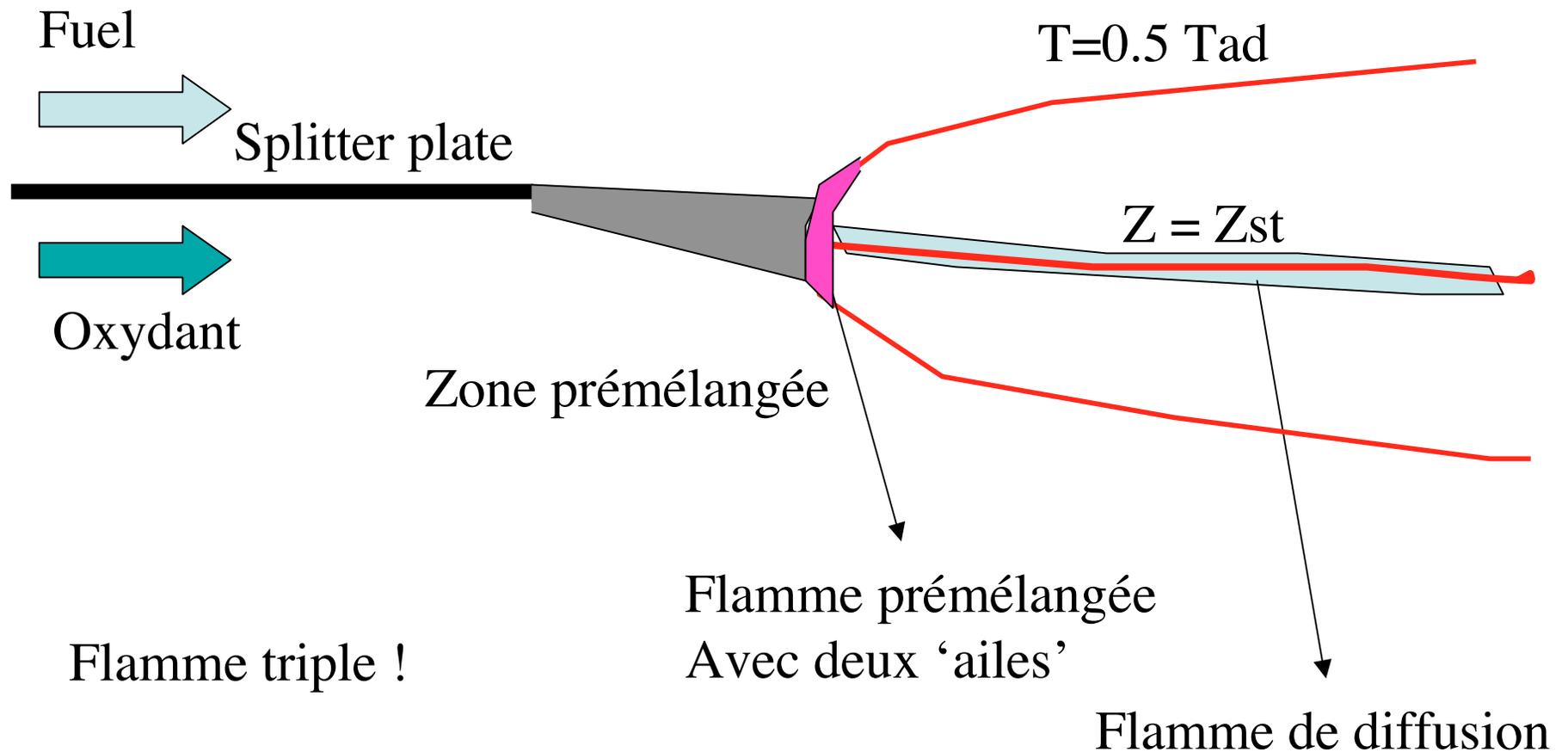
Si les deux écoulements sont assez lents (typiquement plus lents que la vitesse de flamme en prémélange)



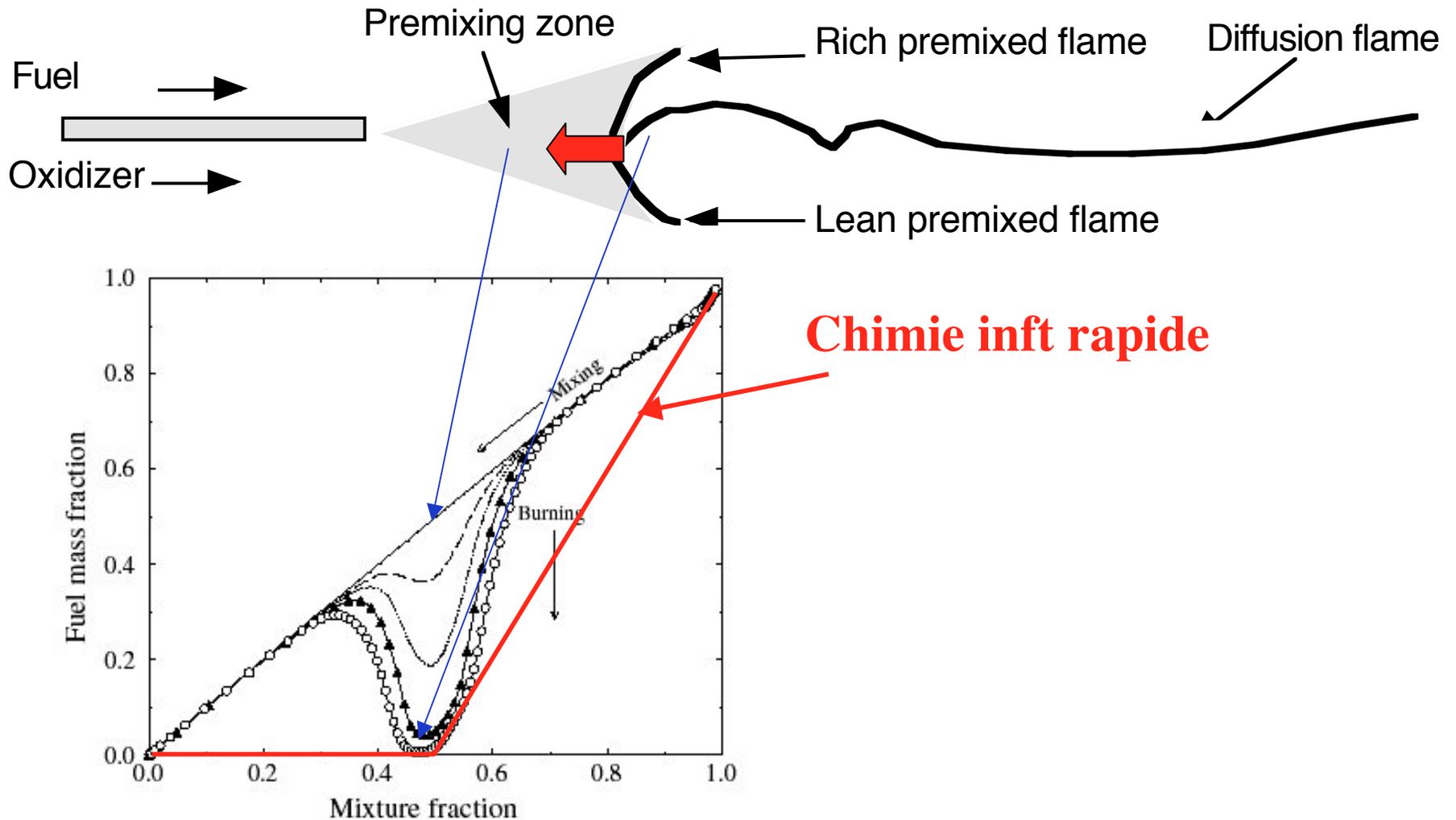
Limité à des très faibles vitesses donc puissances !
Flamme de diffusion 'accrochée'

STABILISATION EN DIFFUSION (2)

Si les deux écoulements sont un peu plus rapides que la vitesse de flamme

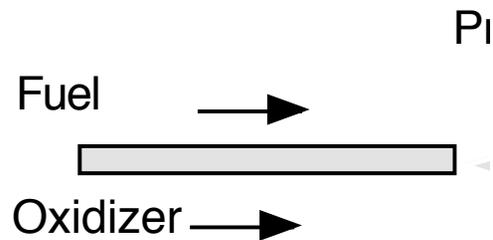


STABILISATION EN DIFFUSION (3)

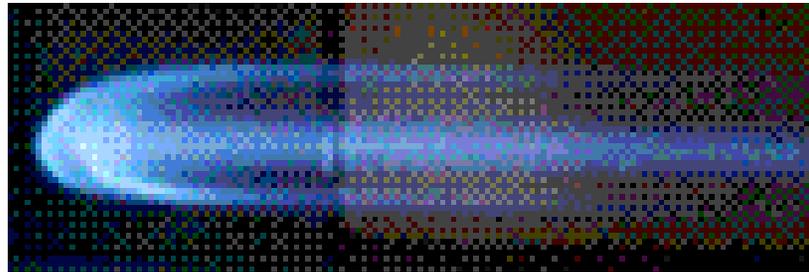


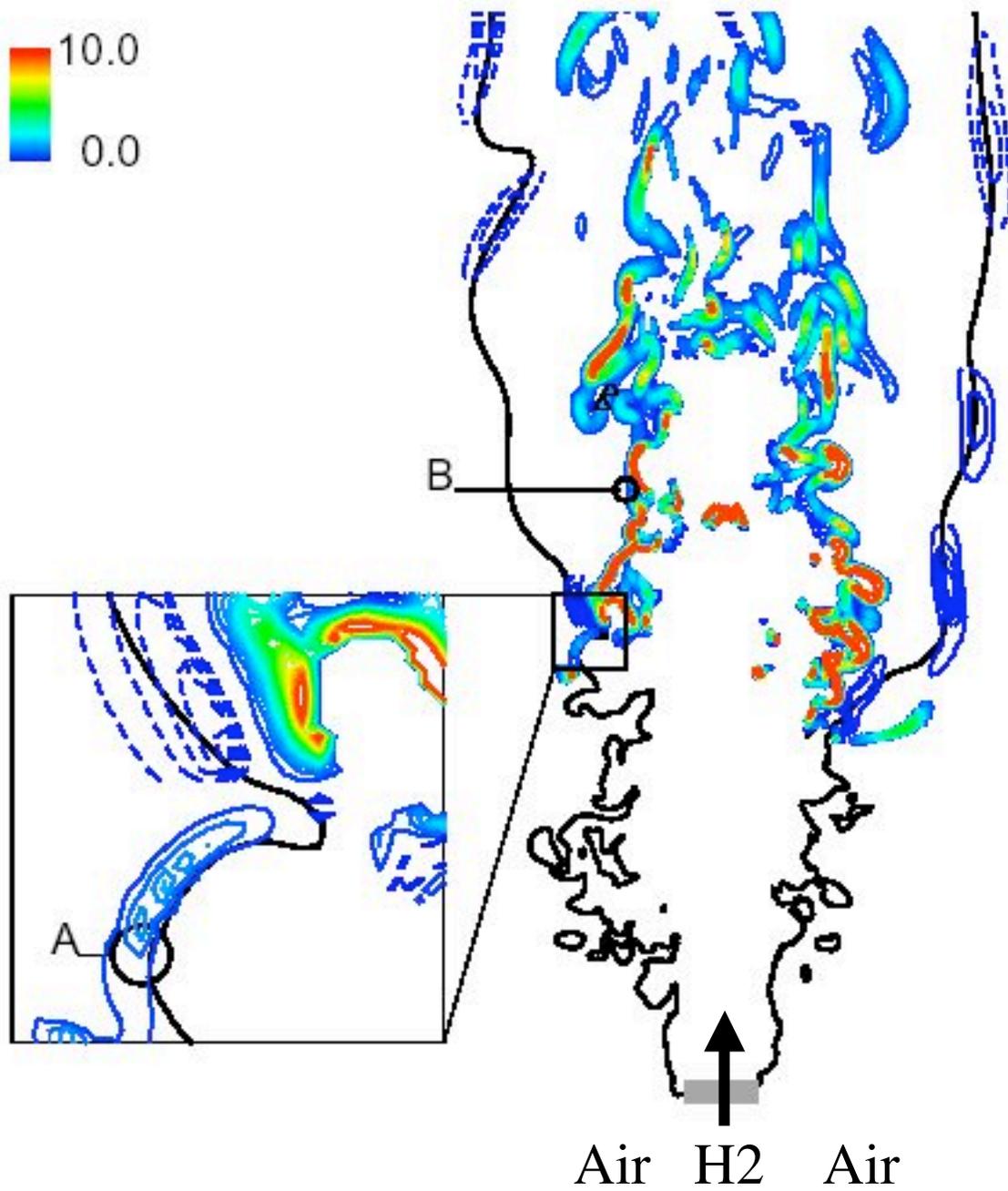
Mais les vitesses des écoulements doivent rester faibles (inférieures à la vitesse de flamme pour au moins l'un des deux)

STABILISATION EN DIFFUSION (3)



Experience de Kioni



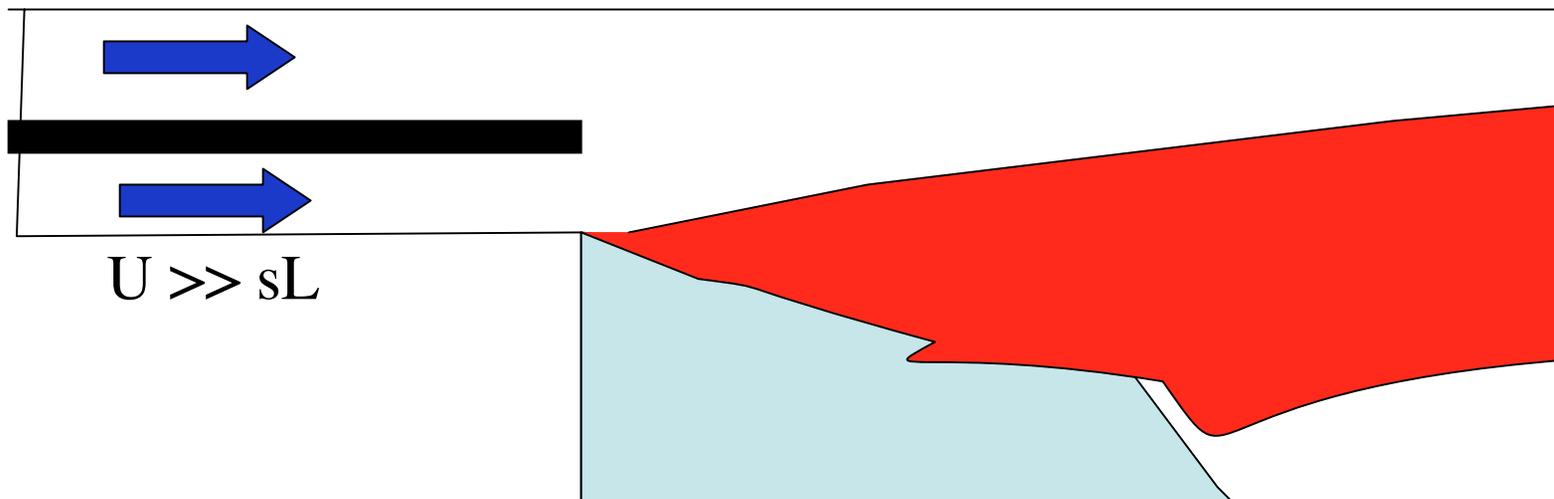


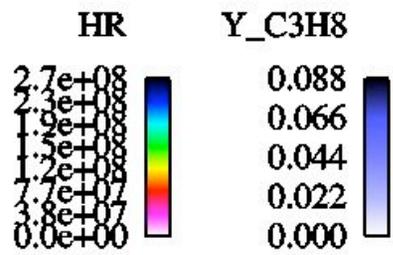
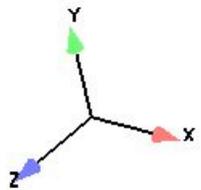
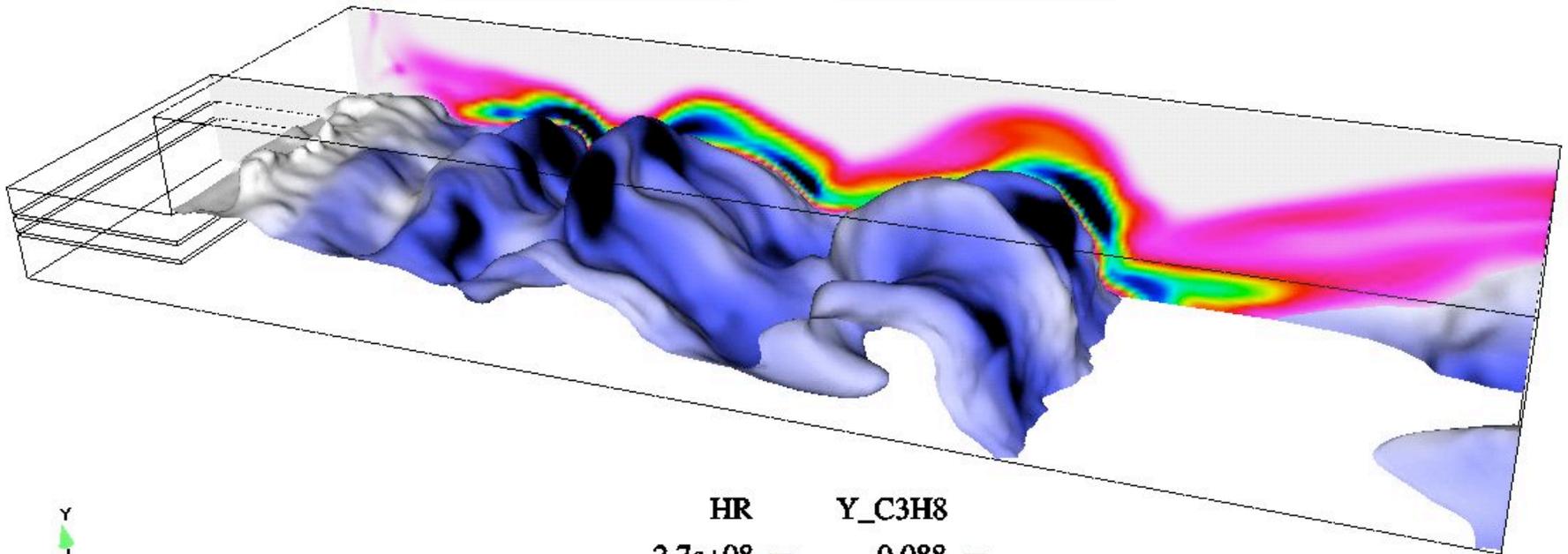
STABILISATION EN DIFFUSION (4)

Que faire si on veut aller plus vite !

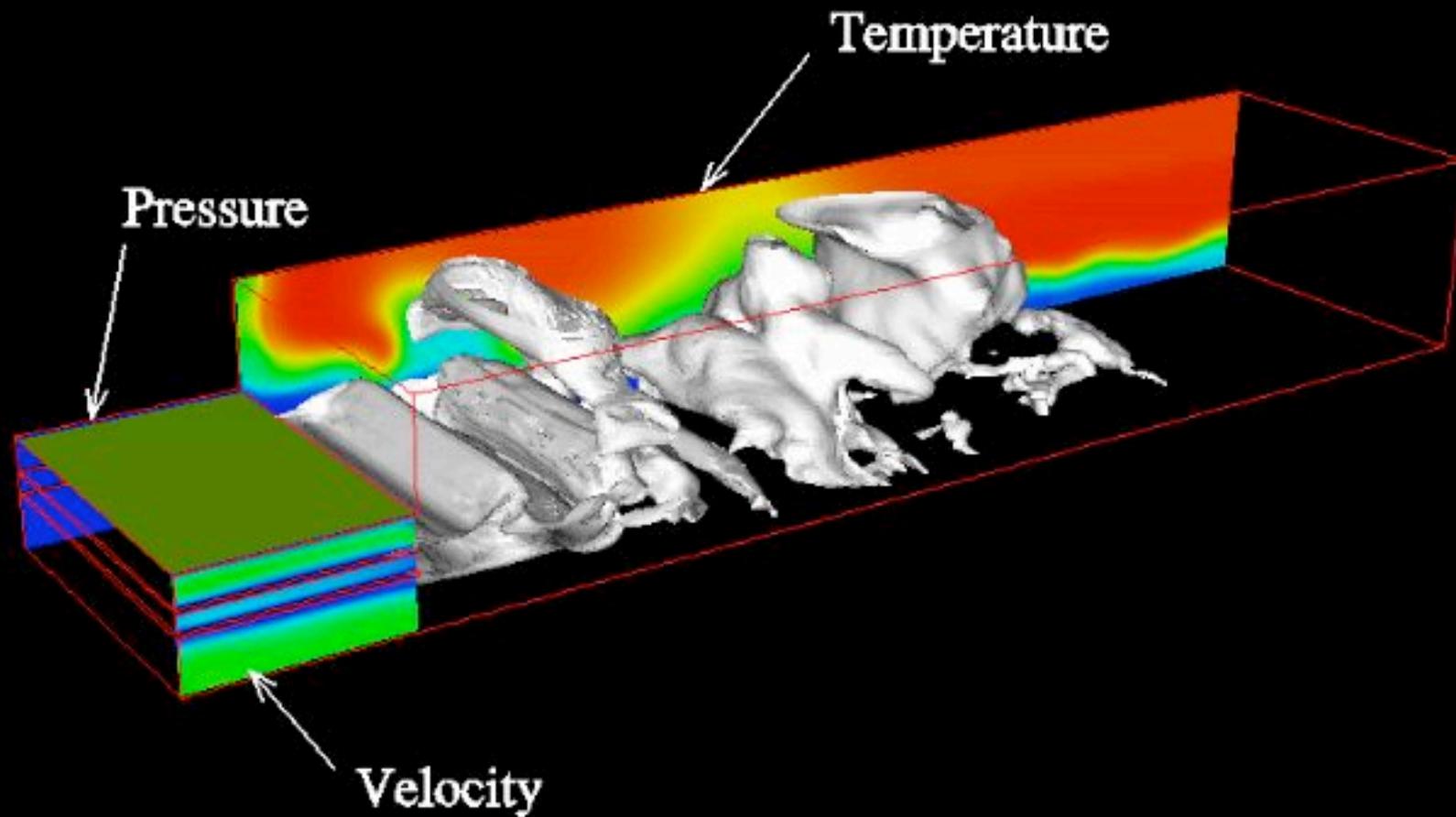
Il faut 'accrocher la flamme':

- Point chaud (plasma, fil chauffé, gaz issus d'une autre flamme)
- Recirculation de gaz brûlés





Fuel mass fraction isosurface ($Y_f = 0.1$)

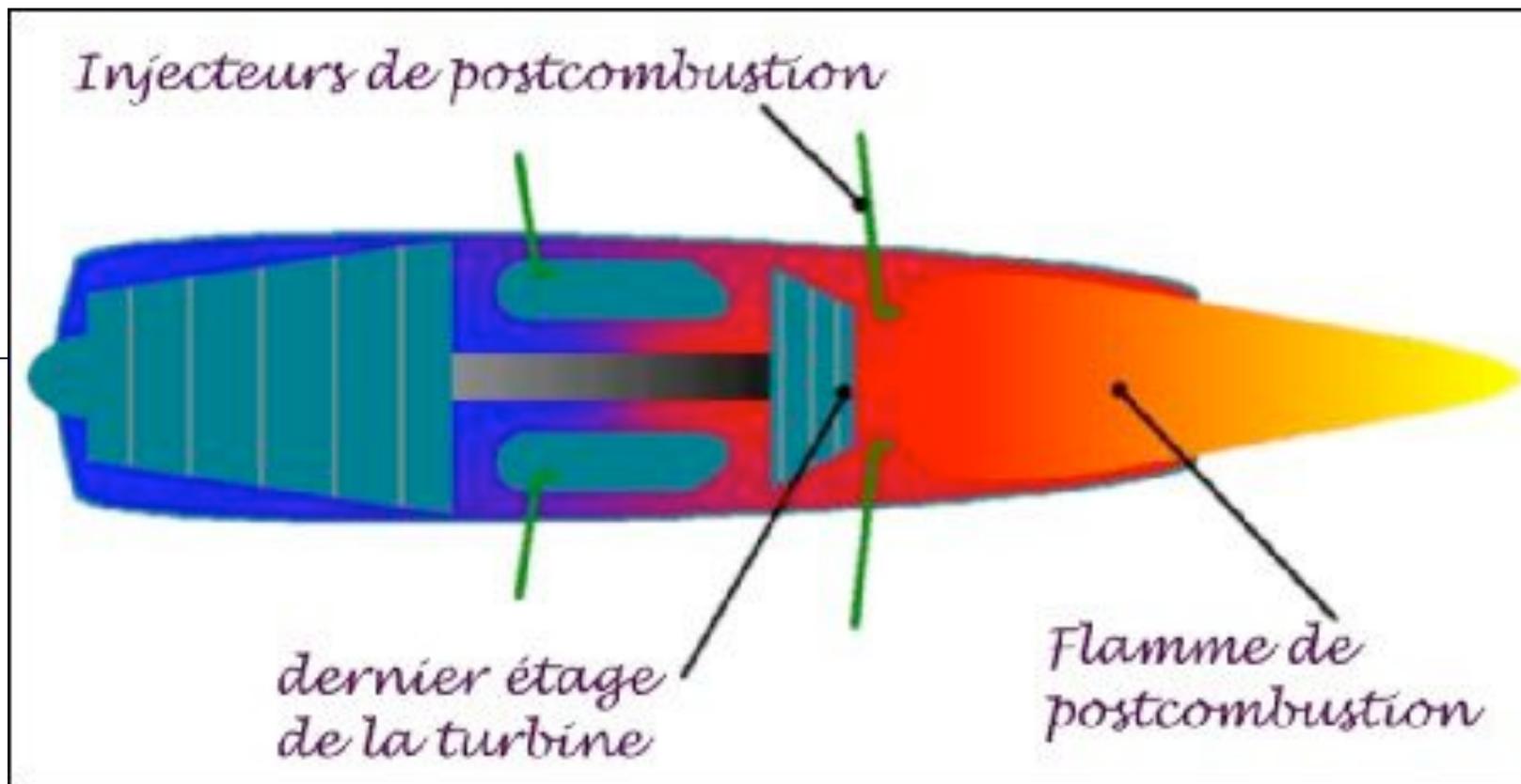


STABILISATION EN DIFFUSION (5)

Mais les zones de recirculation par élargissement brusque ont aussi des problèmes:

- les parois deviennent chaudes --> structures ont des problèmes
- encombrement

Il arrive qu'on utilise des accroche flammes:

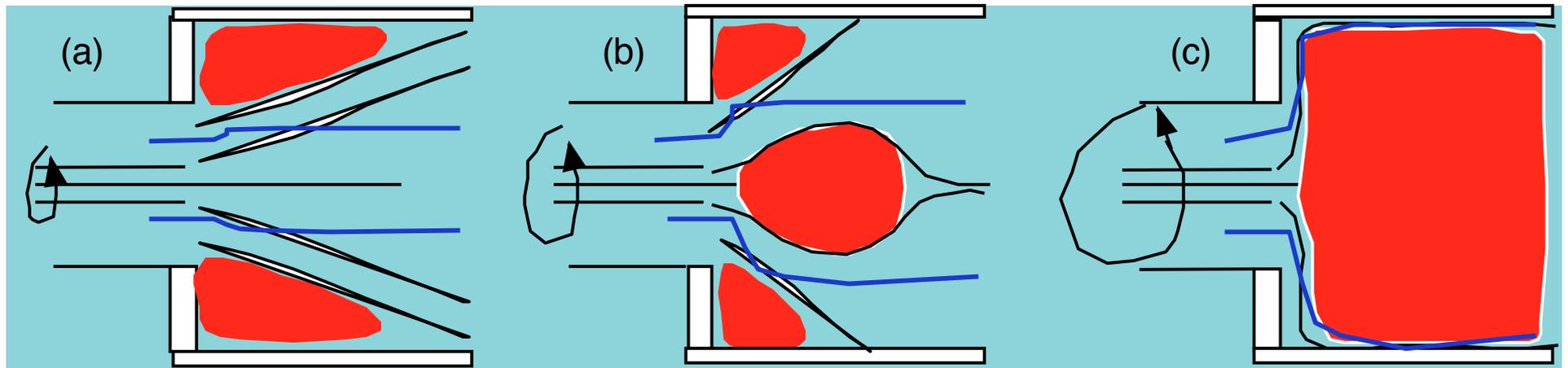


Exemples de postcombustion



STABILISATION EN DIFFUSION (6)

Mais il y a une autre technique: swirler l'écoulement cad le faire tourner autour de l'axe du bruleur. En effet, faire tourner un écoulement suivant θ permet de le faire recirculer ... !



Faible swirl

Moyen swirl

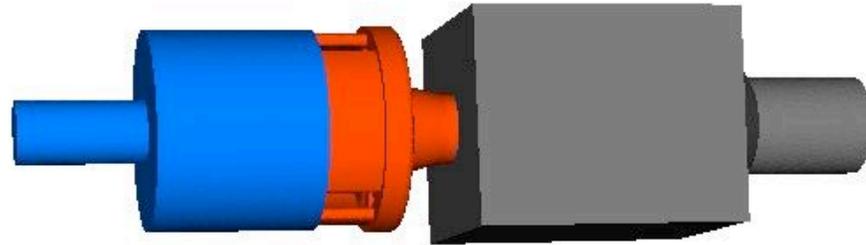
Fort swirl



Zones de recirculation

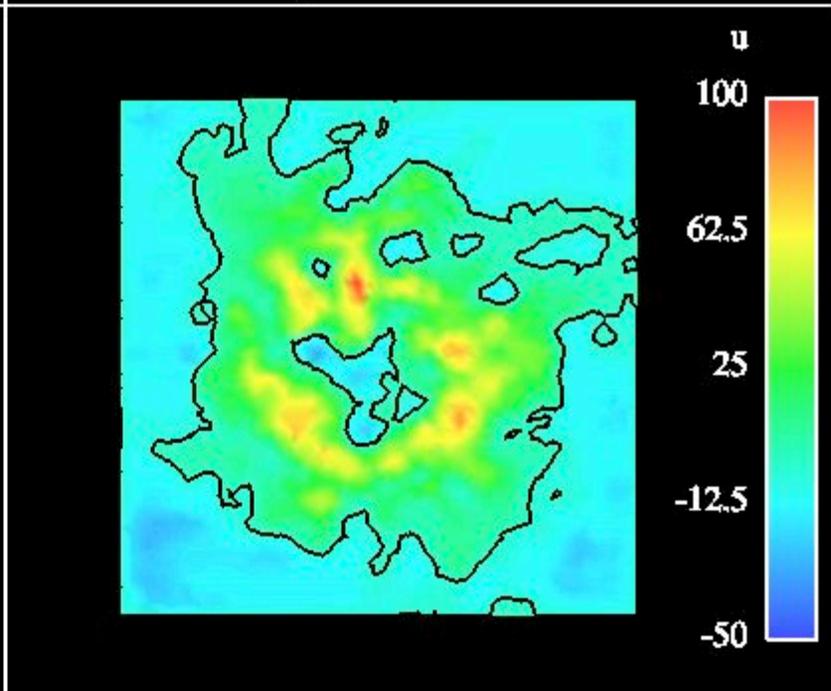
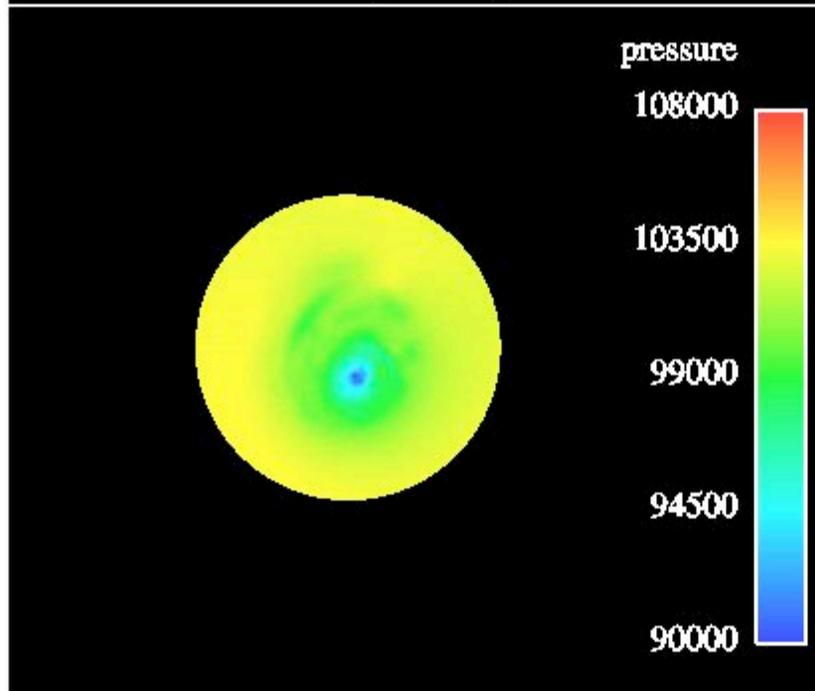
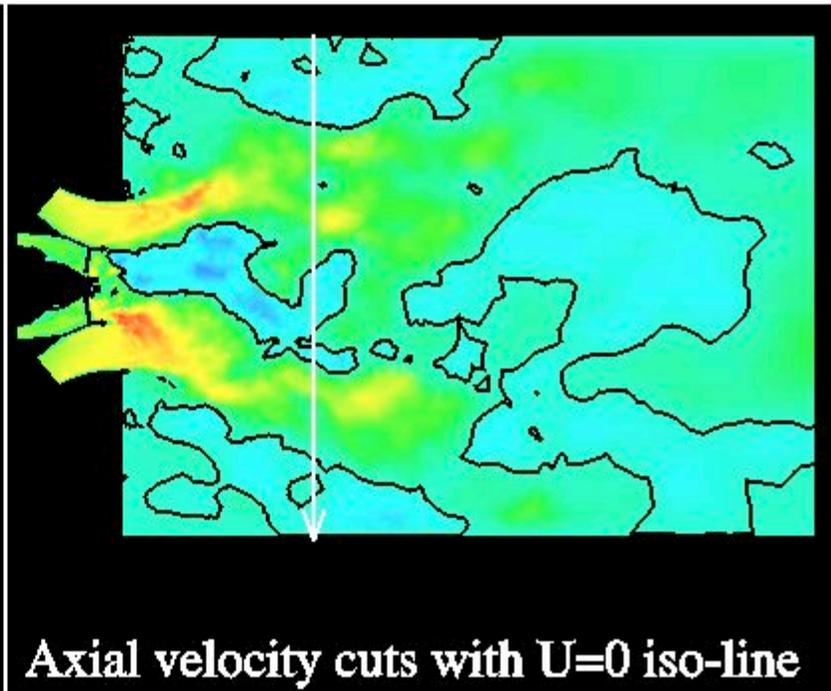
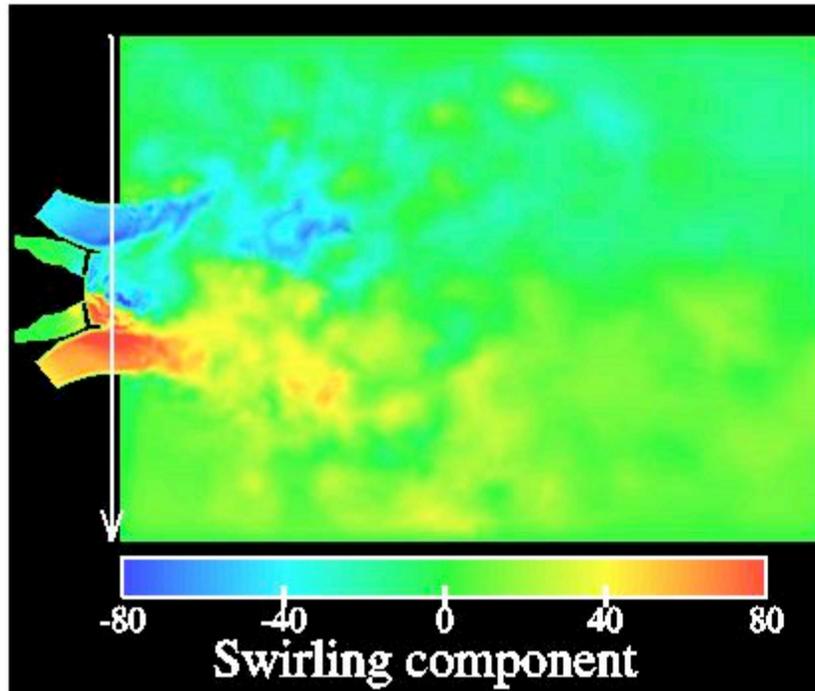
COMMENT SWIRLER ? Avec des pales, des injections latérales...

PRECCINSTA EU project



Mesh	device fully meshed
	3 million cells
	3D unstructured

Measurement performed by DLR



LE SWIRL: solution à tout ?

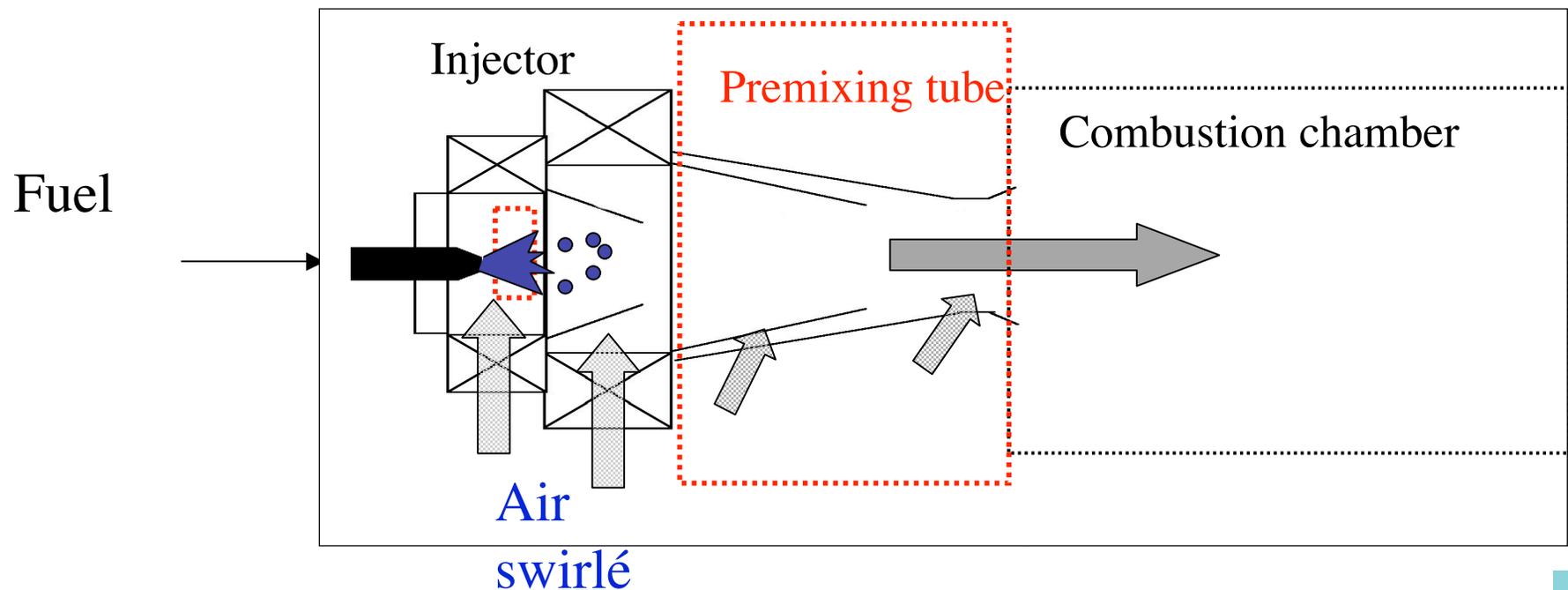
Non !

1/ Ça cause une grosse perte de charge !

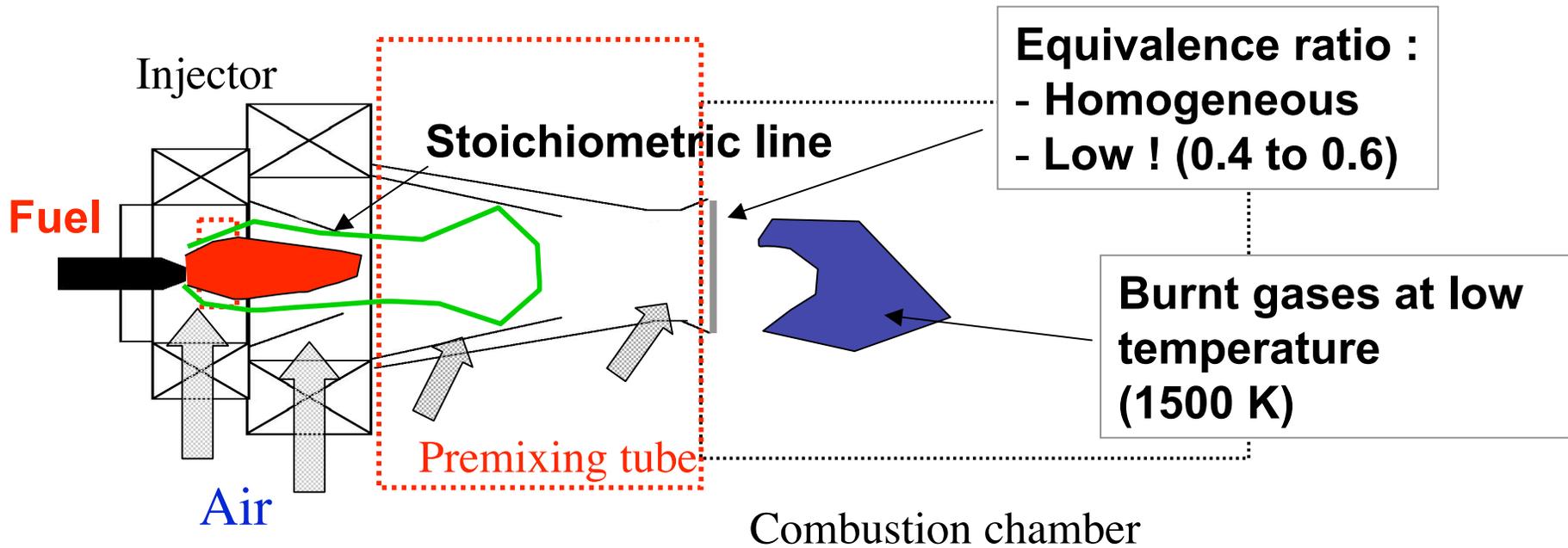
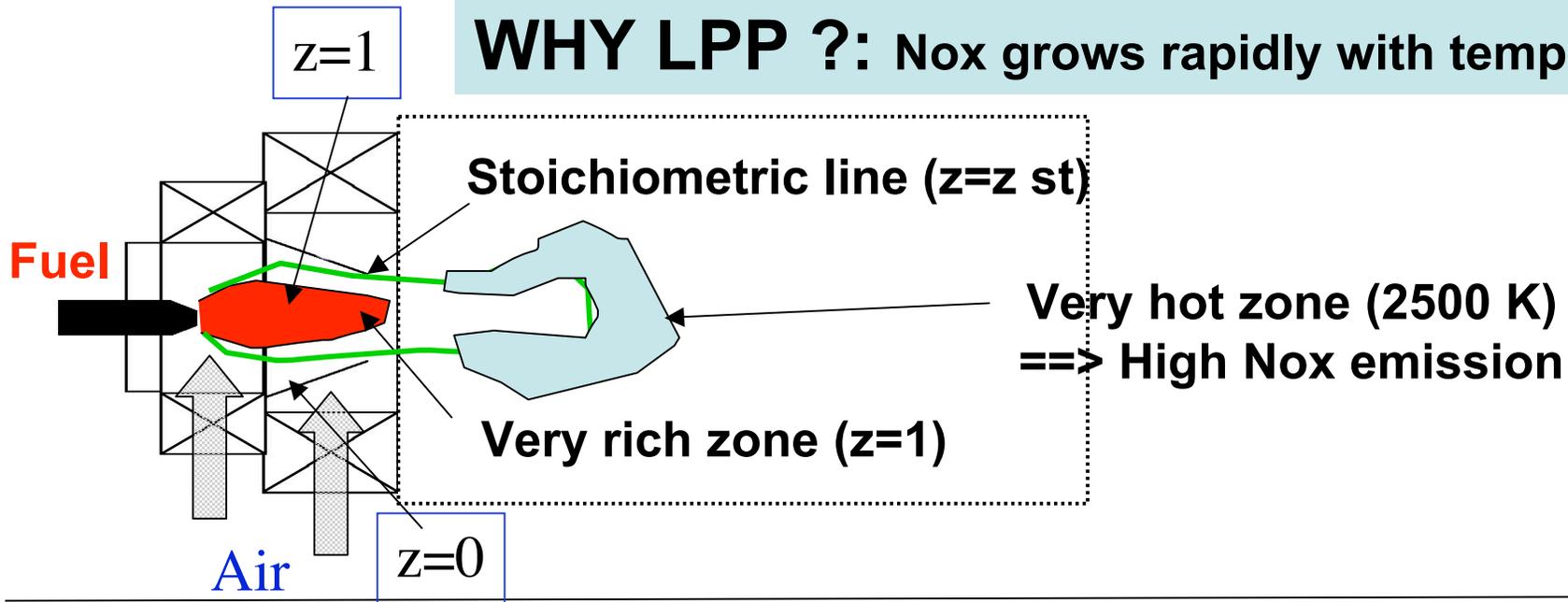
2/ C'est la source éventuelle de flashback et ça, ce n'est pas bon du tout

Revenons à l'exemple du LPP (Lean Premixed Prevaporized)

Que vous devriez mieux comprendre maintenant...



WHY LPP ? : Nox grows rapidly with temperature



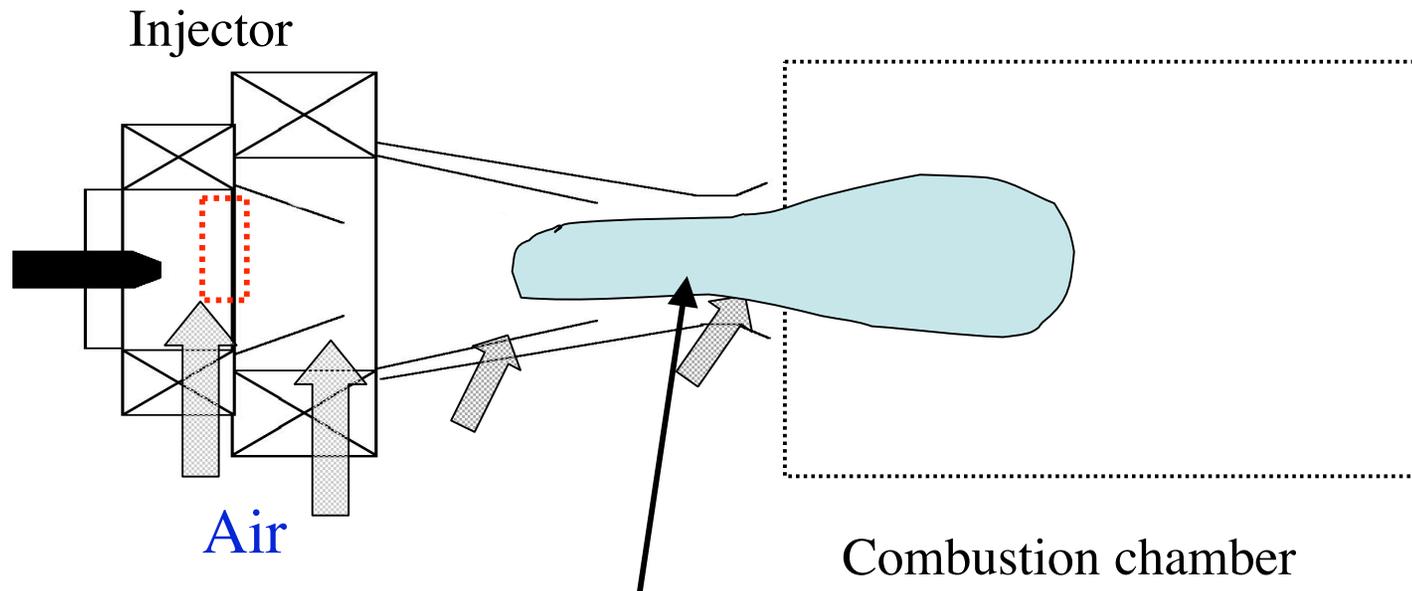
Donc LPP= bonne idée

Le tube de mélange permet de mieux mélanger et donc de polluer moins

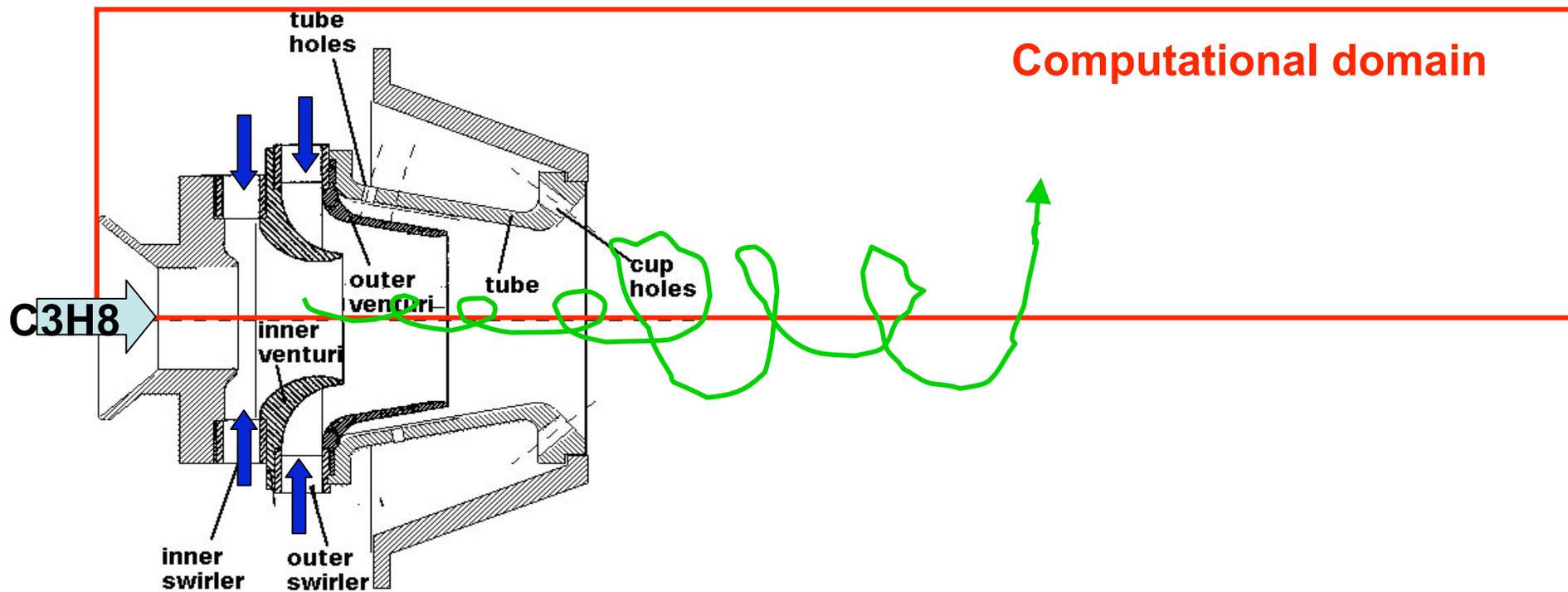
Le swirl permet de stabiliser la flamme.

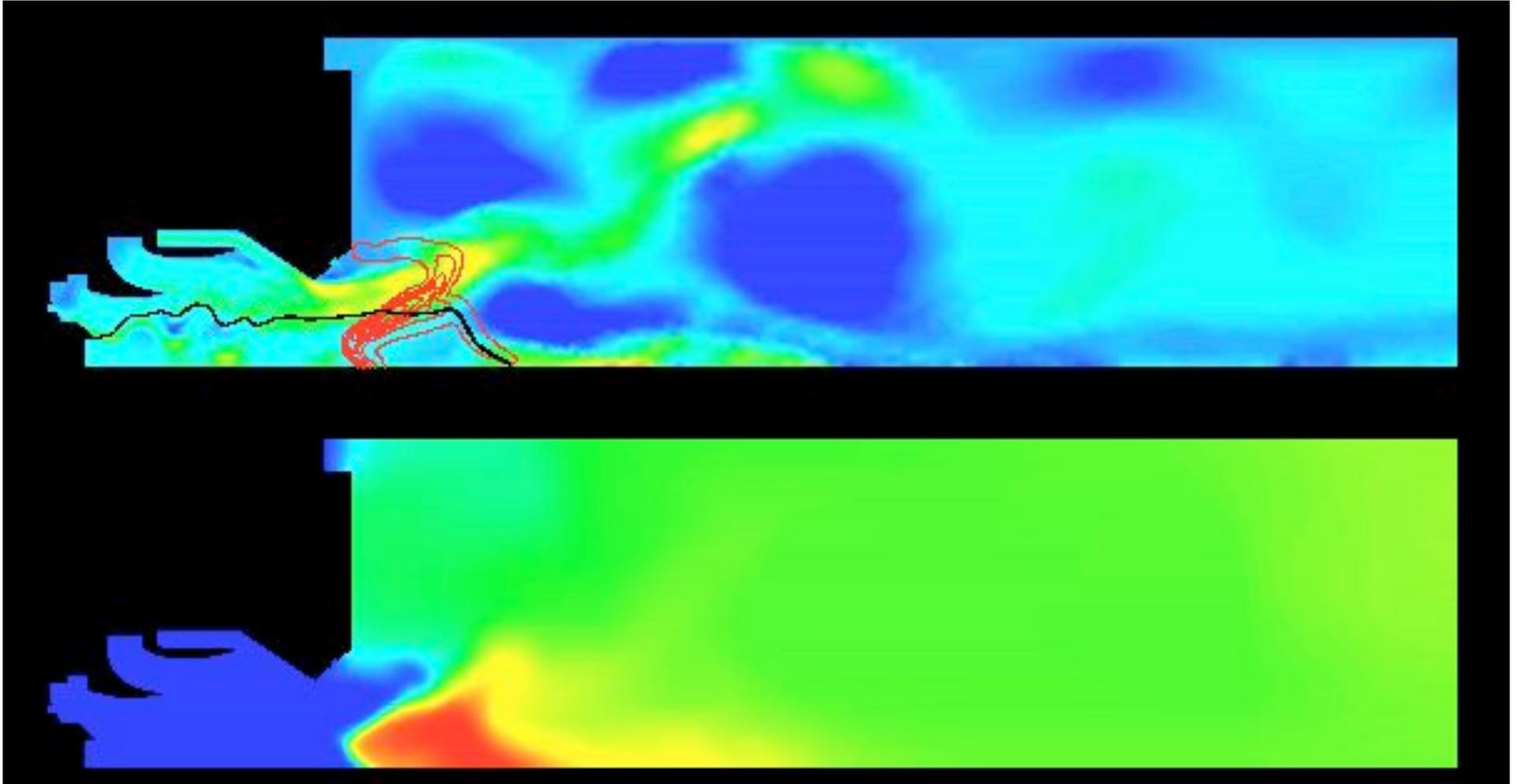
MAIS il existe une grande zone où la vitesse est négative par moments

Dans cette zone, la flamme peut remonter ! FLASHBACK !



Ici U est négatif !





STABILISATION EN PREMELANGE

Mêmes problèmes qu'en diffusion. On utilise:

- des accroche flammes
- des zones de recirculation
- du swirl

Le danger reste le flashback: en prémélange, on est toujours en danger
==> on est amenés à mettre des dispositifs anti flashback

STABILISATION PAR AUTOALLUMAGE

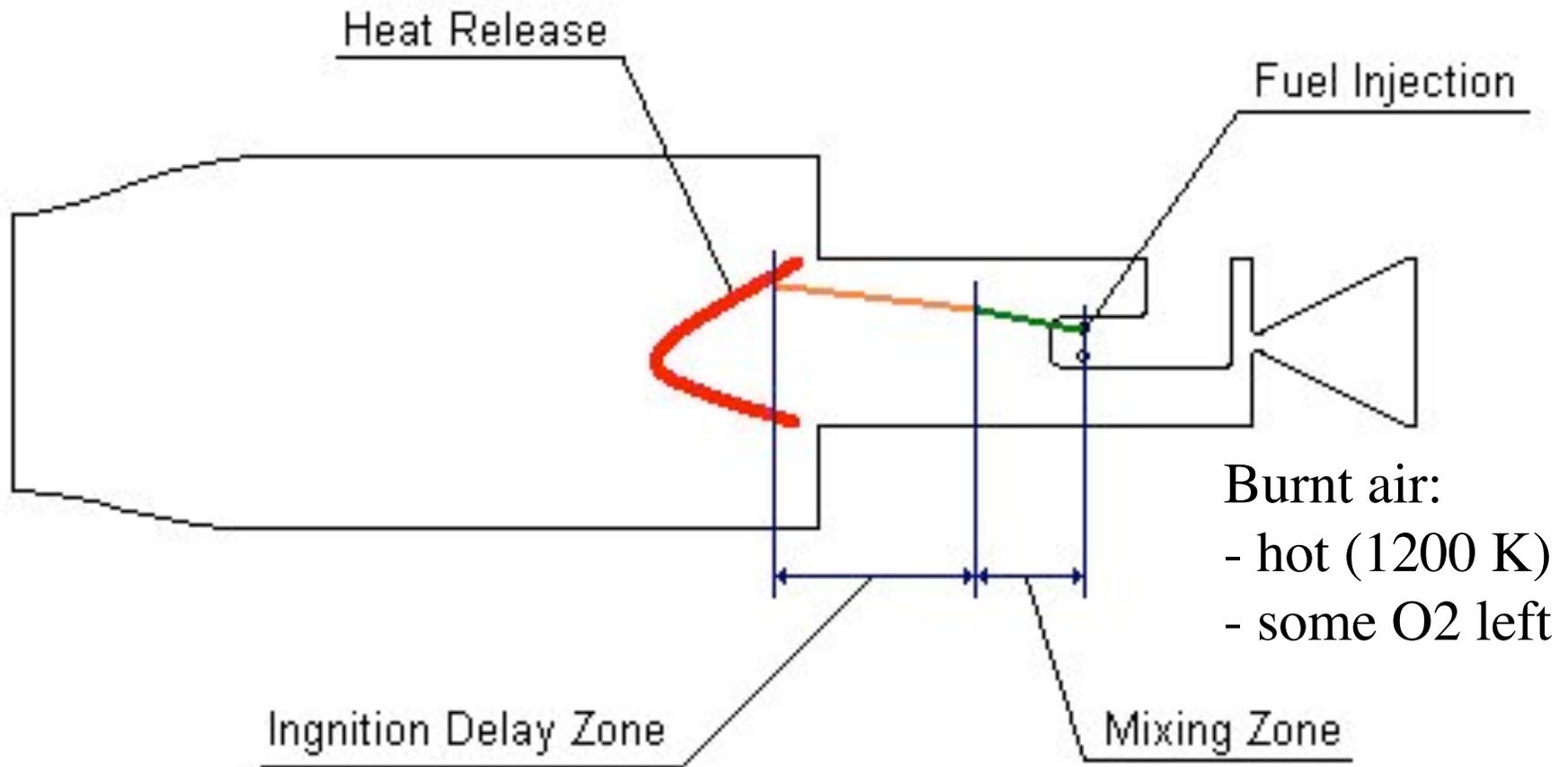


Bruleur
secondaire

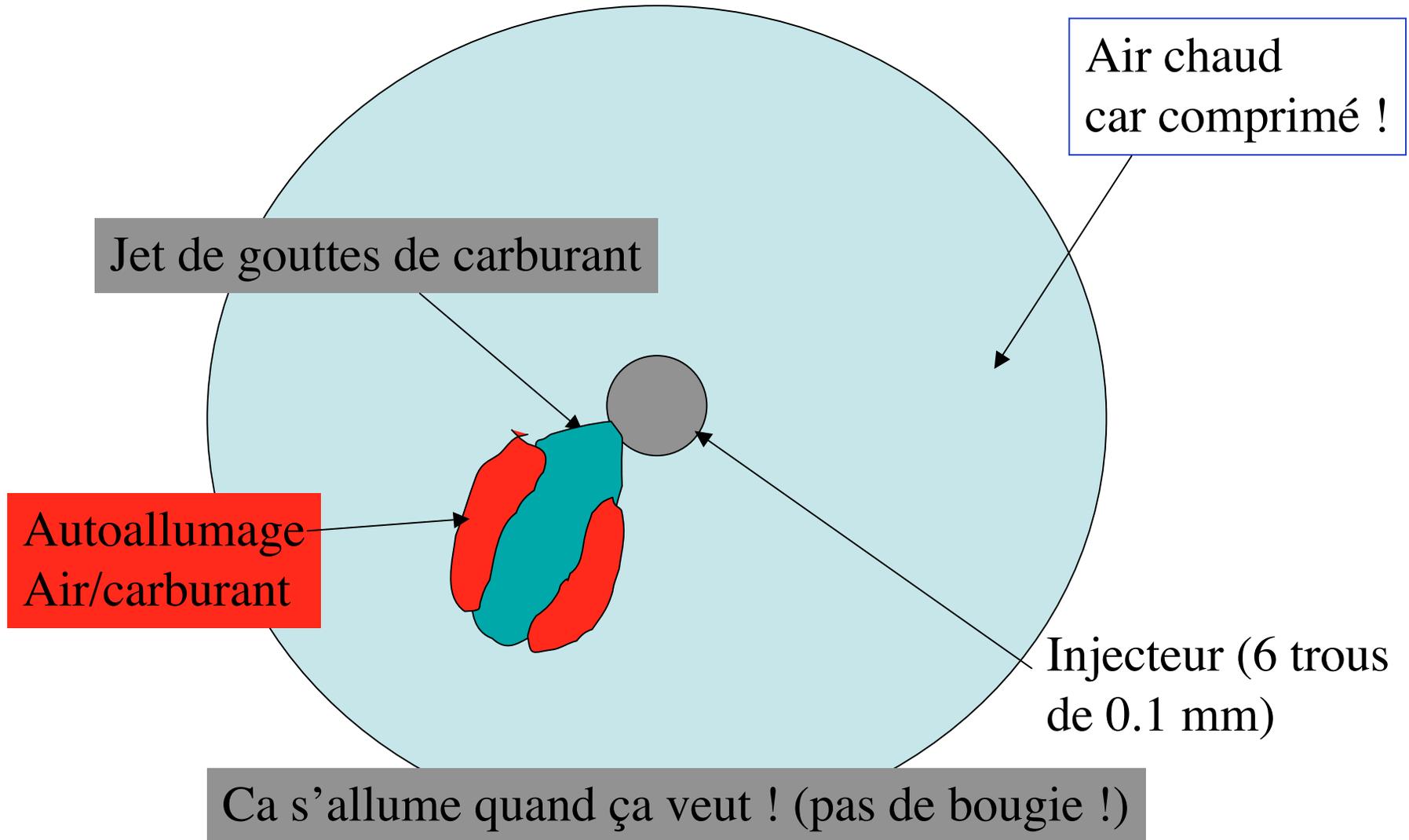


Bruleur primaire

AUTOALLUMAGE TURBINE



AUTOALLUMAGE DIESEL



INTERACTION FLAMME/PAROI

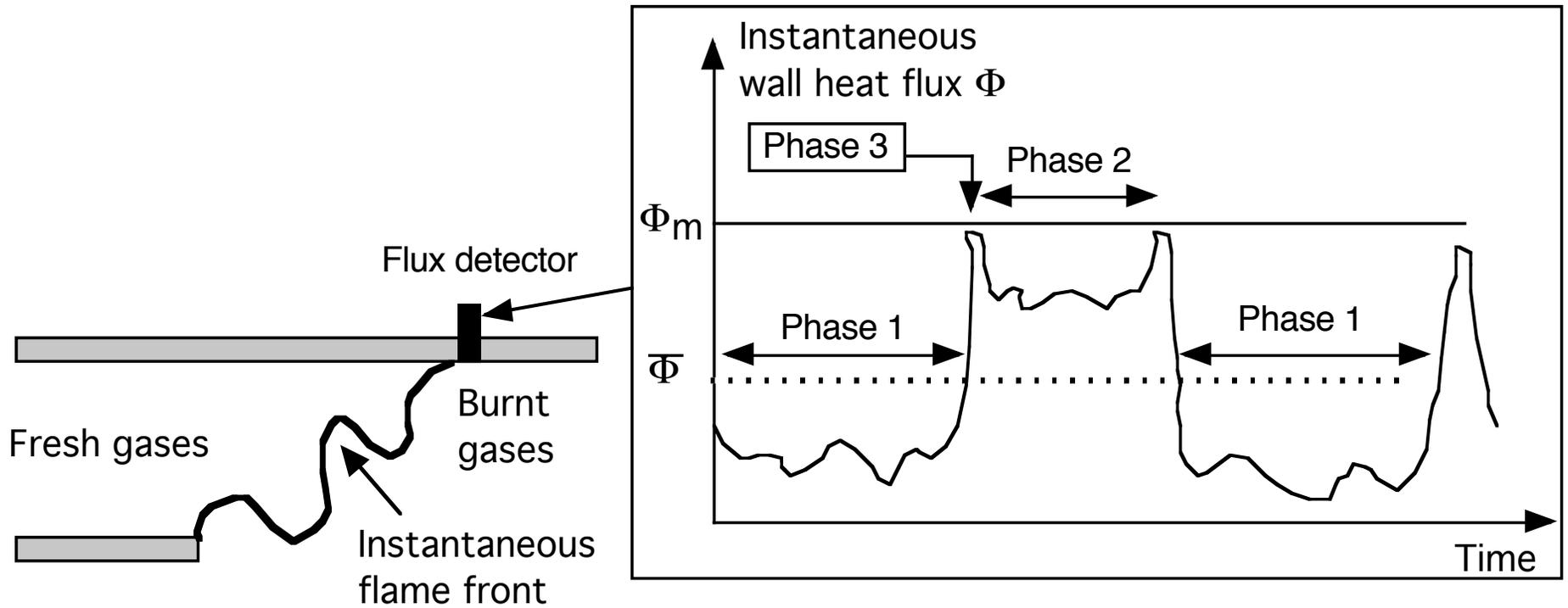
Il y a des parois partout ... comment se fait l'interaction entre parois et flamme ?

En fait, il y a deux problèmes différents pour les parois:

- Etre confrontées à des gaz chauds
- Etre confrontées à une flamme active (cad à une réaction chimique SUR la paroi)

De façon générale, on doit refroidir les parois:

- Vigoureusement dans un moteur à piston: $T_{wall}=200$ degrés C
- Un peu moins dans une turbine ! ==> les parois sont beaucoup plus chaudes.
- Dans un moteur fusée, les parois brûlent (ablation) mais c'est un autre problème



Phase 1: la paroi voit des gaz froids

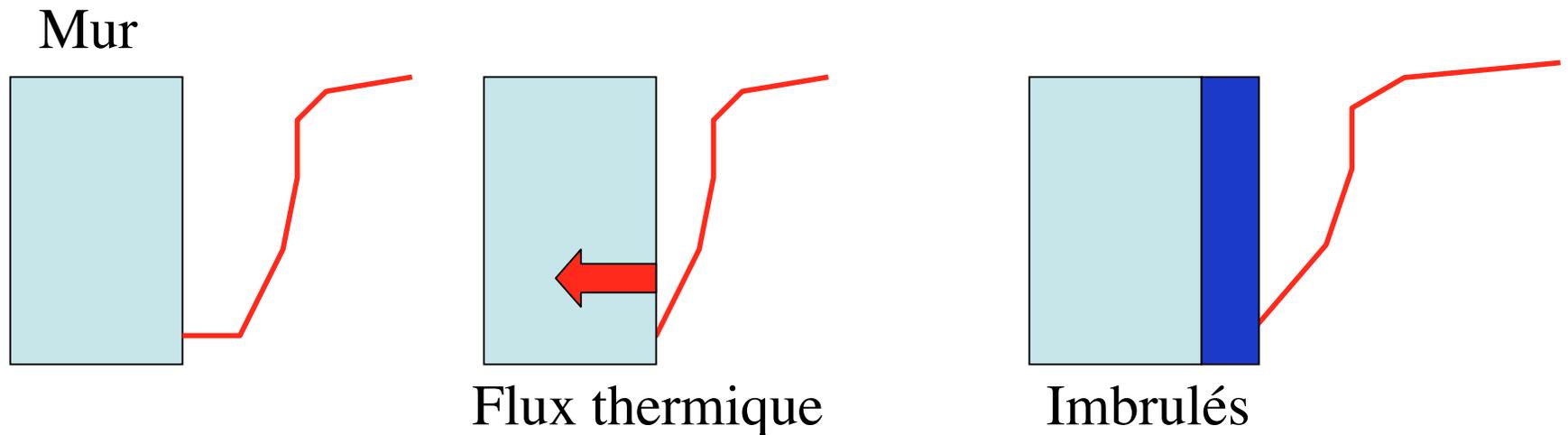
Phase 2: la paroi voit des gaz brûlés

Phase 3: une flamme active touche la paroi

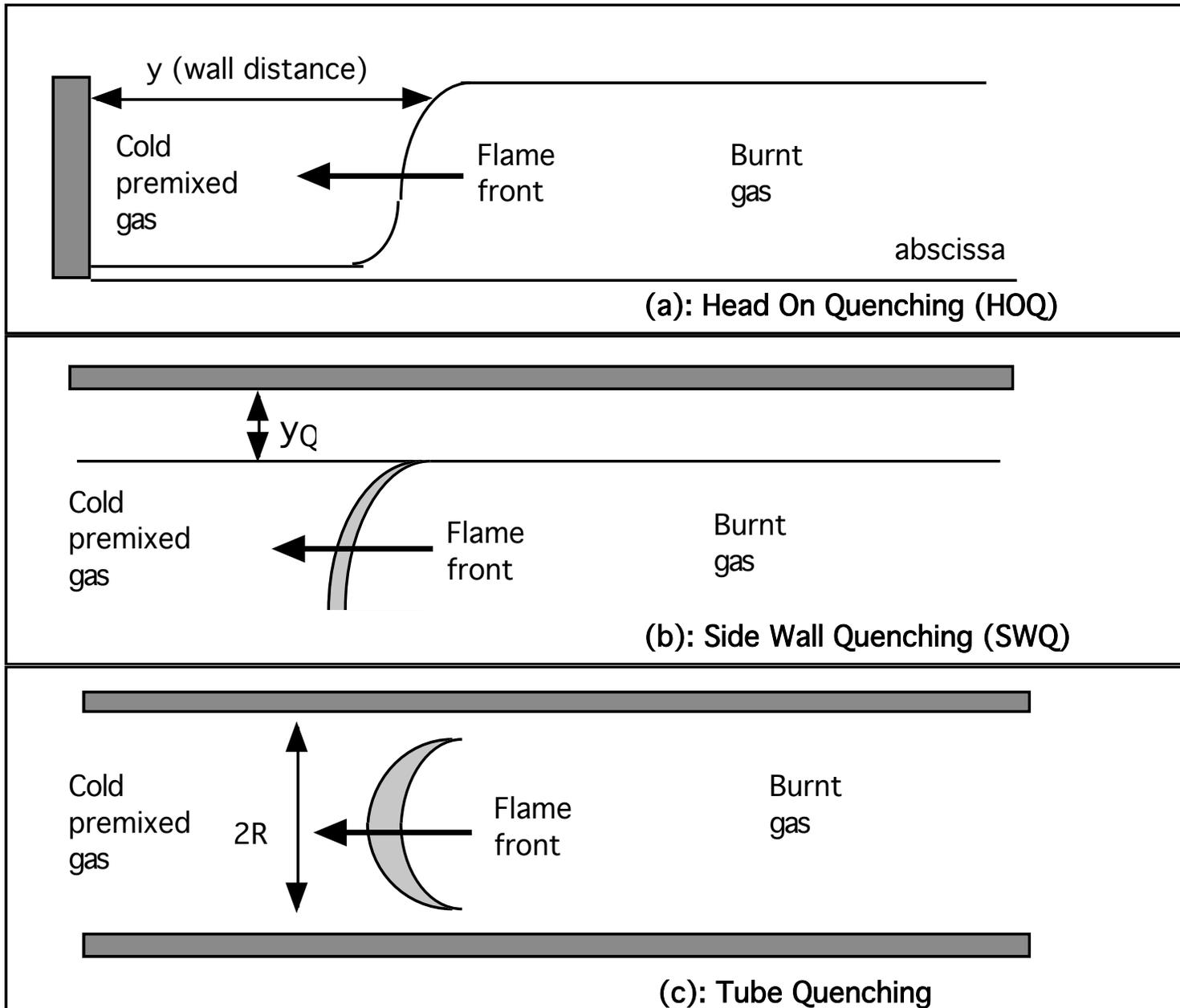
Interaction à double sens

La paroi est chauffée par la flamme. Au pire, la paroi peut se mettre à brûler...

MAIS la paroi influence aussi la flamme. Comme la paroi est plus froide que le gaz, les réactions chimiques y sont inhibées
==> la flamme va devoir s'éteindre en atteignant la paroi
==> il restera des gaz non brûlés près de la paroi.



Trois configurations d'interaction flamme paroi

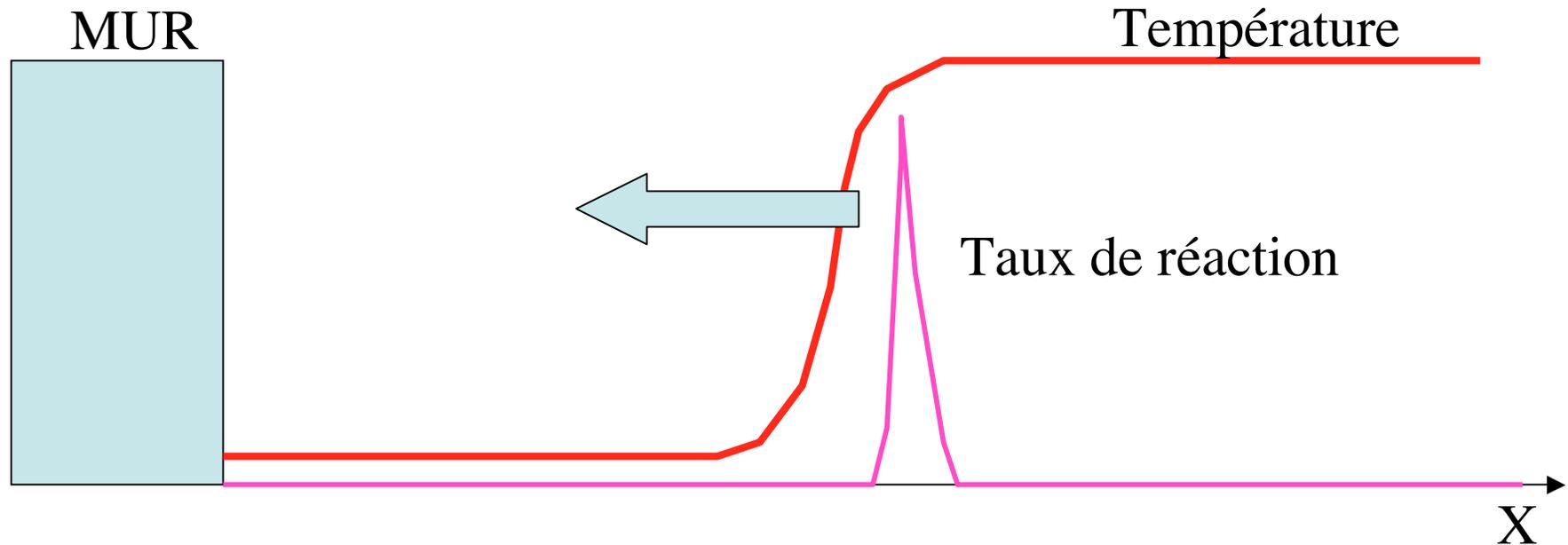


HEAD ON

SIDE WALL

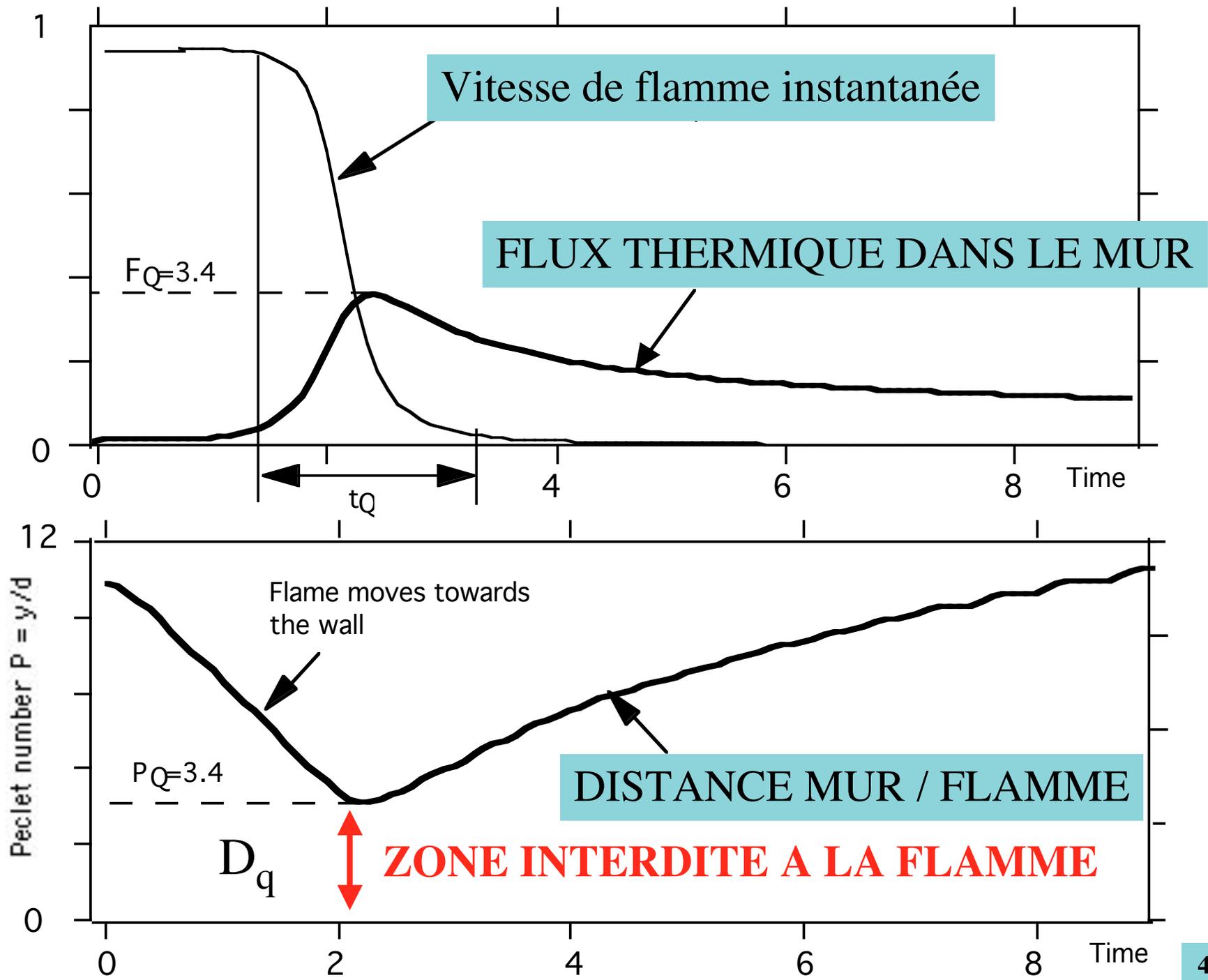
TUBE

EXEMPLE DE CALCUL HEAD ON



L'intégrale du taux de réaction donne la vitesse de flamme
Le gradient de T sur le mur donne le flux thermique dans le mur.

Chapitre 7 dans le livre de cours



RESULTATS FOURNIS PAR THEORIE ET CALCUL:

Distance flamme paroi:

$$D_q / \delta_L = 3 \quad \text{si } \delta_L = n / s_L \quad (\text{cf cours})$$

--> la flamme s'arrête à quelques épaisseurs de flamme du mur

Flux dans la paroi:

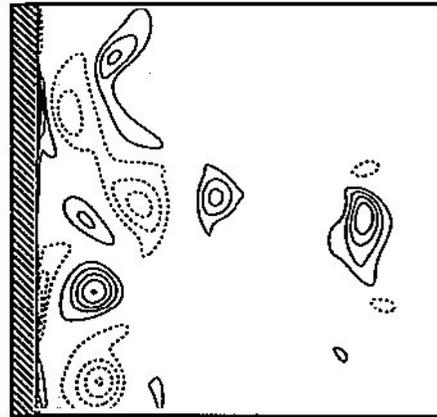
$$\phi_q = 0.3 P$$

où P est la puissance de la flamme

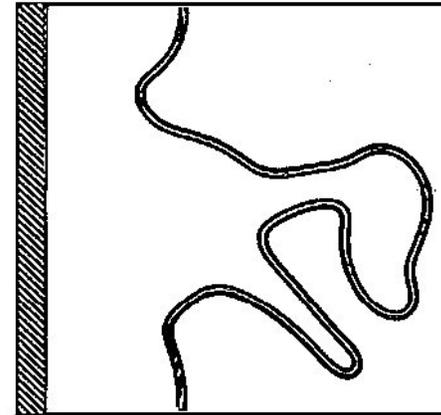
$$P = \rho s_L c_p (T_2 - T_1)$$

--> la flamme s'éteint quand 1/3 de sa puissance est passée dans le mur

En turbulent:
C'est plus dur



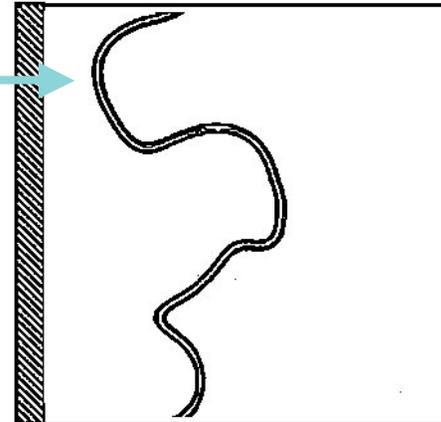
$$\frac{L}{tF} = 3.3$$



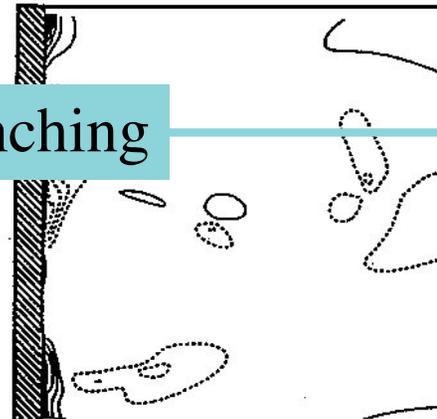
Head on quenching



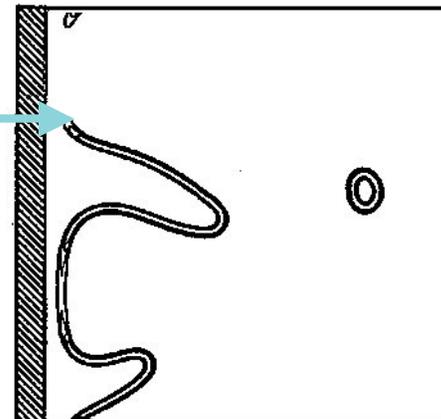
$$\frac{L}{tF} = 4.4$$



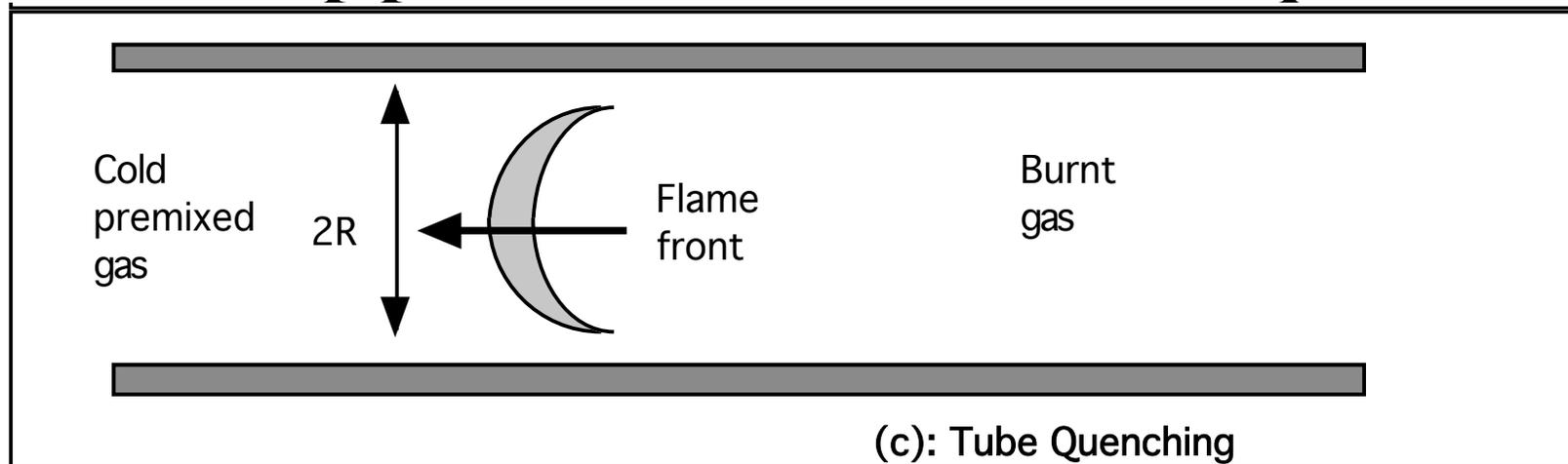
Side wall quenching



$$\frac{L}{tF} = 7.2$$



Une application du ‘tube’ quenching

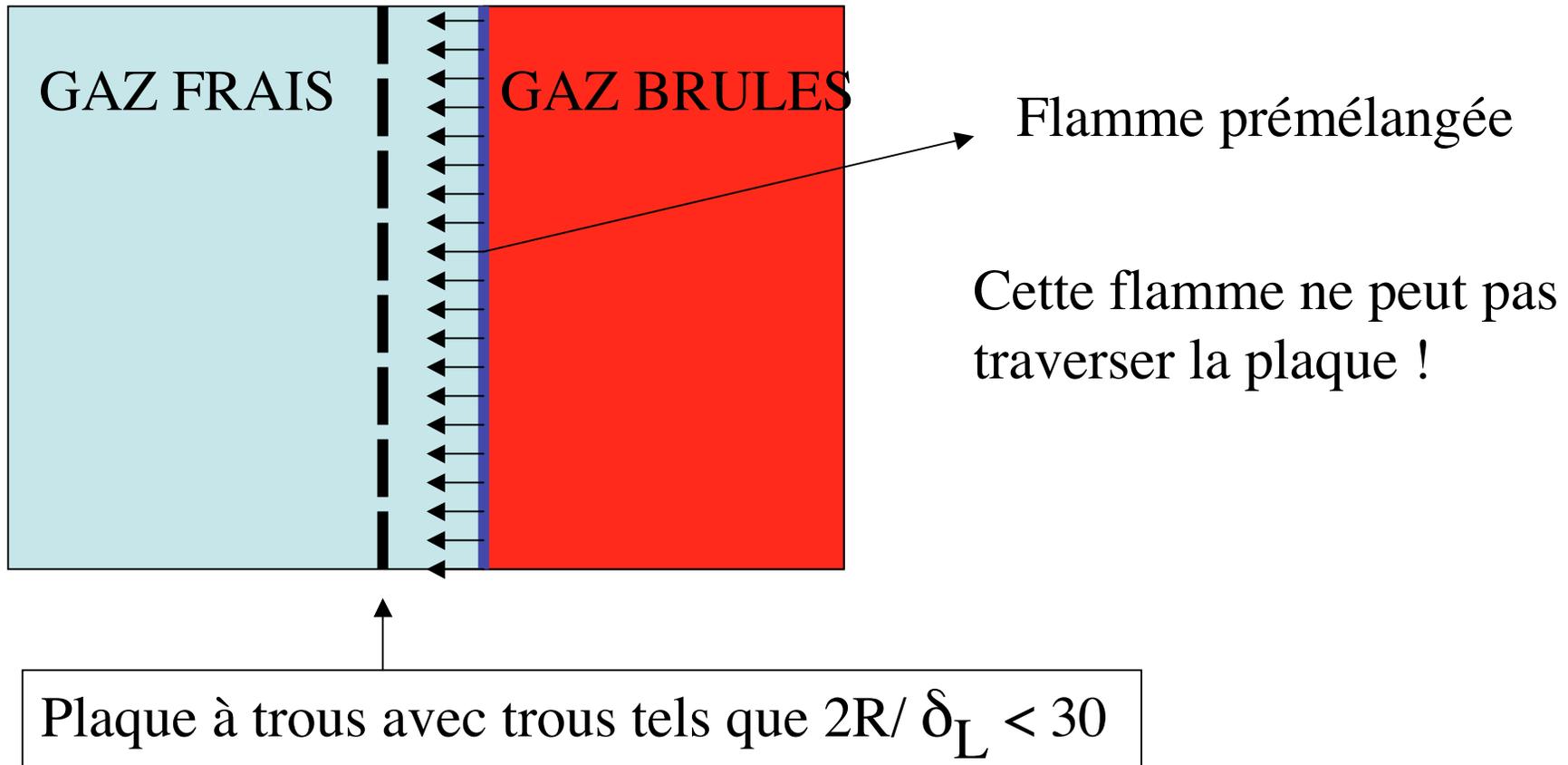


Quand le tube est trop petit, la flamme s'éteint totalement:
Experience, théorie et calculs donnent:

$2R / \delta_L < 30 \implies$ la flamme ne peut plus passer

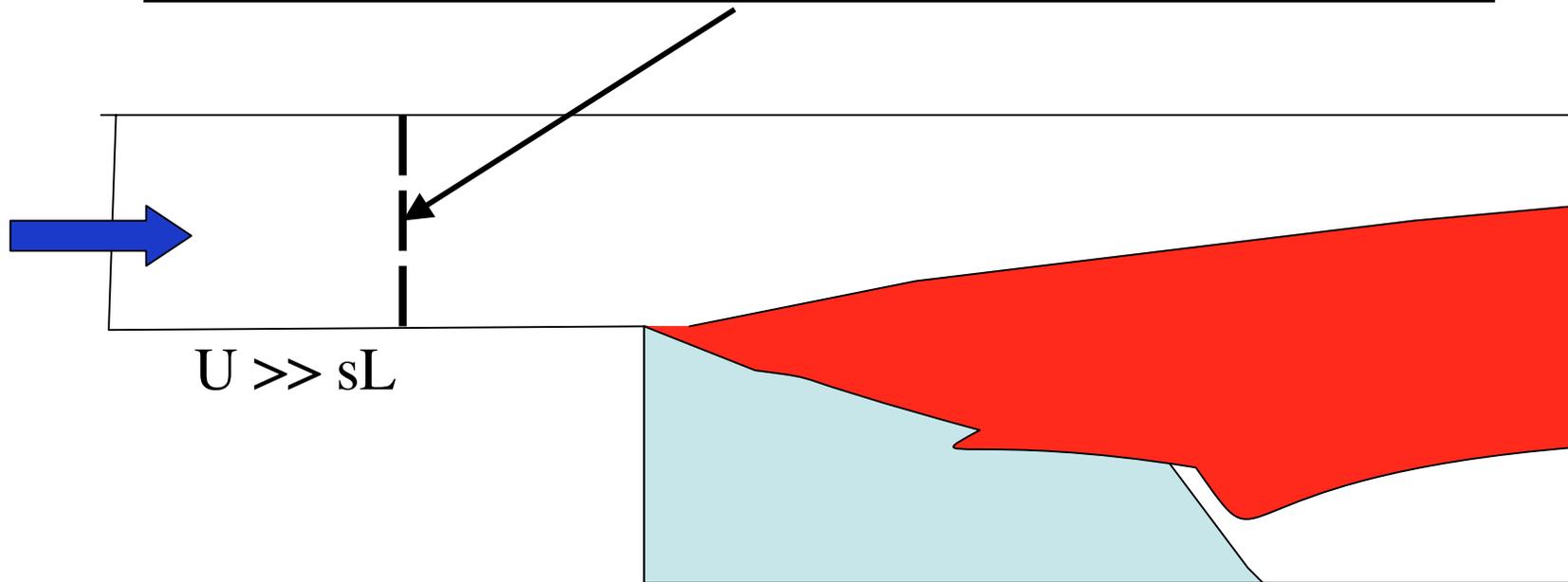
Application: ceci est connu depuis Davy (1817) qui a pris un brevet puis publié ses études sur ‘tube quenching’.

Application: comment arrêter une flamme ?

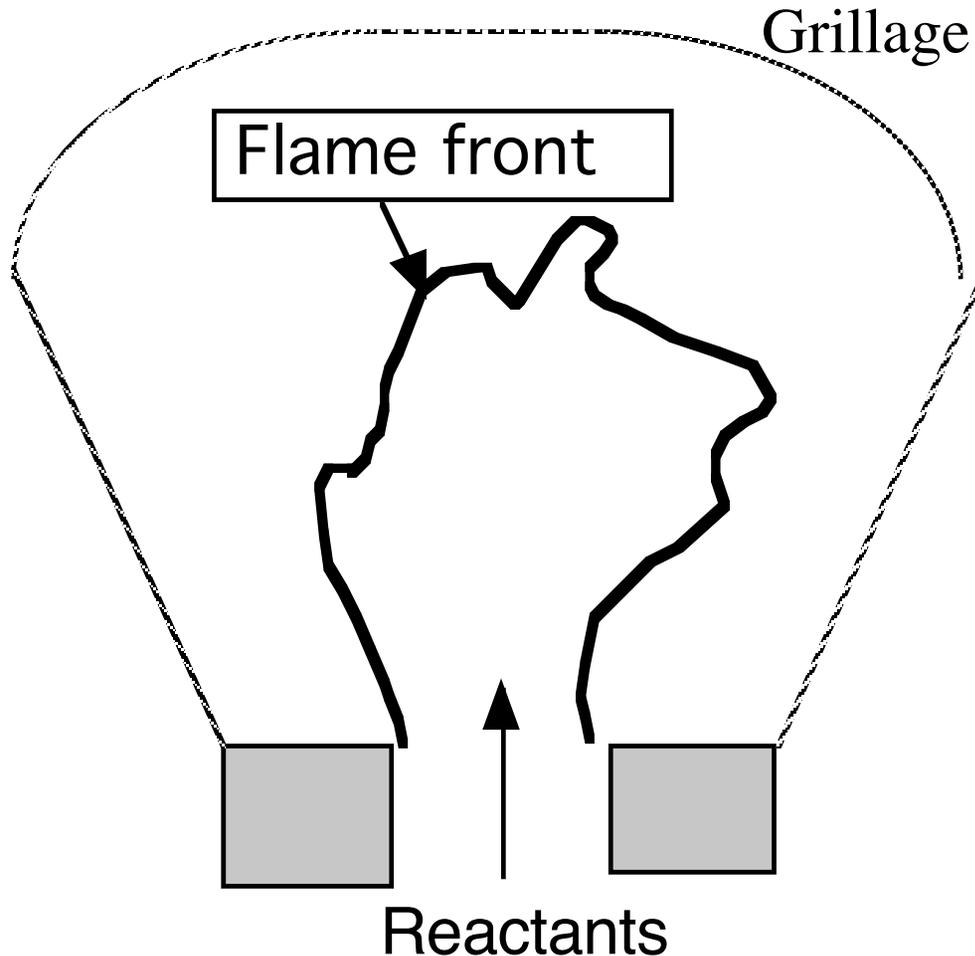


DISPOSITIF ANTI FLASH BACK

La flamme ne pourra pas remonter au delà de ce point



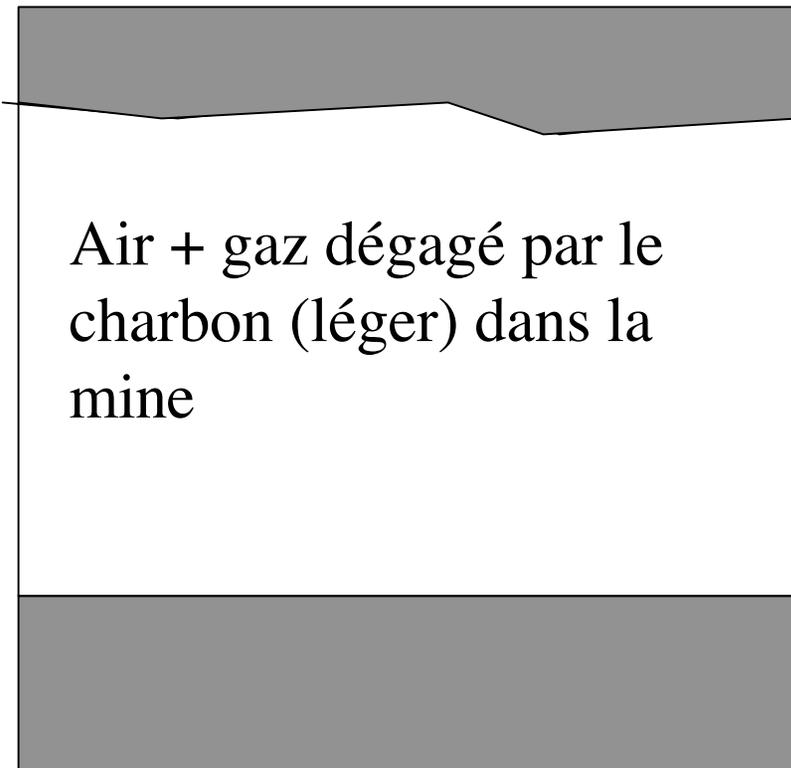
Autre application: la lampe de mine !



La lumière passe
Mais pas la flamme

==> une des inventions qui
ont permis la révolution
industrielle au 19ieme

Pour terminer: utilisation de toutes les notions de combustion de base dans un exemple:
le coup de grisou

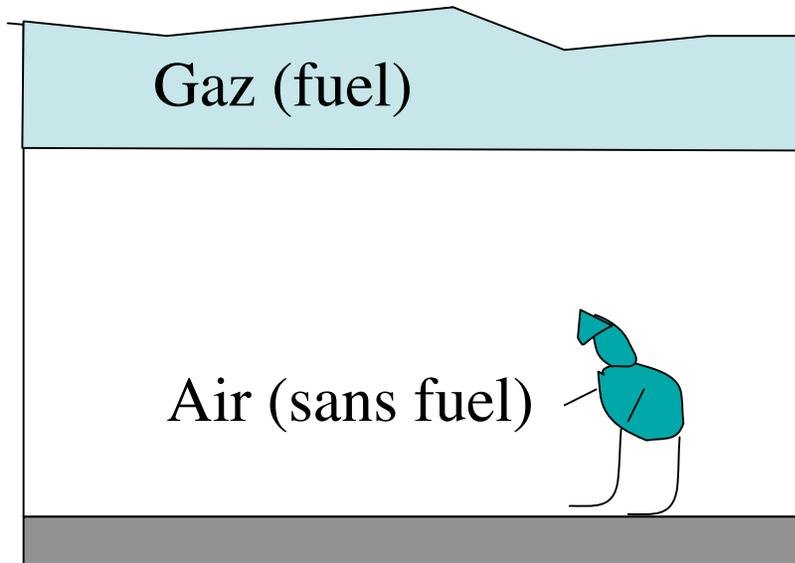


Comment évacuer le gaz ?

On ne savait pas le pomper, ni traiter l'air.

Les mineurs étaient tenus pour responsables ==> plus de salaire !

Solution un peu osée:
brûler le gaz !



Si le gaz est stratifié (cad collé en haut du canal), on est dans une configuration de type ‘flamme de diffusion’.

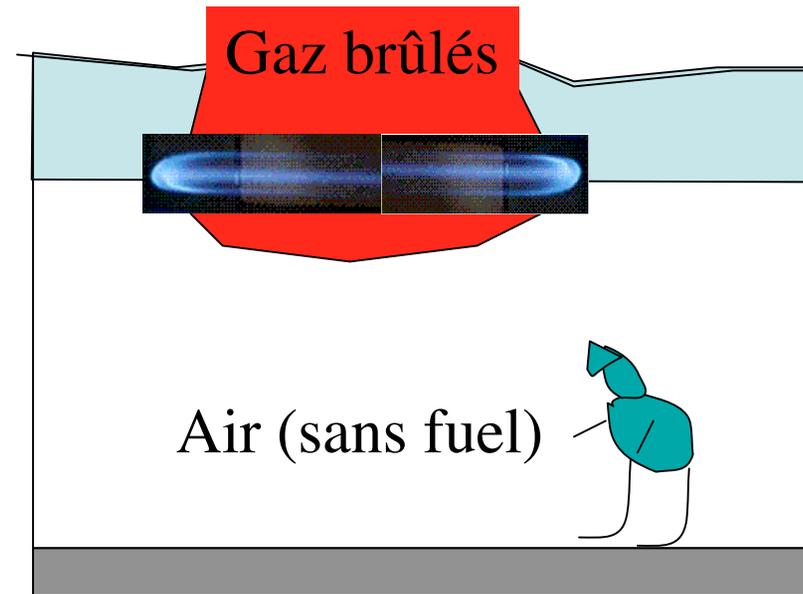
Si on l’allume, on va créer une flamme de diffusion qui va brûler tout le fuel. Il restera de l’air. Et c’est fini...

Comment allumer ?

- Prendre le plus jeune mineur
- Lui mettre une lampe de Davy
- Lui dire de ramper
- Puis d’ouvrir le grillage ... et de lever le bras

Là il y a deux solutions:

1/ Le gaz et l'air étaient vraiment bien séparés ==> on crée une flamme triple et elle se propage dans toutes les directions. C'est un processus assez calme... Le mousse est sauvé



2/ En sortant, les mineurs ont couru et mélangé un peu trop le gaz et l'air. Donc, tant que la lampe de Davy est fermée, il n'y a pas de danger. Quand on l'ouvre, boum...

