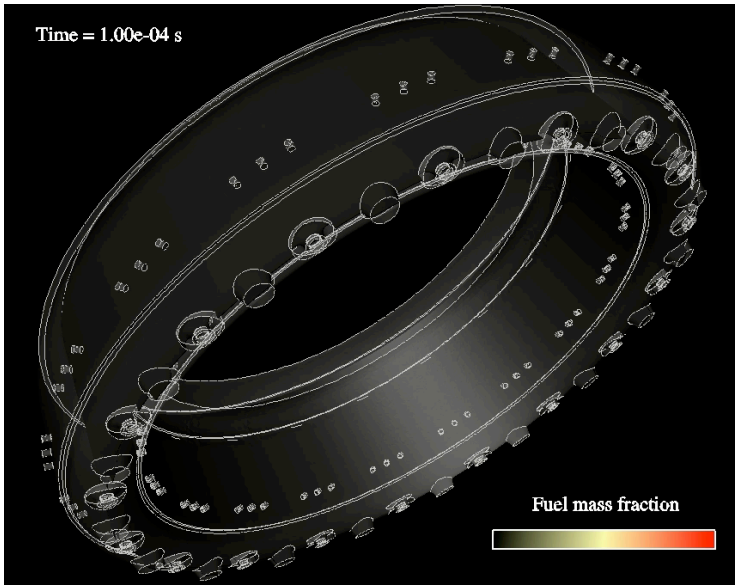
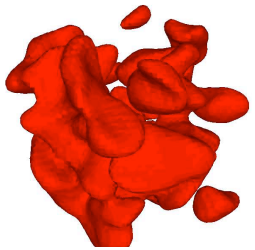
La combustion dans les systèmes de propulsion et de production d'énergie

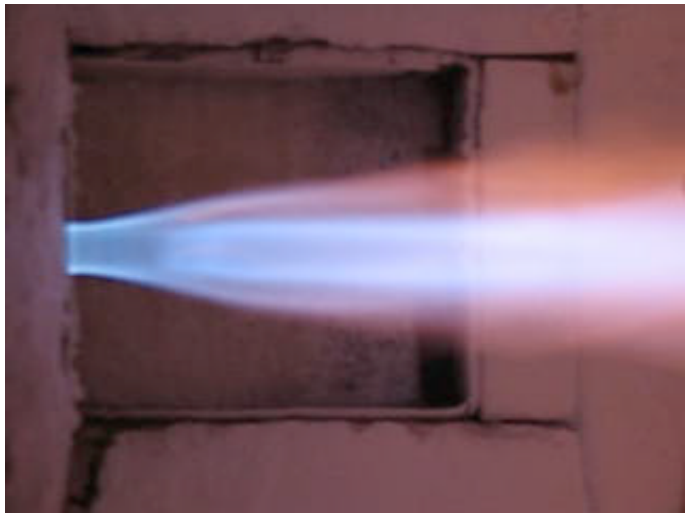
Luc Vervisch

Institut National des Sciences Appliquées de Rouen
Institut Universitaire de France
CORIA - CNRS

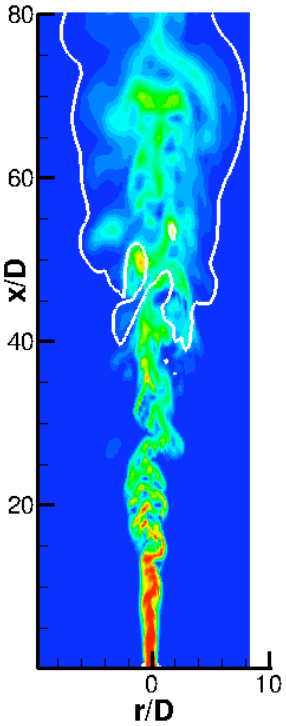


Simulation de l'allumage de la chambre de combustion d'un moteur d'hélicoptère
Turboméca - CERFACS





Combustion multi-fuel
CORIA - Air Liquide



CORIA

Complexe de Recherche Interprofessionnel
en Aérothermochimie
Laboratoire du CNRS (200 chercheurs)
www.coria.Fr

INSA

Ecole d'Ingénieurs Publique
(1500 étudiants)
www.insa-rouen.fr

L'homme 'fait du feu' depuis très longtemps, mais la 'science de la combustion' est contemporaine et interdisciplinaire (physique/chimie)

Défit : Passer de la maîtrise technologique à la maîtrise scientifique des systèmes utilisant la combustion

La combustion : c'est quoi ? est-ce important ?

- Les sociétés modernes sont organisées autour de la consommation d'énergie, tout ce qui nous entoure a nécessité une fabrication qui implique l'utilisation d'une certaine quantité d'énergie.
- Plus de 90% de l'énergie produite dans le monde résulte de la combustion (80% d'hydrocarbures fossiles).

Turbine à gaz : production d'électricité

Moteur automobile

Propulsion aéronautique

- Les sociétés modernes sont organisées autour de la consommation d'énergie, tout ce qui nous entoure a nécessité une fabrication qui implique l'utilisation d'une certaine quantité d'énergie.
- Plus de 90% de l'énergie produite dans le monde résulte de la combustion (80% d'hydrocarbures fossiles).

Four de verrier

Combustion industrielle : Production locale d'énergie ou traitement de gaz

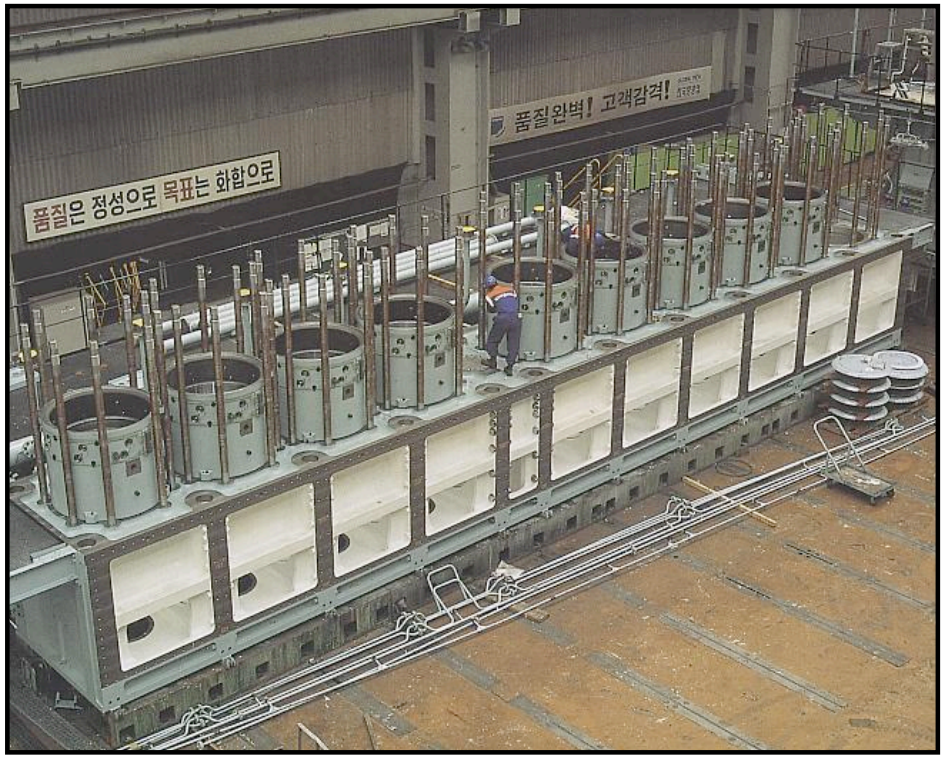
Moteur fusée

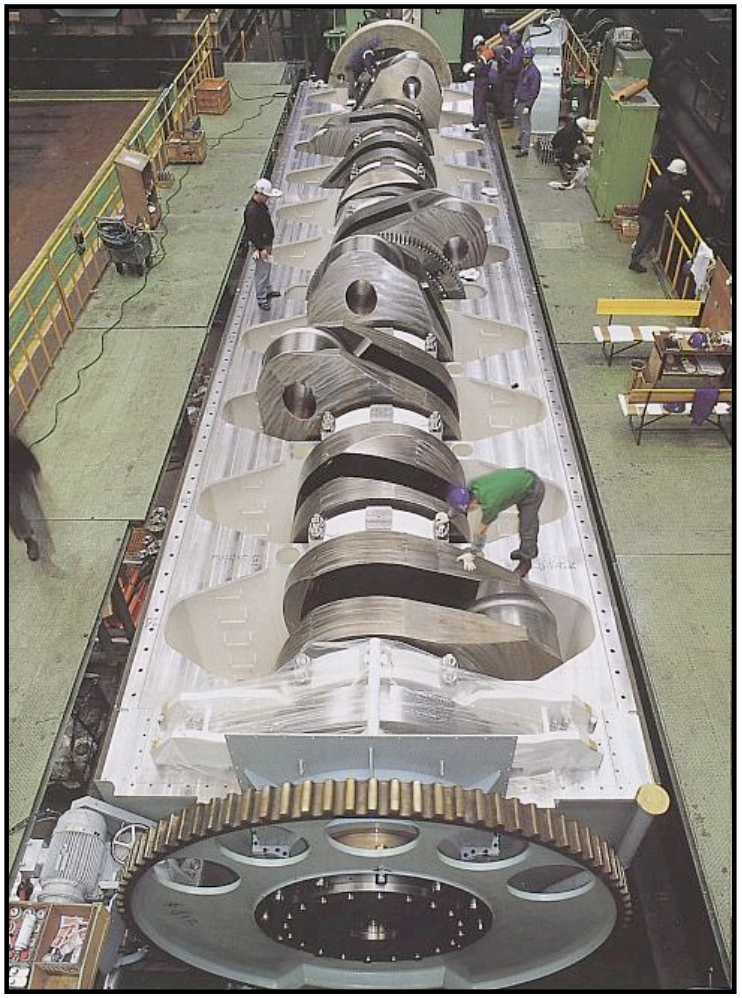
Combustion

Avec 5 litres d'essence il est possible de déplacer une tonne sur 100 Kilomètre

Stockage compact et pratique de l'énergie

Moteurs de bateaux :

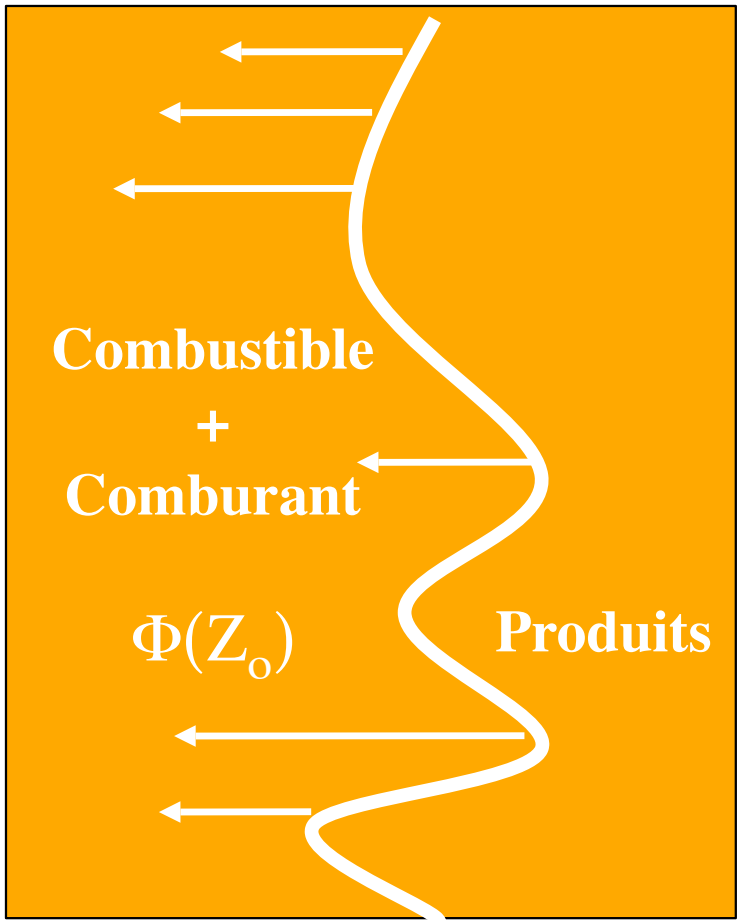




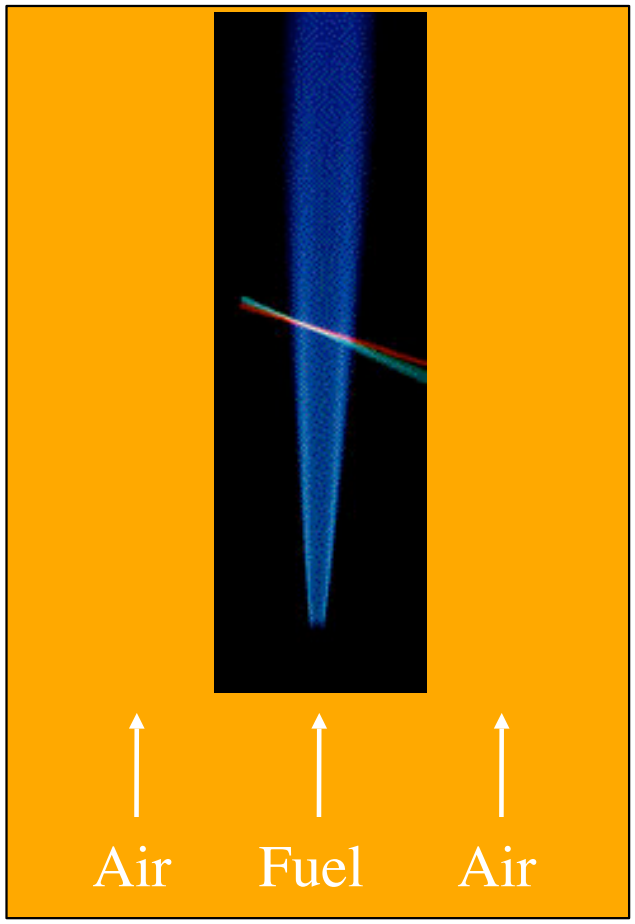
Sécurité :

Deux types de combustion :

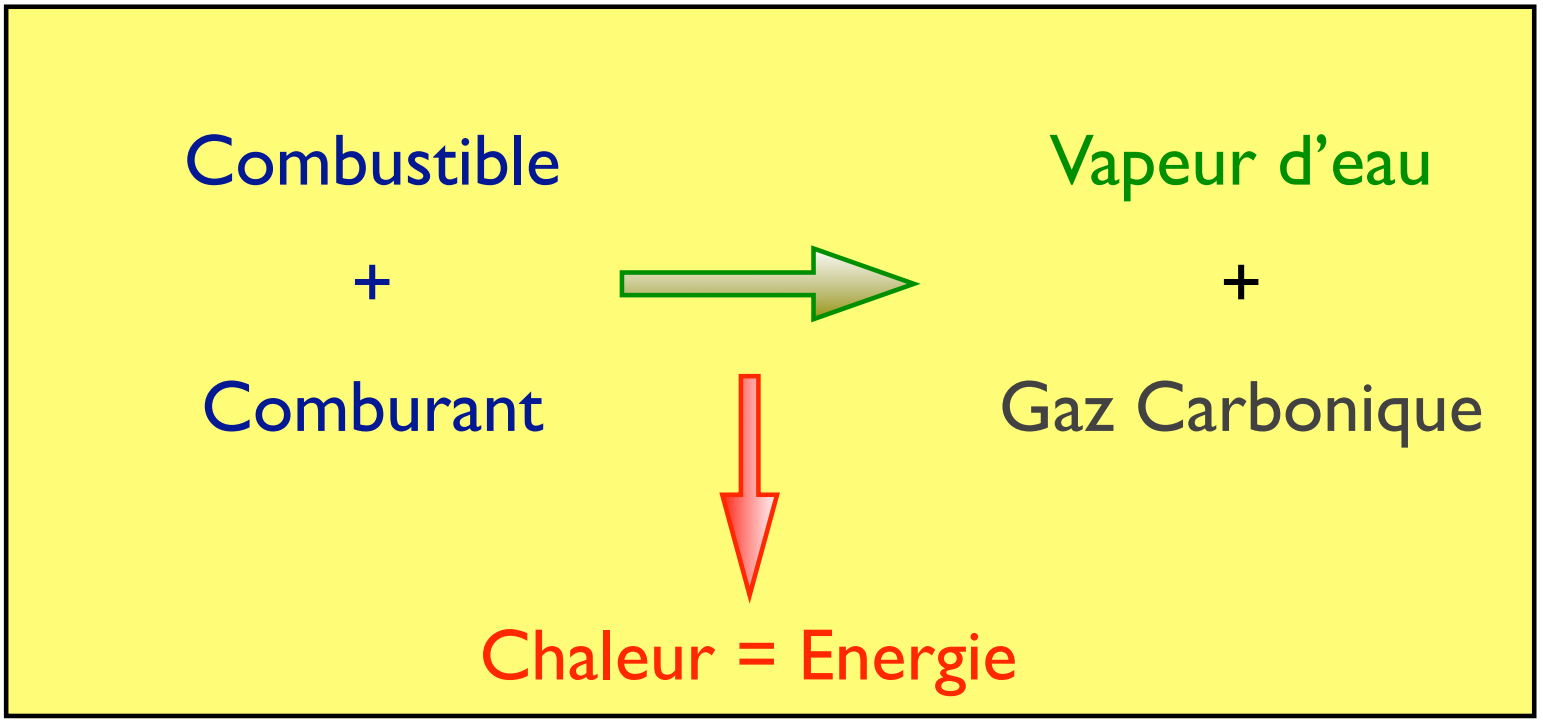
Prémélange



Diffusion

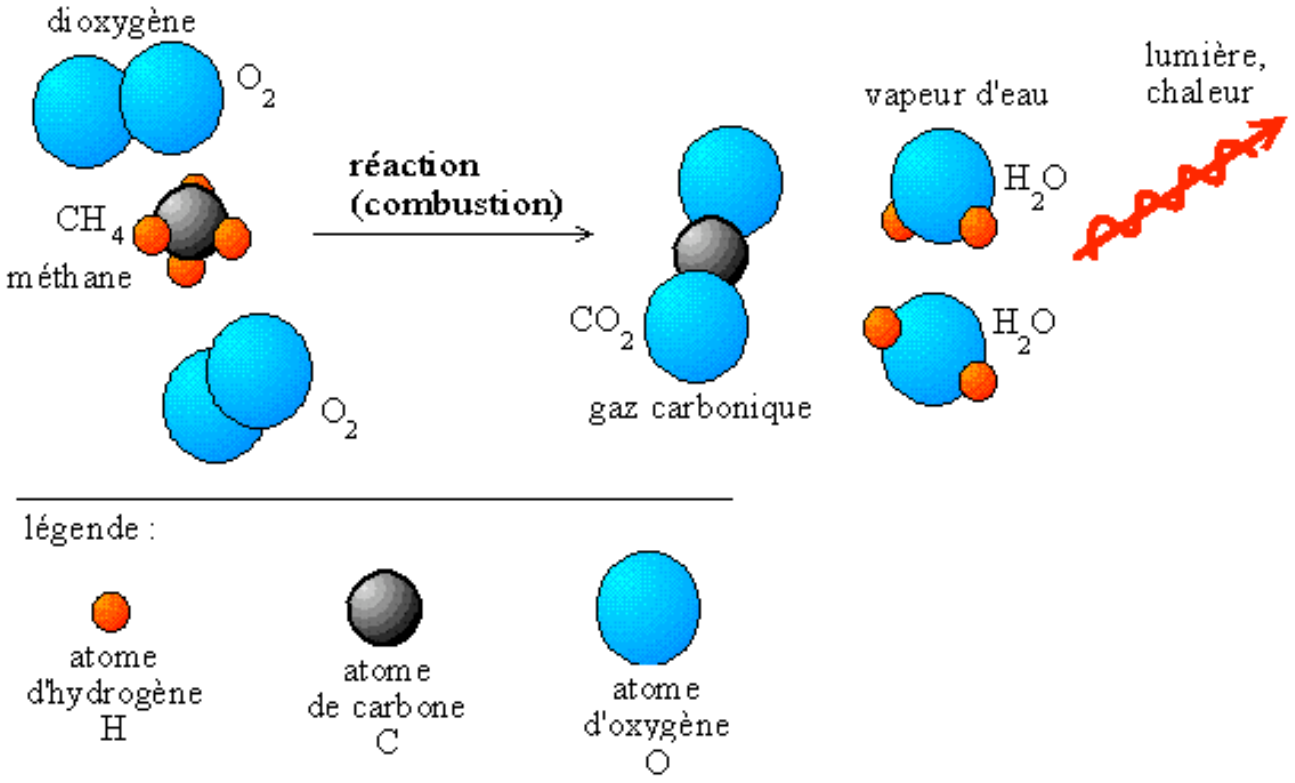


Combustion

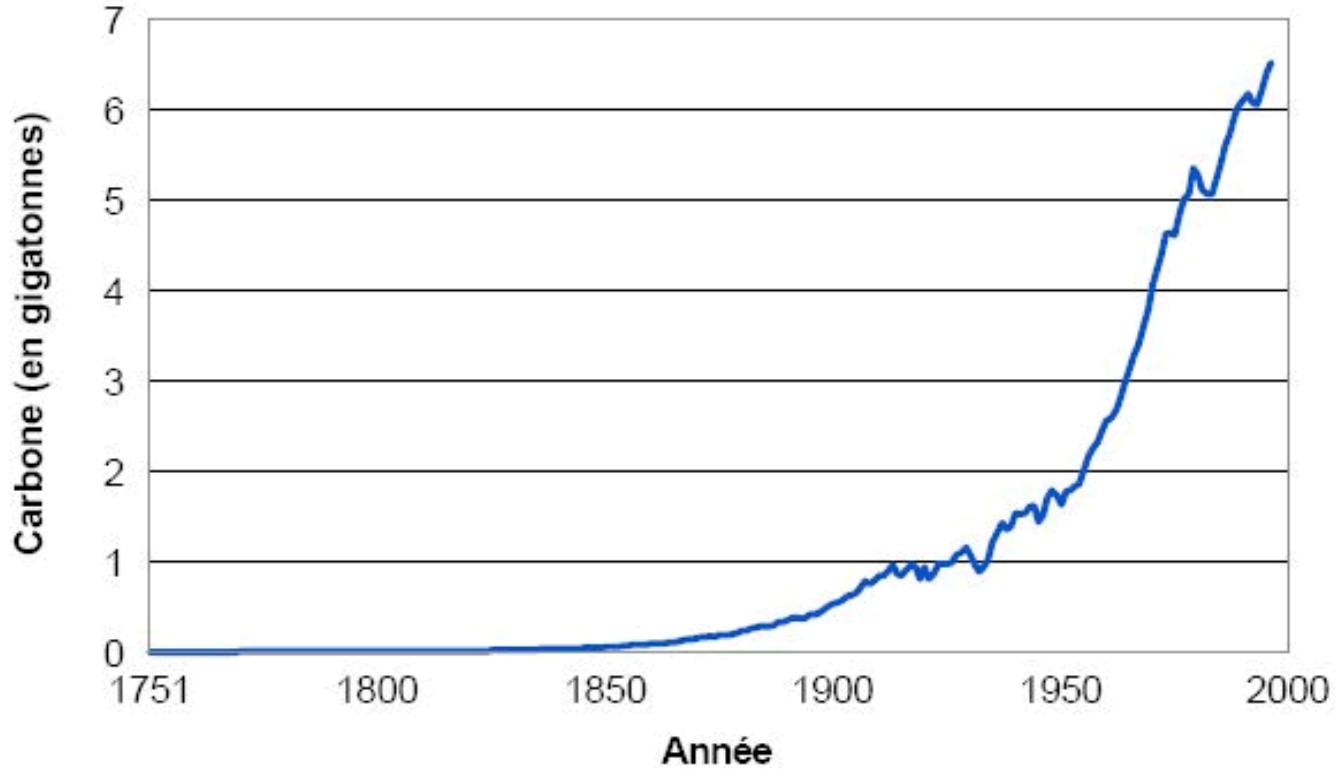


$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$$

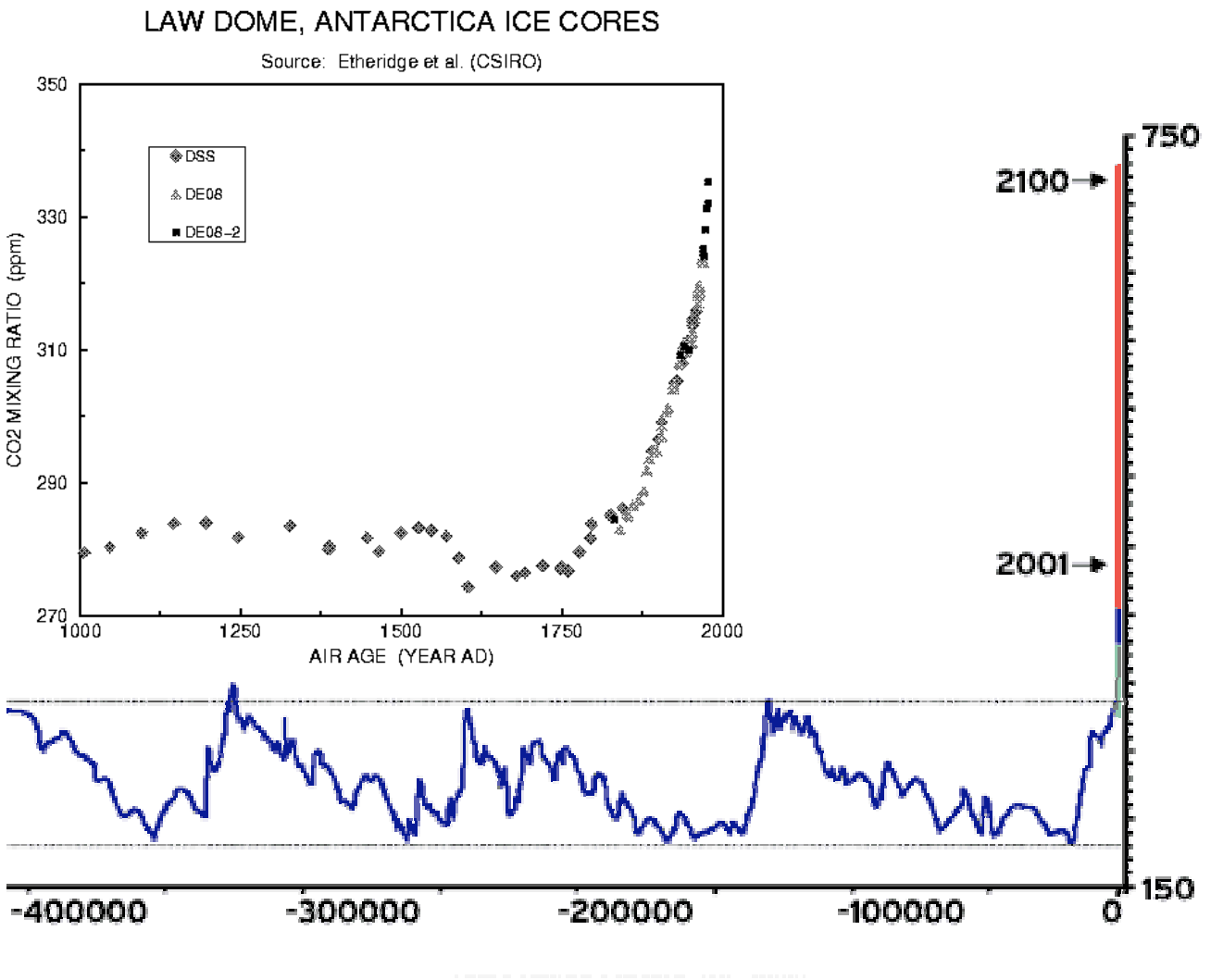
Combustion


dioxygène
O_2
CH_4
méthane
O_2
réaction
(combustion)
CO_2
gaz carbonique
vapeur d'eau
H_2O
H_2O
lumière,
chaleur
légende :
atome
d'hydrogène
H
atome
de carbone
C
atome
d'oxygène
O

Tendances mondiales des émissions de CO_2 attribuables aux combustibles fossiles

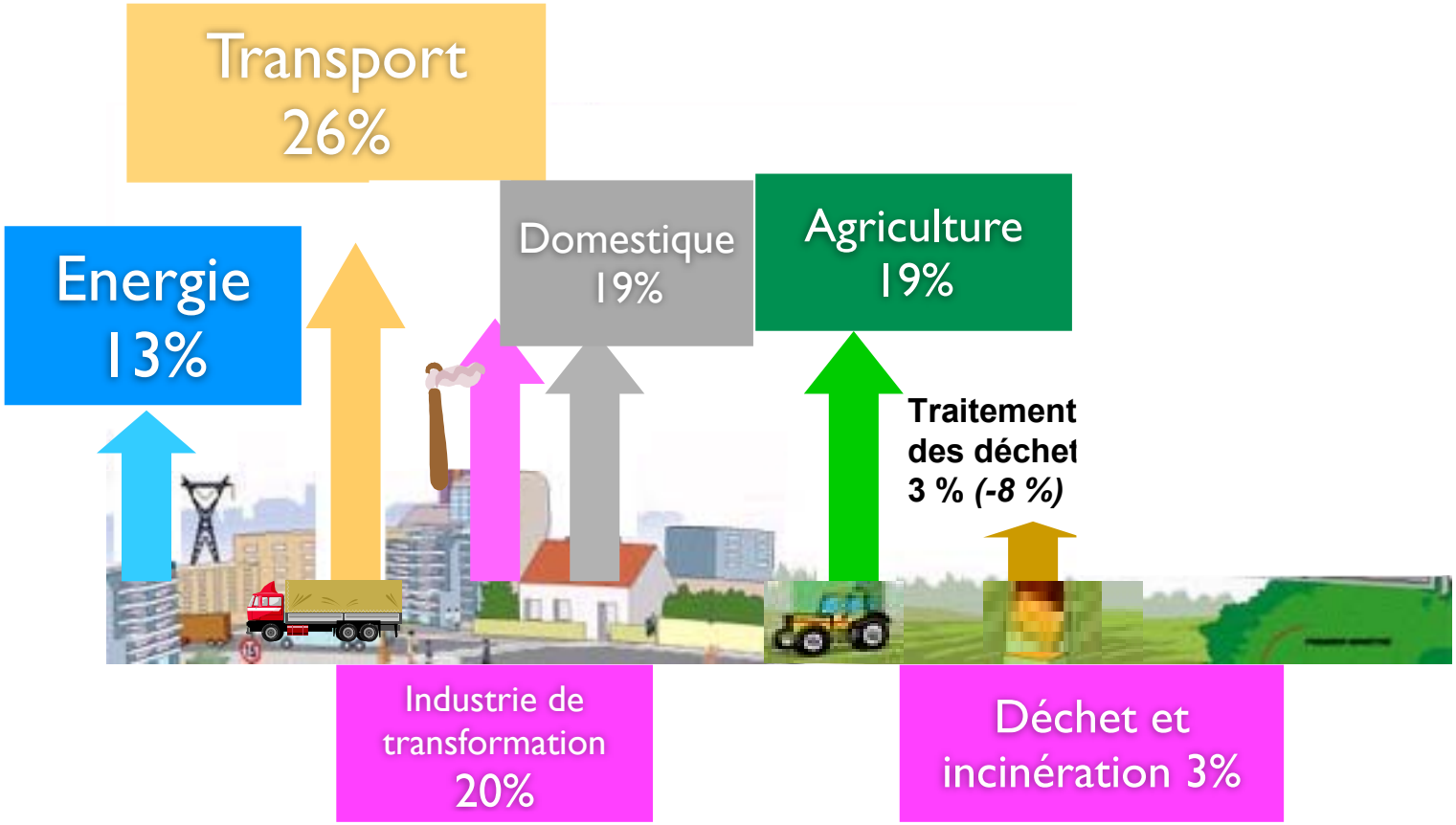


Source: Carbon Dioxide Information Analysis Center.


LAW DOME, ANTARCTICA ICE CORES
Source: Etheridge et al. (CSIRO)
DSS
DE08
DE08-2
CO2 MIXING RATIO (ppm)
350
330
310
290
270
1000
1250
1500
1750
2000
AIR AGE (YEAR AD)
750
2100
2001
150
-400000
-300000
-200000
-100000
0

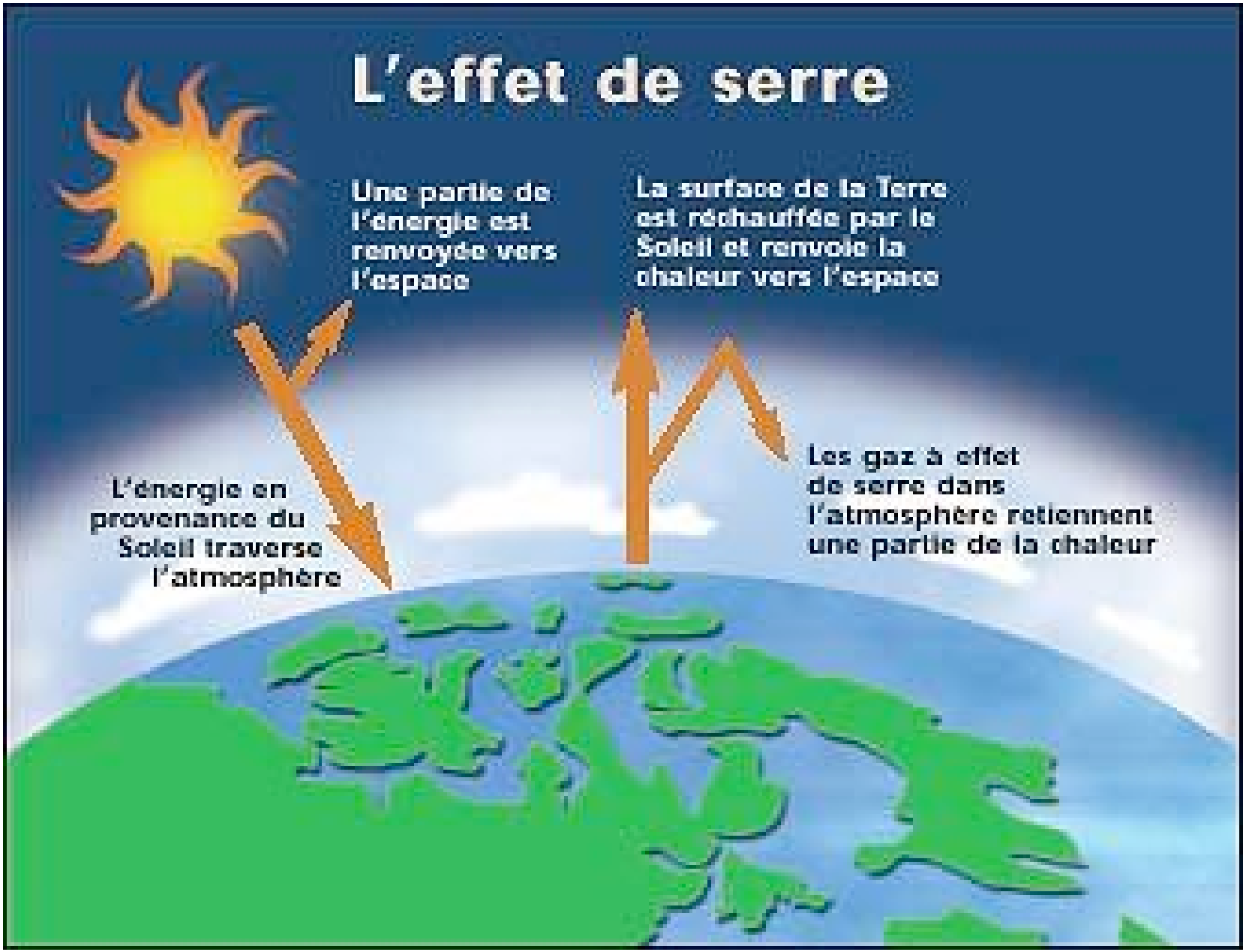
Production de CO2 :

Toute combustion produit du CO2, sauf celle de l'hydrogène, mais la production d'hydrogène produit aussi du CO2...



Effet de serre

- Tous les corps émettent des radiations (rayonnement électromagnétique).
- La longueur d'onde de ce rayonnement dépend de la température du corps qui l'a émis.
- L'atmosphère est transparente pour le rayonnement à la température du soleil.
- Le soleil réchauffe la terre, qui rayonne ensuite à sa température (plus petite que celle du soleil).
- Le rayonnement émis par la terre est absorbé par les gaz à effet de serre (l'atmosphère n'est pas transparente pour la longueur d'onde du rayonnement terrestre, elle se réchauffe...).

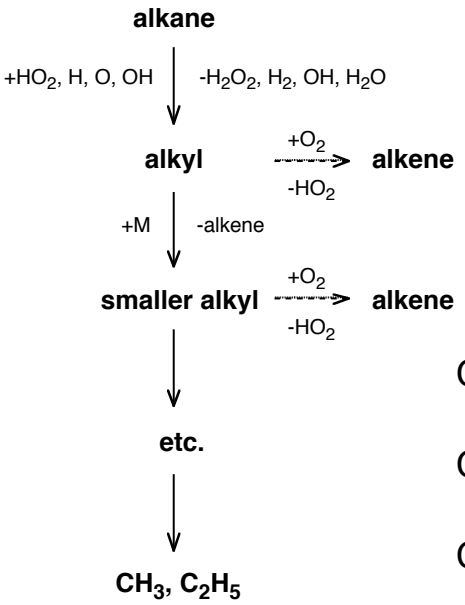

L'effet de serre
Une partie de l'énergie est renvoyée vers l'espace
La surface de la Terre est réchauffée par le Soleil et renvoie la chaleur vers l'espace
L'énergie en provenance du Soleil traverse l'atmosphère
Les gaz à effet de serre dans l'atmosphère retiennent une partie de la chaleur

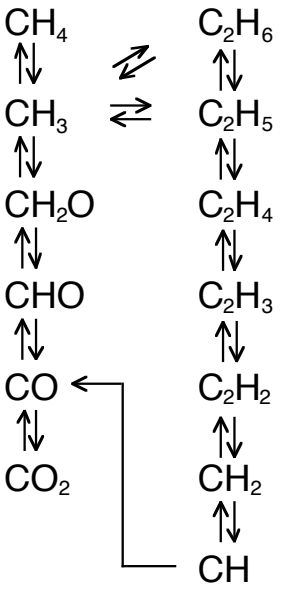
ENERGIE

COMBUSTION

Production de CO2

Combustible
+ Oxydant
CxHy + O2 + N2



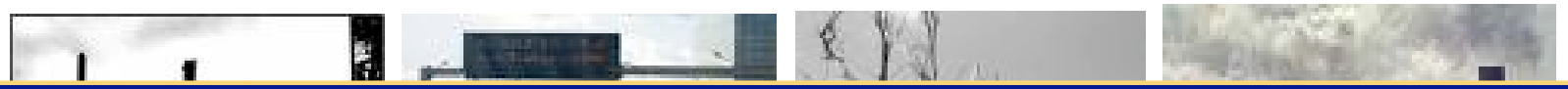


H2O + CO2 +
Chaleur

- La transformation complète d'un hydrocarbure en H2O et CO2 n'est pas instantannée

- Dans beaucoup de systèmes, les réactions chimiques n'ont pas le temps de se terminer.

- Des espèces intermédiaires et des polluants sont rejetés dans l'atmosphère.



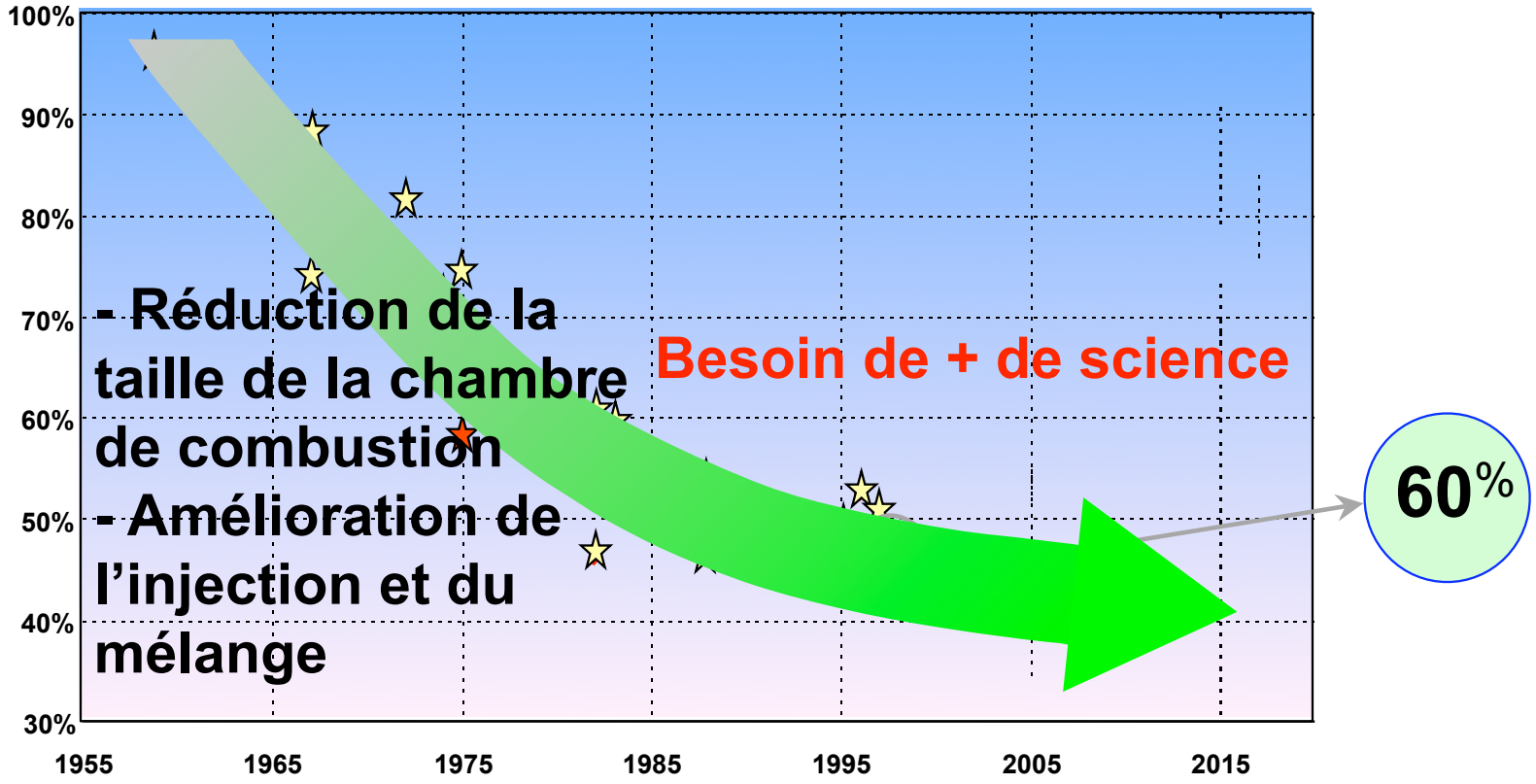
Il faut agir rapidement :

- Améliorer l'efficacité des systèmes de combustion :
  - ✳ Réduire les émissions de CO2
  - ✳ Aller vers la 'combustion durable'

- Améliorer les systèmes de combustion et diminuer la pollution :
  - ✳ Essentiel pour notre santé !

La situation n’est pas désespérée !

Consommation des avions de ligne depuis 1955



Comprendre les flammes par la « théorie » ou comment transformer deux obstacles en outil d'analyse :

- **La chimie est fortement non-linéaire (lois exponentielles) :**

Nylon

⇩

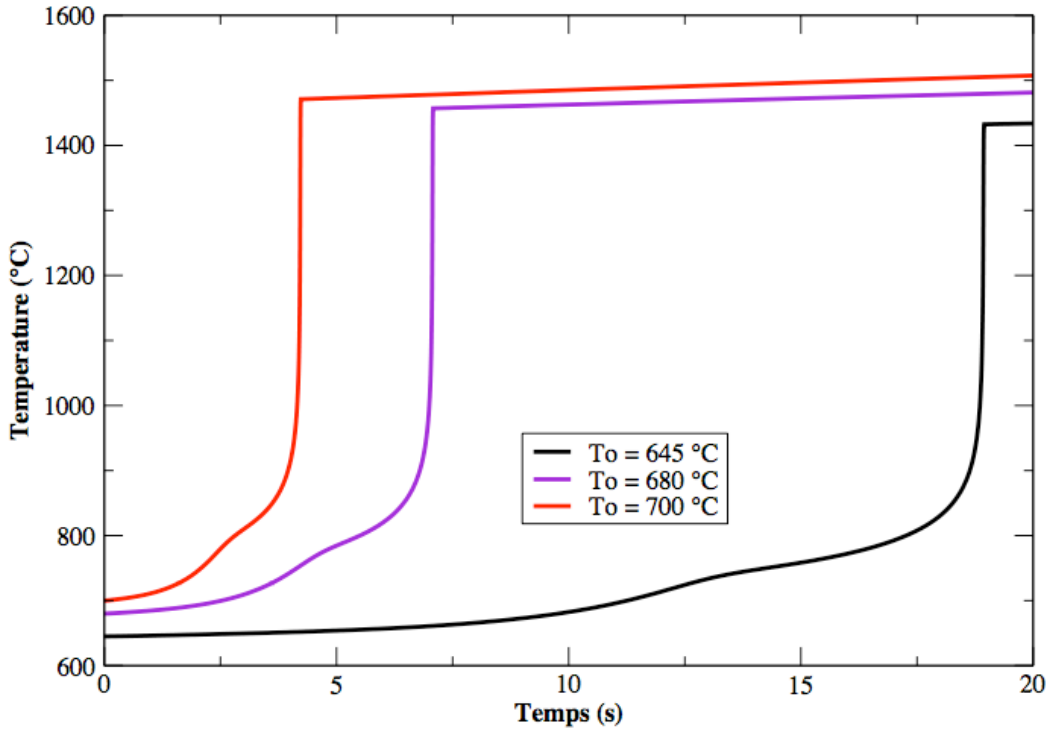
Acide adipique

⇩

N2O

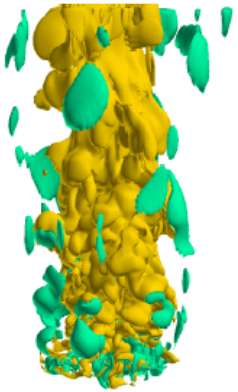
⇩

Combustion du N2O



Comprendre les flammes par la « théorie » ou comment transformer deux obstacles en outil d'analyse :

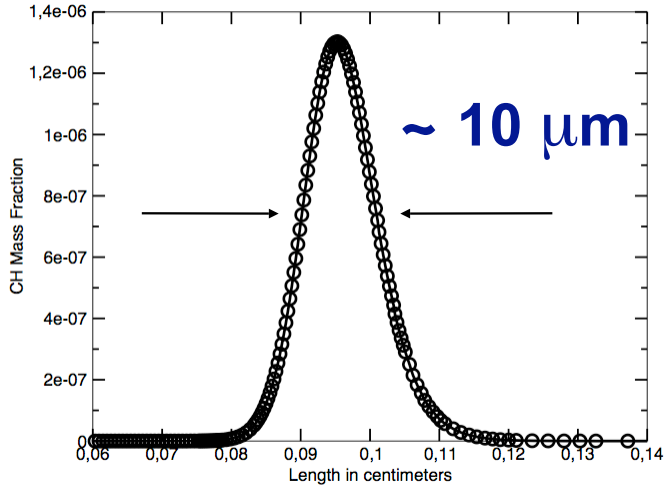
- **Les zones réactionnelles sont très très minces :**



$$h \approx 5.10^{-6}\mathrm{m}$$

$$\Delta t \approx 1.10^{-6}\mathrm{s}$$

Radical CH

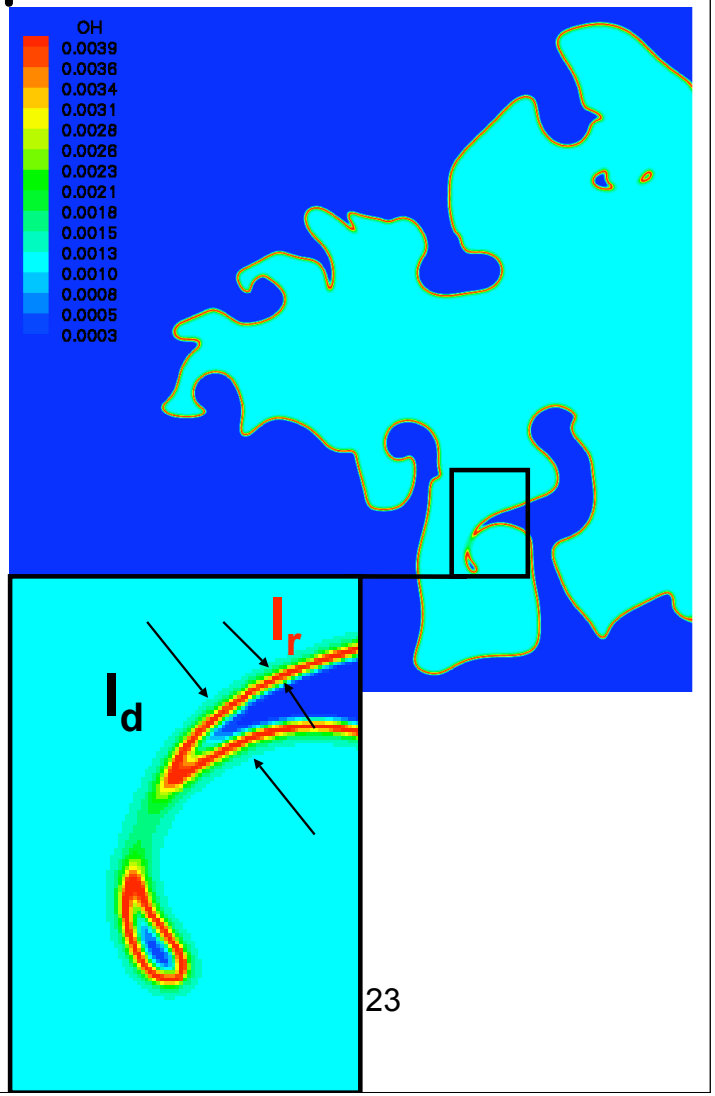


Nombre de points nécessaires à la description d'un 1 cm³ de flamme :

$$10^8 < N < 10^{12}$$

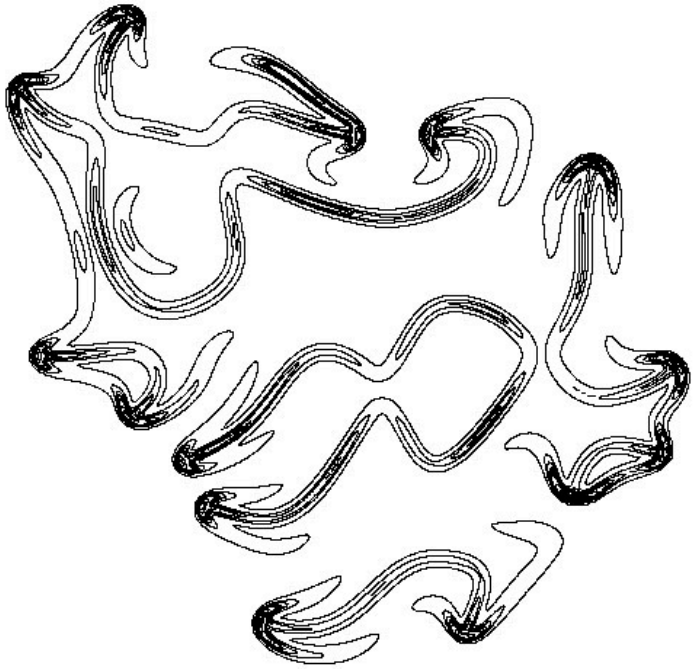
Définir des petits paramètres construits autour du fait que les flammes sont minces pour faire des développements asymptotiques des exponentielles.

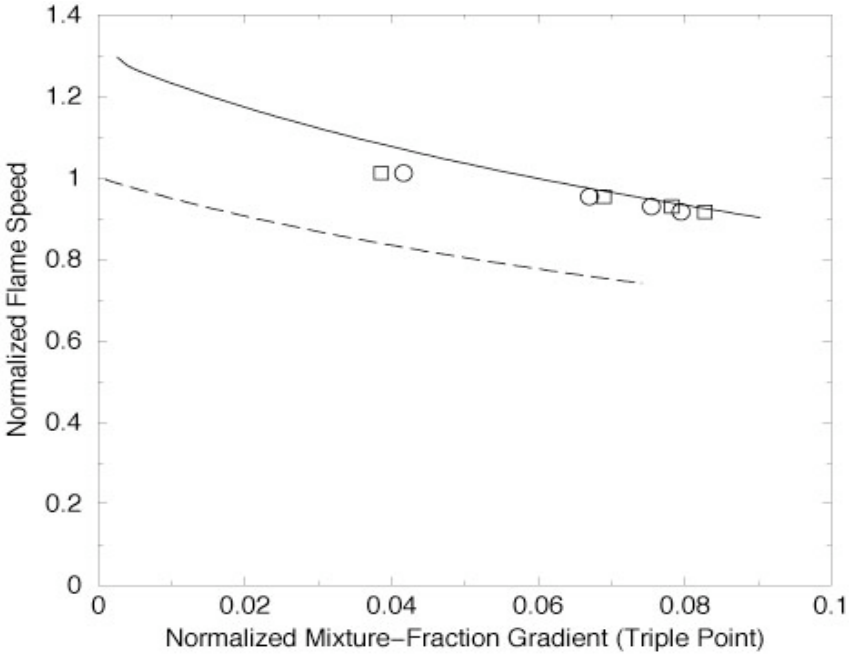
$$\beta \approx \frac{1}{\varepsilon} = \left(\frac{l_d}{l_r}\right) = Da^{1/(\nu_F + \nu_o + 1)}$$



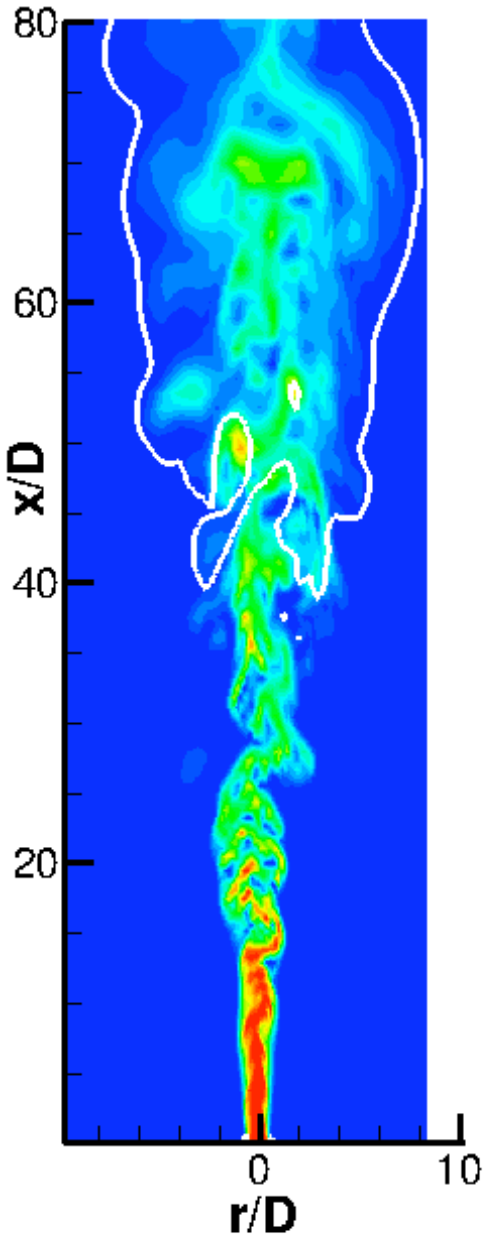
Réduire la non-linéarité et dériver des lois de comportement pour des flammes prototypes.

Loi de comportement pour les « flammes chimères »





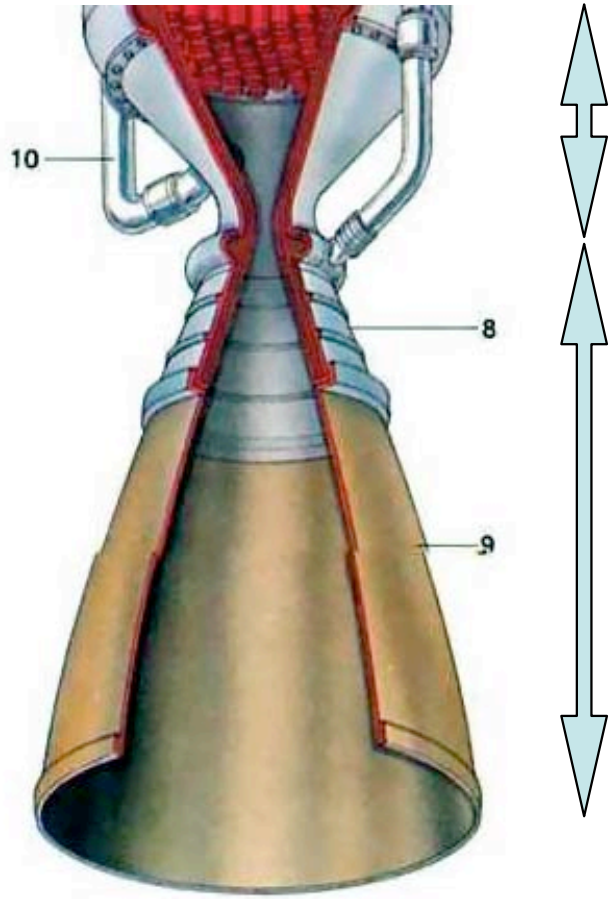
$$U_{TF} = S_l\left(1+\alpha\right) - \frac{\beta}{Z_s\left(1+\alpha\right)\sqrt{4\nu_F - 2}}\sqrt{\frac{\lambda}{\rho C_p}\chi_Z}$$



Optimisation et Simulation numérique

- Décrire la combustion à partir d'un système d'équations (modèle physique).
- Résoudre ces équations sur un maillage de l'espace le plus fin possible.
- Des ordinateurs parallèles sont utilisés (beaucoup de processeurs en même temps, plusieurs milliers).

Propulsion spatiale

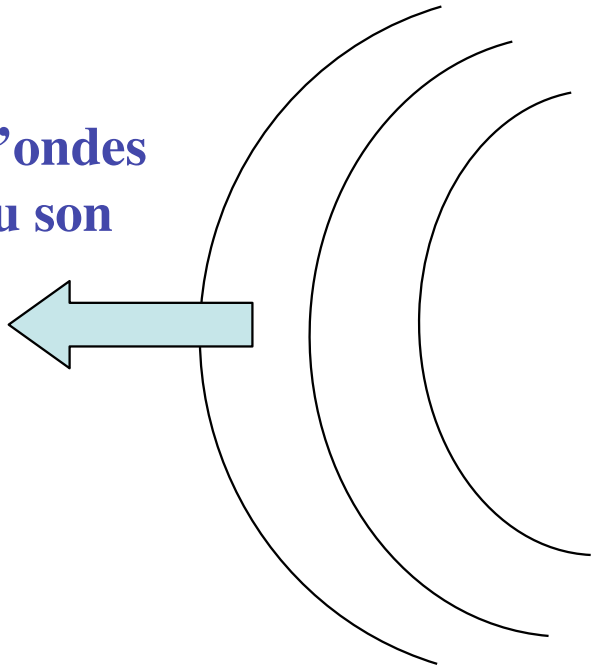


Combustion à très haute pression (110 bars)

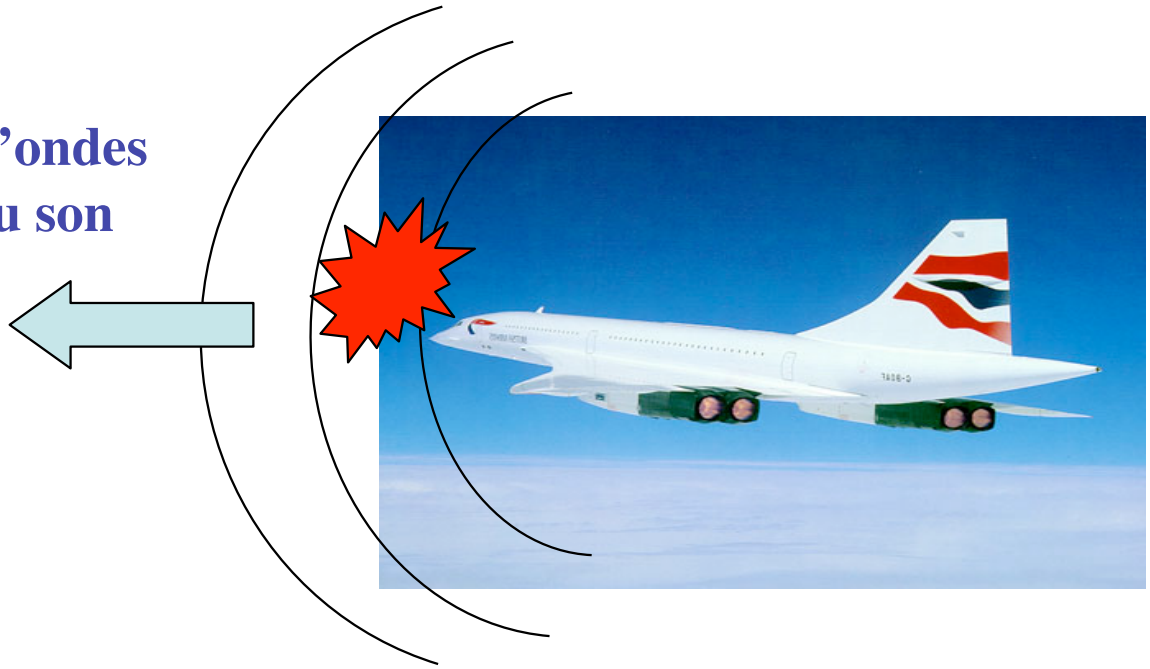
Accélération des gaz à des vitesses très élevées

Vitesse du son et écoulements

Propagation d'ondes à la vitesse du son



Vitesse du son et écoulements

Passage du mur du son u = c

Propagation d'ondes à la vitesse du son