

Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

Concours externe spécial de l'agrégation de
physique-chimie option physique

Julie Ben Zenou

4 Mai 2026

Mon parcours



Bac S/Sl, Lycée Fermat, Toulouse
2012-2015



CPGE PCSI/PC* Louis Le Grand, Paris
2015-2017



CentraleSupélec

CentraleSupélec, Mention Aéronautique,
Espace, Transport. Major de Promotion.
2017-2021



LABORATOIRE
EM2C

Thèse Laboratoire EM2C, CentraleSupélec,
sur l'effet du rayonnement dans les flammes
hydrogène diluées
2021-2025



Préparation à l'agrégation, centre
universitaire de Montrouge.
2025-2026

Tutorat en lycées avec OSER (Ouverture
Sociale pour l'Égalité et la Réussite).
2017-2019



Chargée de TDs à CentraleSupélec.
Mécanique des Fluides, Thermique,
Turbulence → 106h
2021-2024



CentraleSupélec

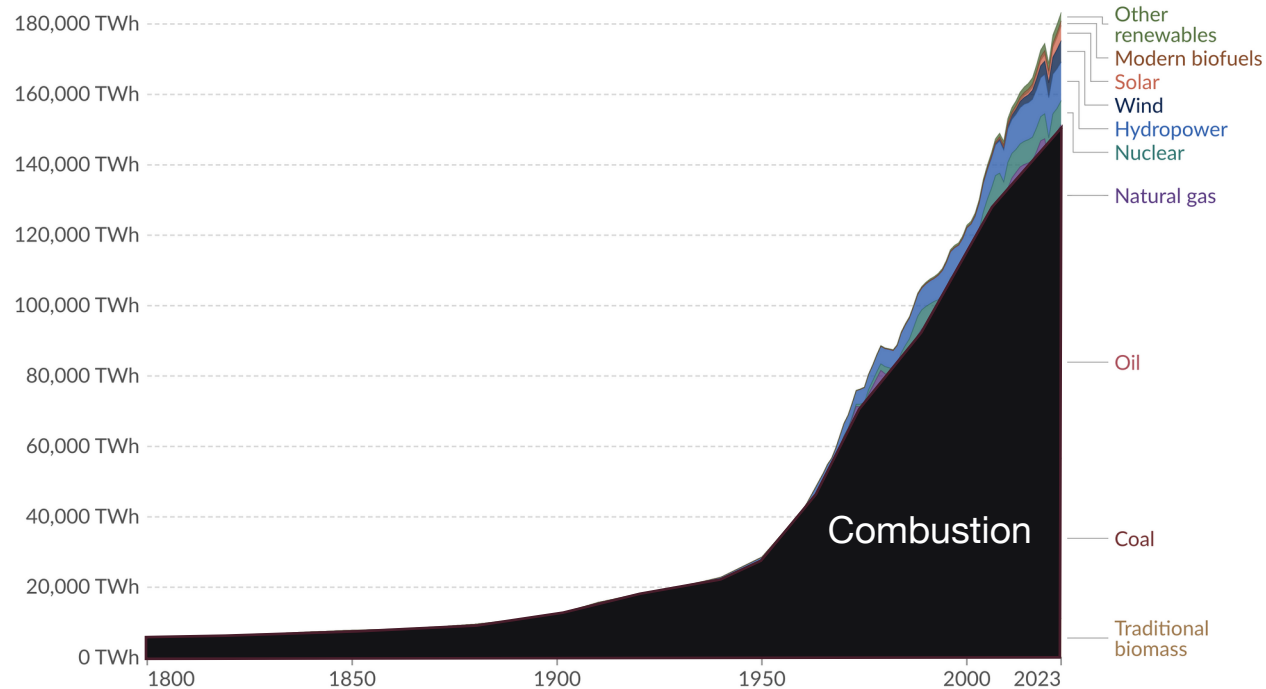
Animation de stands à la Fête de
la Science
Oct. 2023



Mes travaux de recherche

*Effets du rayonnement thermique des flammes
H₂-Air-H₂O diluées*

La combustion dans la transition énergétique



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024); Smil (2017)

Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

OurWorldInData.org/energy | CC BY

Aujourd'hui

~80 %

de la consommation primaire mondiale assurée par la combustion

En 2050 (Scénarios NZE)

20-50 %

La combustion reste dans le mix



Source thermique directe

Secteurs difficiles à électrifier : sidérurgie, ciment, aéronautique...



Vecteur de stockage d'énergie

Stocker l'énergie renouvelable sous forme de combustible.

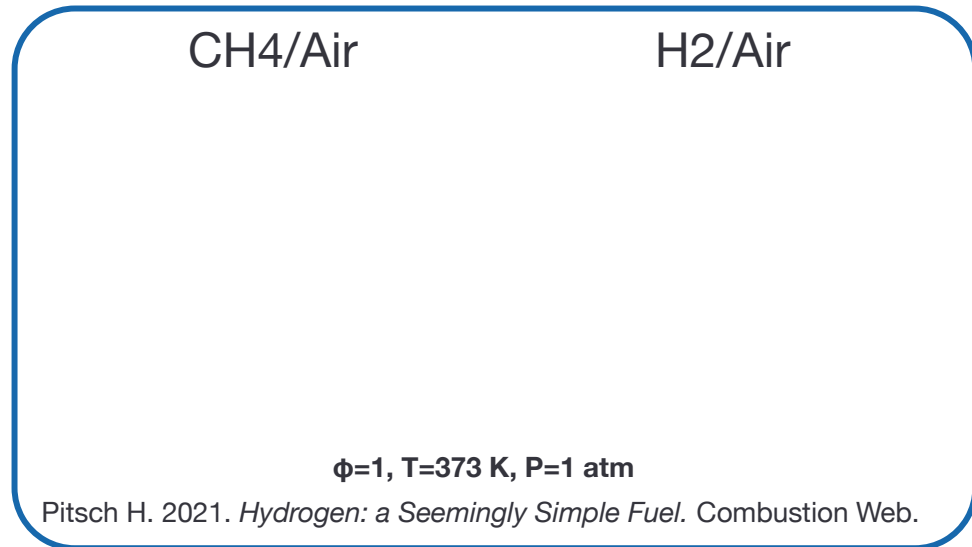
Enjeu : décarboner la combustion — le (di)hydrogène est la piste principale

L'hydrogène : Un combustible très réactif

Un combustible prometteur

- Zéro émission de CO₂
- Densité énergétique massique x3 vs essence

...mais très réactif



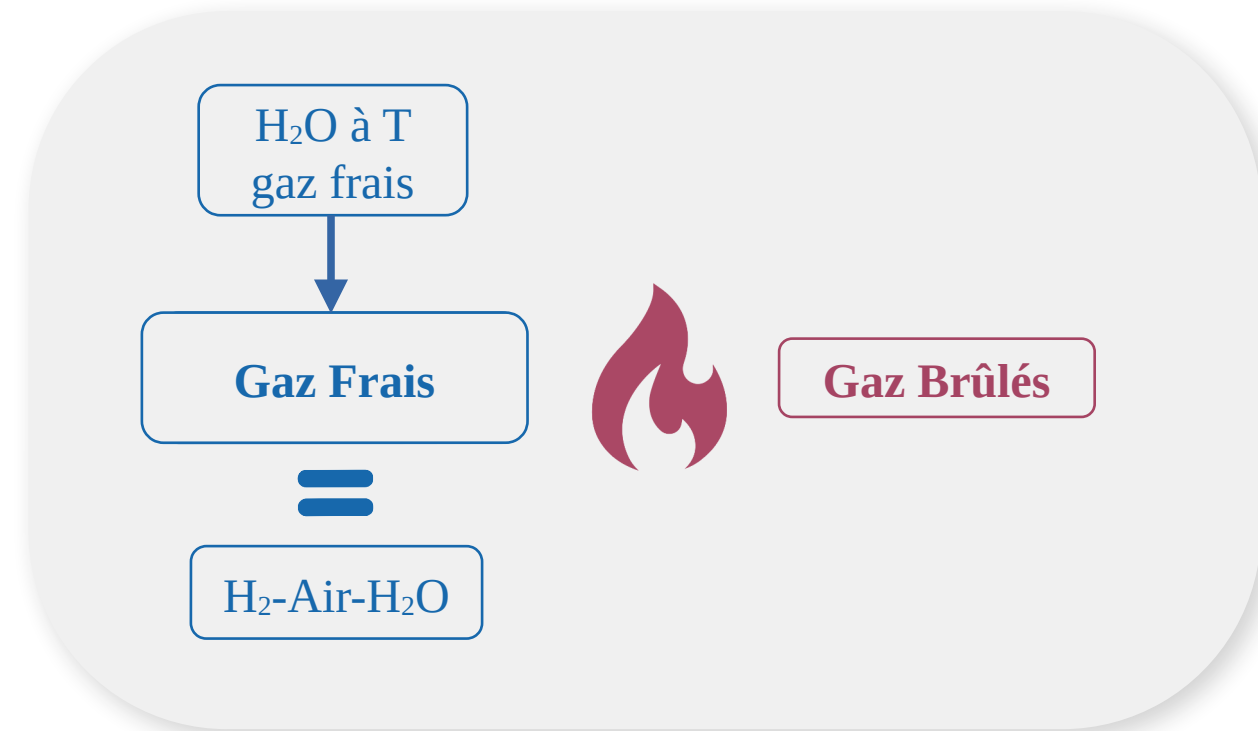
Sécurité et stabilité

Flammes rapides
Large plage
d'inflammabilité

Oxydes d'azote (NO_x)

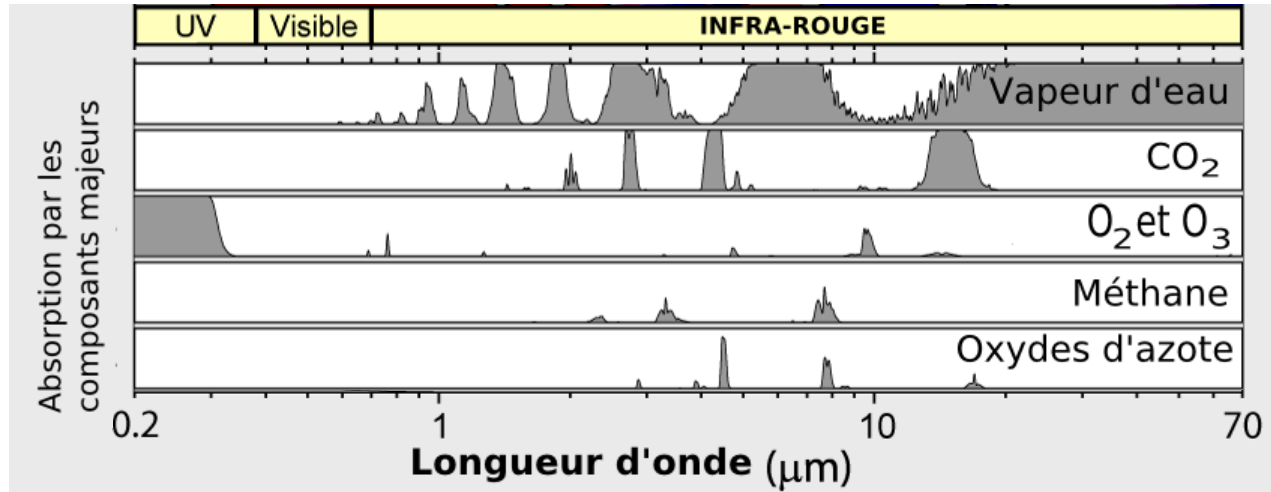
Polluants nocifs (santé, pluies
acides...)
Formés à haute température

Dilution pour « calmer » la flamme



- Ralentit la flamme
- Réduit les émissions de NO_x

H₂O, une espèce radiativement participative



N₂, H₂, O₂ transparents dans l'infrarouge

≠

H₂O absorbe et émet rayonnement thermique



Dans les flammes diluées, espèce radiativement active dans les gaz frais !

Dans les flammes diluées, le rayonnement thermique modifie-t-il la structure et la vitesse de flamme ?

→ Nécessité schéma numérique pour simulations couplées

Outil numérique : couplage de deux codes

Configuration : flamme plane laminaire 1D

Conservation masse, espèces, énergie
→ structure et vitesse de flamme

Vitesse de flamme laminaire S_ℓ

Vitesse du front dans des gaz frais au repos
(vitesse de consommation).

Combustion

- Mesure la réactivité (stabilité) d'un mélange
- Dépend des conditions
- Unique vitesse d'injection qui donne une solution stationnaire.

y_k, T, p

Puissance radiative P_R

Front de Flamme

Gaz frais

Gaz Brûlés

x

Fraction
massique $\frac{m_k}{m}$

Rayonnement
thermique

Équation de transfert radiatif (ETR). H₂O
millions de raies → modèle de bandes

Couplage itératif coûteux → peu étudié avant

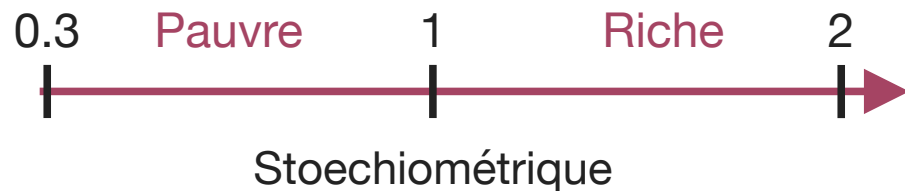
Richesse et taux de dilution

Plusieurs paramètres décrivent le mélange de gaz frais
Température (T), Pression (p), Richesse (ϕ) et Taux de Dilution ($y(\text{H}_2\text{O})$)

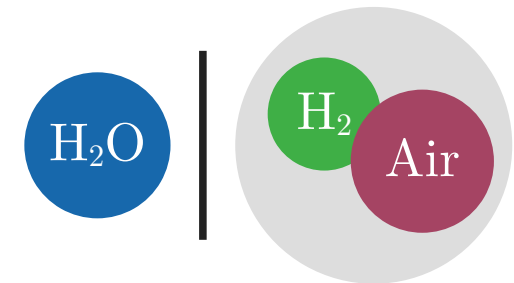
Richesse, ϕ



$$\phi = \frac{(m_{\text{H}_2}/m_{\text{air}})_{\text{réel}}}{(m_{\text{H}_2}/m_{\text{air}})_{\text{stoechio}}}$$



Taux de dilution, $y(\text{H}_2\text{O})$

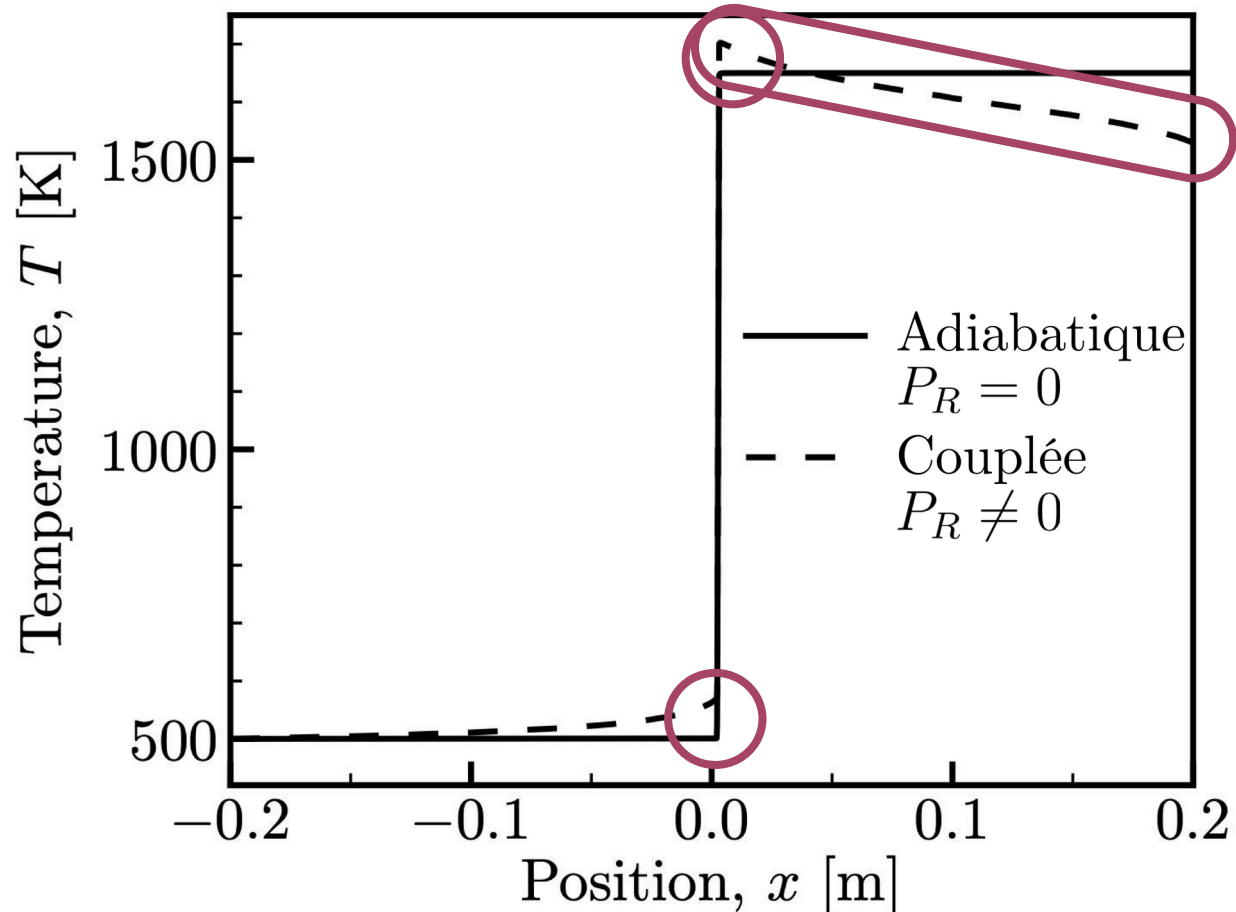


$$\begin{aligned} y_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{gaz frais}}} \\ &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{air}} + m_{\text{H}_2}} \end{aligned}$$



Profils de température : le préchauffage radiatif

Mélange H₂-Air-H₂O, T = 500K, P = 5 atm, $\phi = 0.8$, $y(\text{H}_2\text{O}) = 0.3$



ϕ , Richesse



$y(\text{H}_2\text{O})$, Dilution



Adiabatique = Pas de puissance radiative

Les gaz brûlés **chauds** émettent du rayonnement thermique → T **décroit**

Les gaz frais **dilués** absorbent du rayonnement → T **augmente** : **Préchauffage**

→ Température maximale > température adiabatique de flamme

Transfert d'énergie des gaz brûlés vers les gaz frais.

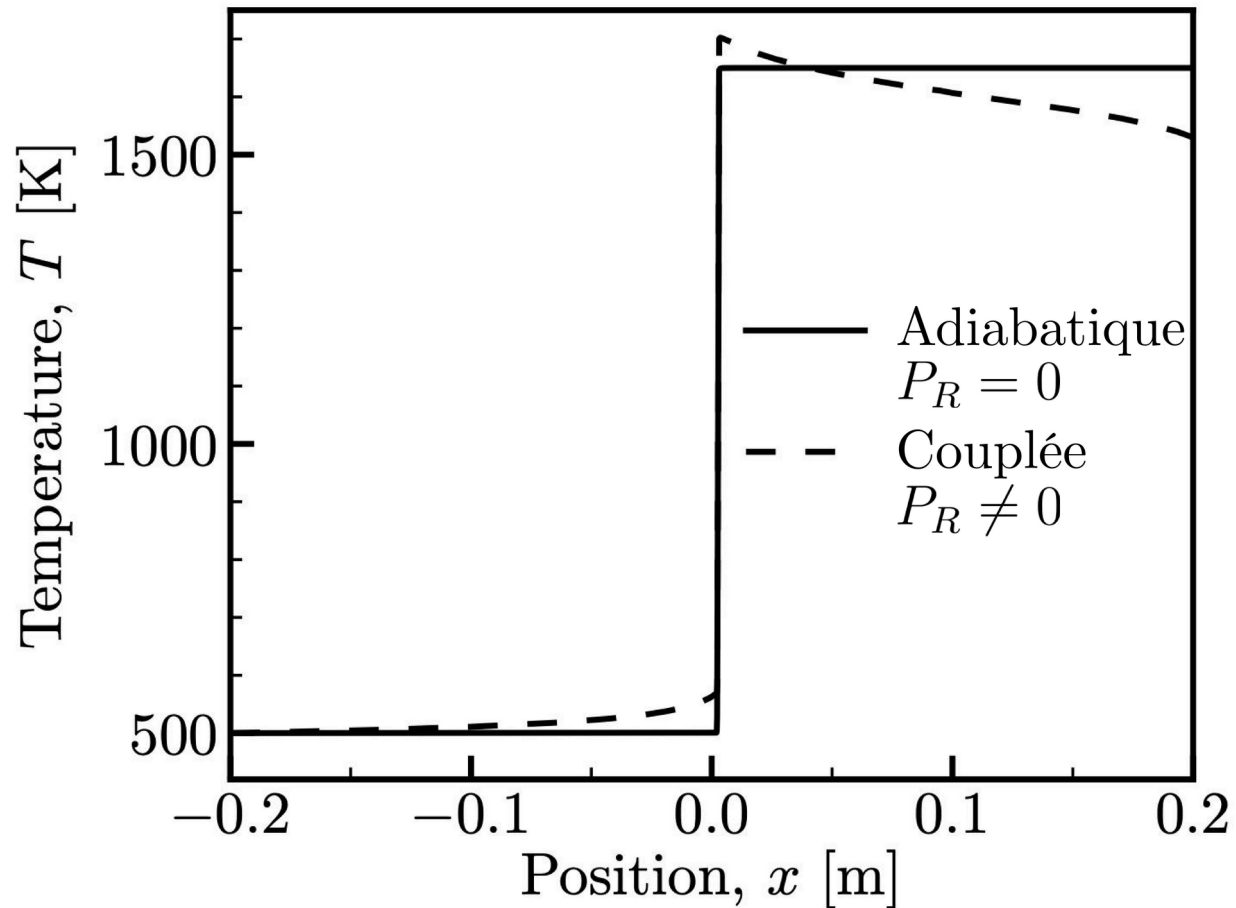
Le facteur d'augmentation relative de vitesse

Mélange H₂-Air-H₂O, T = 500K, P = 5 atm, $\phi = 0.8$, $y(\text{H}_2\text{O}) = 0.3$

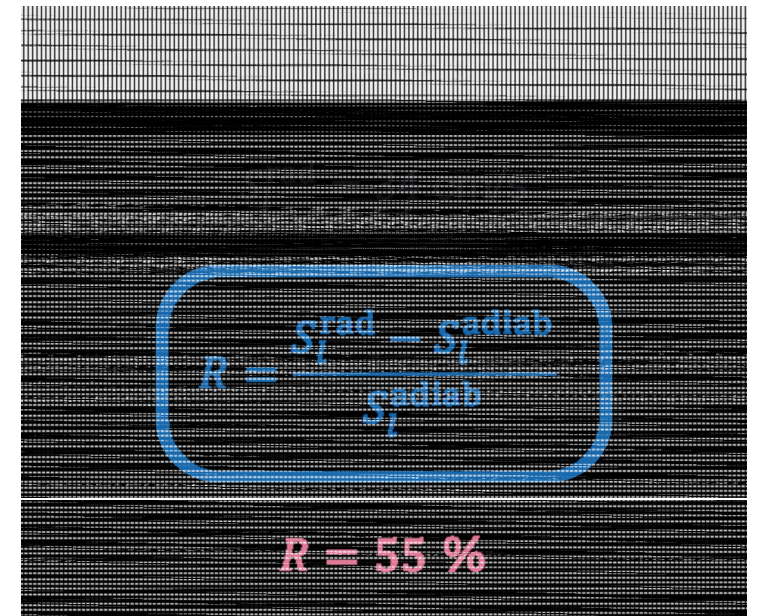
ϕ , Richesse



$y(\text{H}_2\text{O})$, Dilution



Vitesse de flamme



Le rayonnement accélère la flamme considérablement.

Flamme adiabatique préchauffée équivalente

Mélange H₂-Air-H₂O, T = 500K, P = 5 atm, $\phi = 0.8$, $y(\text{H}_2\text{O}) = 0.3$

Seulement un préchauffage des gaz frais ?

Simulation **adiabatique** à $T_{\text{eff}}=568$ K au lieu de 500 K.

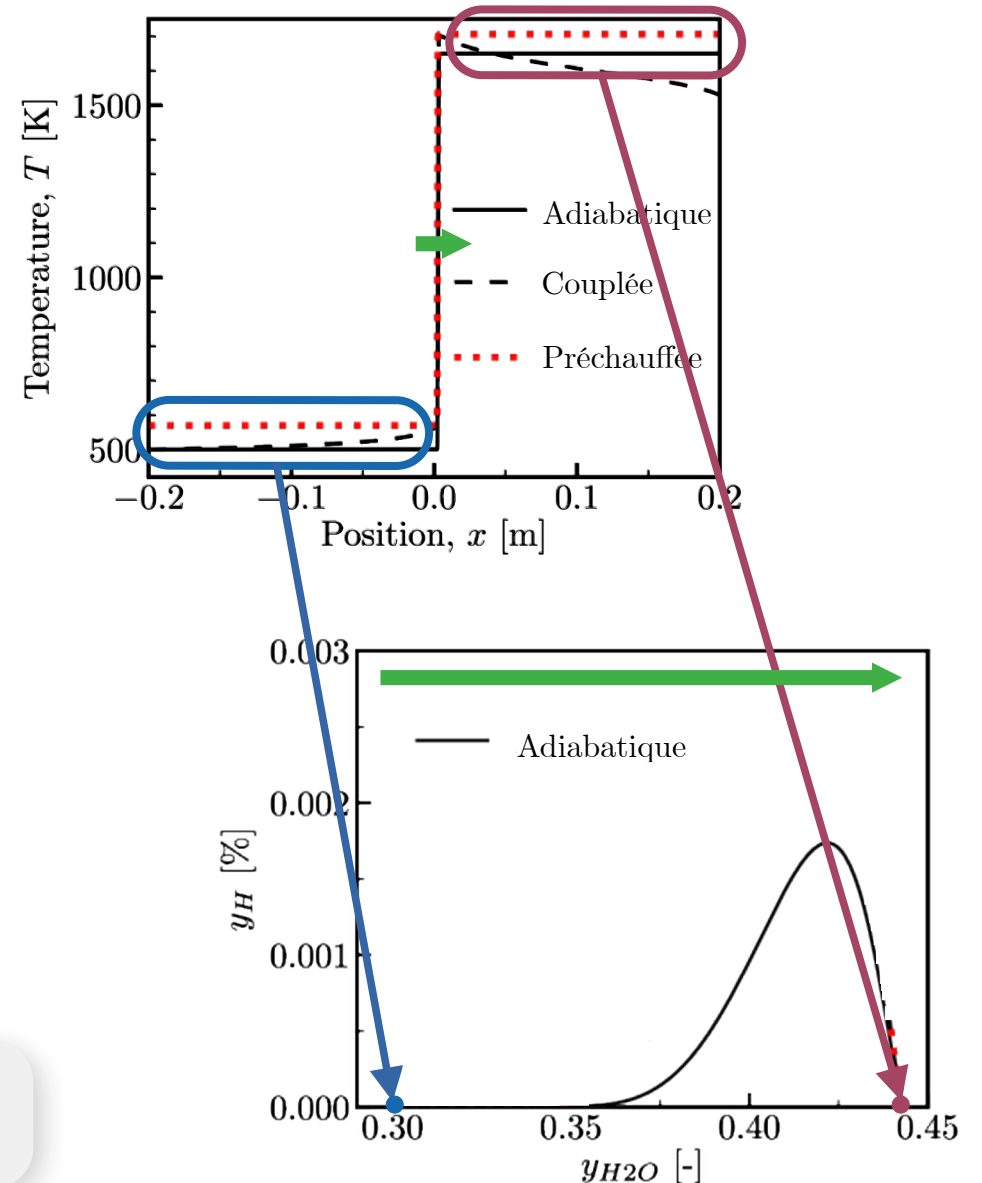
Même température maximale dans les gaz brûlés.

Espace des phases : représentation sans coordonnée spatiale → compare les trajectoires chimiques.

Couplée et adiabatique préchauffée **superposées** : le rayonnement **n'altère pas** la chimie interne du front !

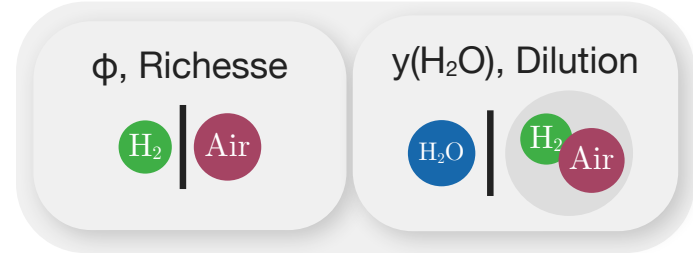
$$S_l^{\text{prech}} = 33.6 \text{ cm/s} \quad \text{vs} \quad S_l^{\text{rad}} = 34 \text{ cm/s}$$

Modèle validé pour cette condition.
Mais est-il toujours valide ?



Limites du modèle équivalent adiabatique

$$R = \frac{s_f^{rad} - s_f^{adiab}}{s_f^{adiab}}$$

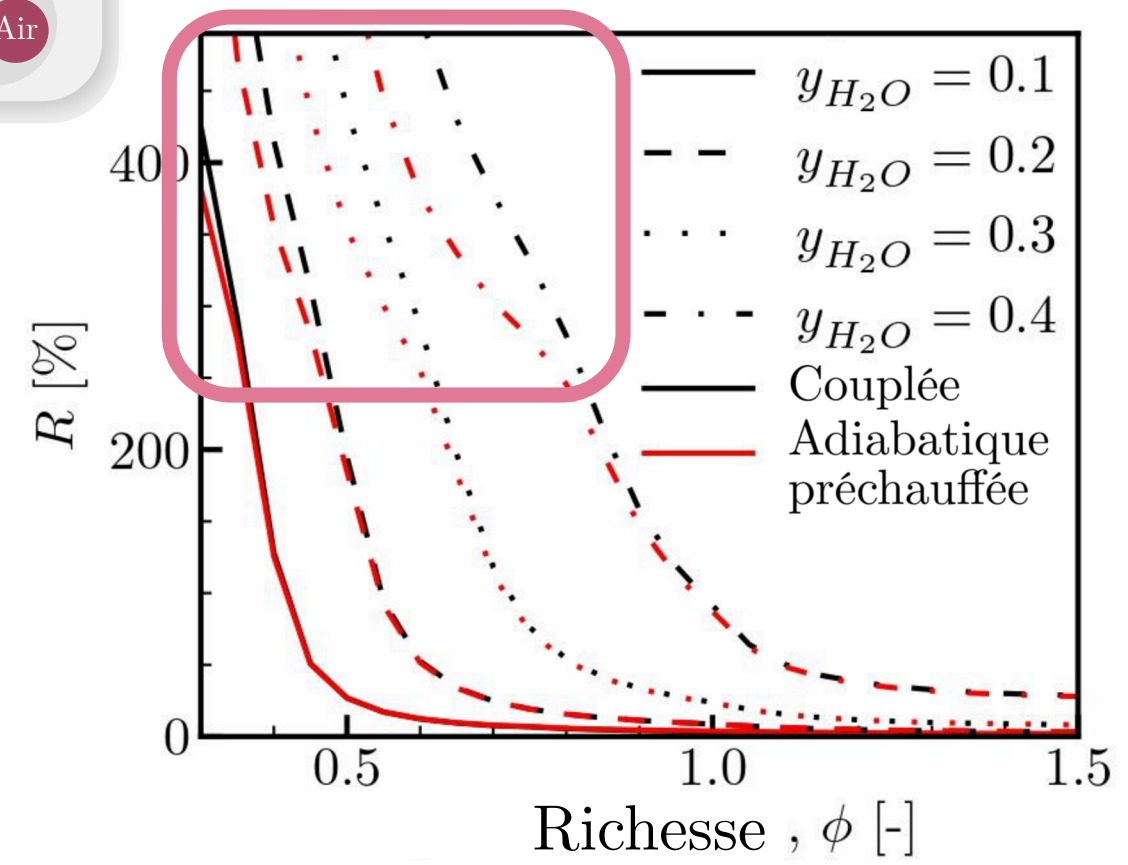


Variation de ϕ et $y(H_2O)$
sur un grand nombre de flammes

Courbes noires (couplées) et rouges (adiabatiques préchauffées) se superposent pour flammes riches (ϕ grand) / peu diluées ($y(H_2O)$ petit)

Écarts notables pour flammes pauvres (ϕ petit) + très diluées ($y(H_2O)$ grand) !
Modèle ne semble plus fonctionner.

Ces flammes sont les plus lentes et épaisses.



Pour comprendre : raisonnement en temps caractéristiques.

Temps caractéristiques et Nombres sans dimension

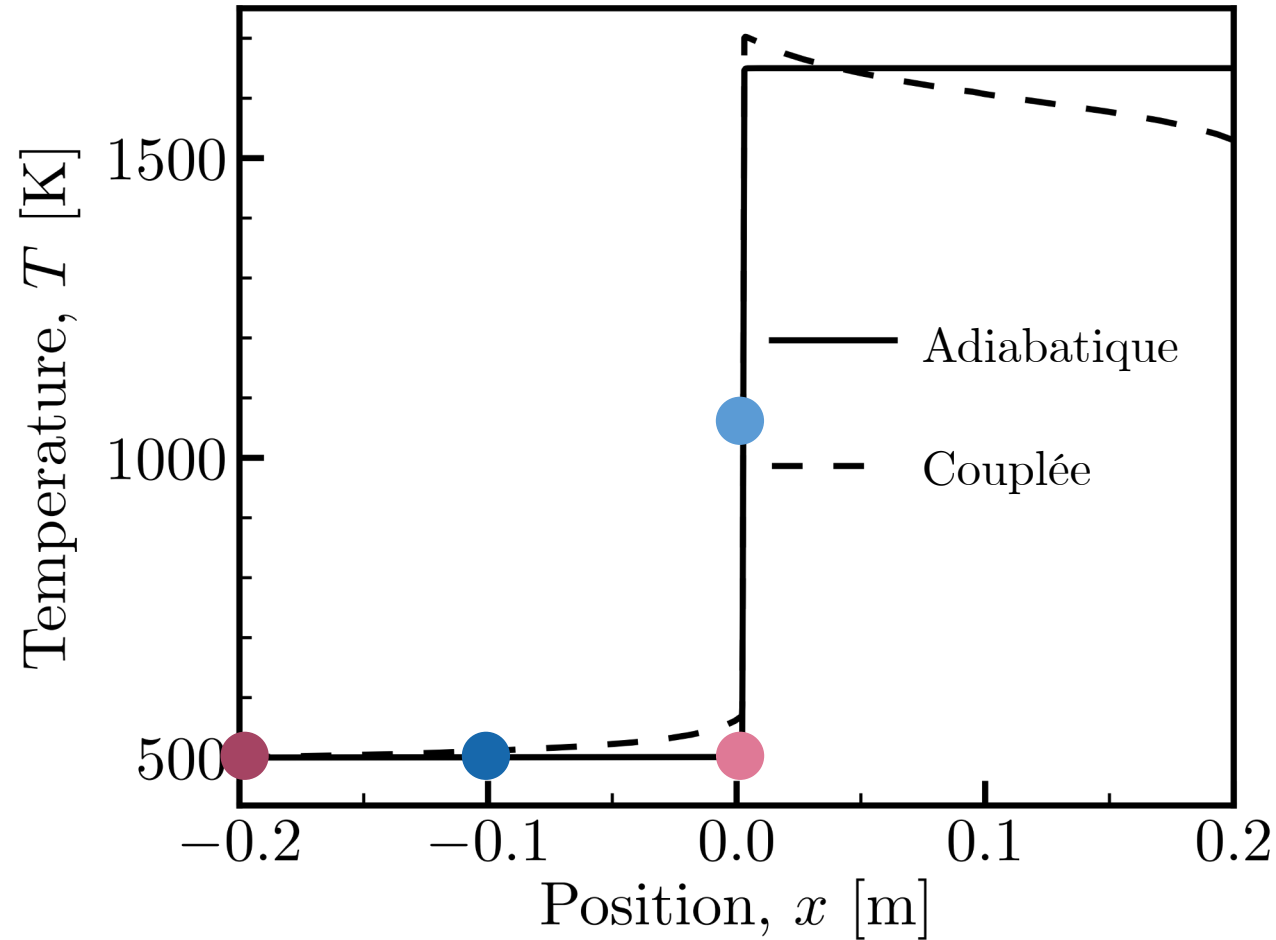
Convection gaz frais

$$\tau_{\text{conv}}$$

Rayonnement gaz frais

$$\tau_{\text{abs}}^u$$

$$\mathcal{N}_u = \frac{\tau_{\text{conv}}}{\tau_{\text{abs}}^u}$$



Chimie front flamme

$$\tau_{\text{chim}}$$

Rayonnement front flamme

$$\tau_{\text{abs}}^f$$

$$\mathcal{N}_f = \frac{\tau_{\text{chim}}}{\tau_{\text{abs}}^f}$$

Nombres sans dimension et régimes de couplage

Temps caractéristiques : Convection gaz frais, Chimie front flamme, Rayonnement gaz frais and Rayonnement front flamme.

 τ_{conv}
 τ_{chim}
 τ_{abs}^u
 τ_{abs}^f

Deux nombres sans dimension : $\mathcal{N}_u = \frac{\tau_{\text{conv}}}{\tau_{\text{abs}}^u}$ et $\mathcal{N}_f = \frac{\tau_{\text{chim}}}{\tau_{\text{abs}}^f}$

Trois régimes :

WeakAbs

N_u et N_f petits.
Rayonnement *négligeable*
→ Modèle adiabatique OK

RadConv

N_u grand et N_f petit.
Préchauffage des gaz frais
mais *front non affecté*.
→ Flamme équivalente
préchauffée

RadChem

N_u et N_f grands.
Couplage *même* dans le
front de flamme
→ Simulation couplée
nécessaire

Cartographie des régimes

Mélange H₂-Air-H₂O, T = 500K, P = 5 atm

ϕ , Richesse

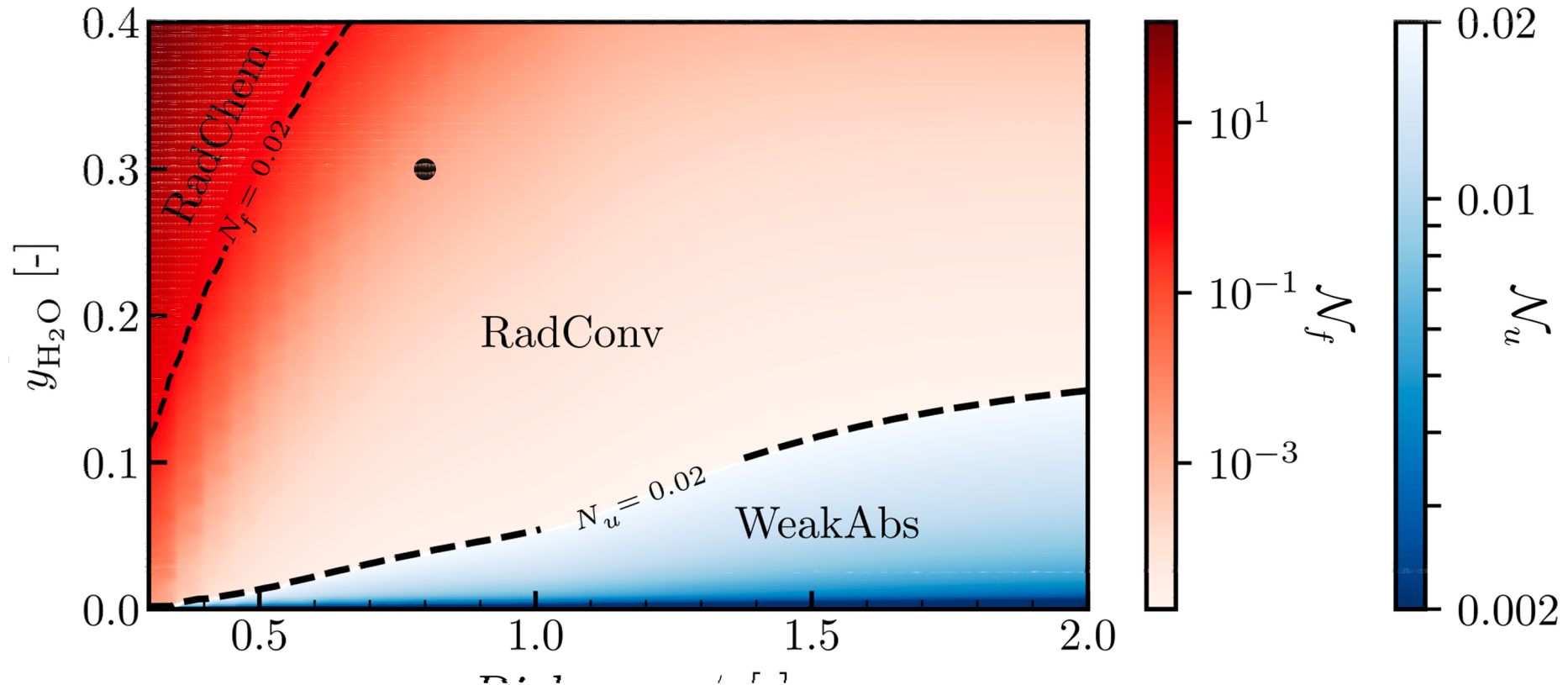


y(H₂O), Dilution



$$\mathcal{N}_u = \frac{\tau_{\text{conv}}}{\tau_{\text{abs}}^u} \quad \mathcal{N}_f = \frac{\tau_{\text{chim}}}{\tau_{\text{abs}}^f}$$

15/27



Carte qui nous dit **quand** et **comment** le rayonnement impacte une flamme. Outil pratique.

Synthèse, limites et perspectives

Rayonnement **accélère** les flammes diluées en **préchauffant** les gaz frais.

Modèle **adiabatique préchauffé équivalent** évite les simulations couplées coûteuses.

Cartographie des régimes.
Compréhension du couplage.

Limites

Étude **1D** plan. Même en 1D, résultats dépendent de la **taille du domaine** de calcul.

Ce qui est portable : **la démarche**

La suite : flammes sphériques

Méthode de mesure expérimentale de S_ℓ .

Instabilités + couplage combustion-rayonnement.

Structures visuellement et physiquement riches.

Mes expériences d'enseignement et de médiation scientifique

Enseignement et médiation scientifique

TDs universitaires

106h à CentraleSupélec.
MécaFlu, Thermique, Turbulence
L3, M1, M2

Tutorat lycée

Association OSER
Lycée Henri Matisse, Montreuil

Médiation Scientifique

Stand Fête de la Science
Laboratoire EM2C
ENS Paris-Saclay

Comment ces expériences ont façonné ma vision de l'enseignement ?

TDs à CentraleSupélec

106h de TDs sur 3 ans – Mécanique des fluides, Transferts thermiques, Turbulence et couche limite.

Tous les niveaux : L3, M1 et M2

Groupes de 20 à 40 élèves.

Constat

Lacunes de mémoire sont bloquantes.

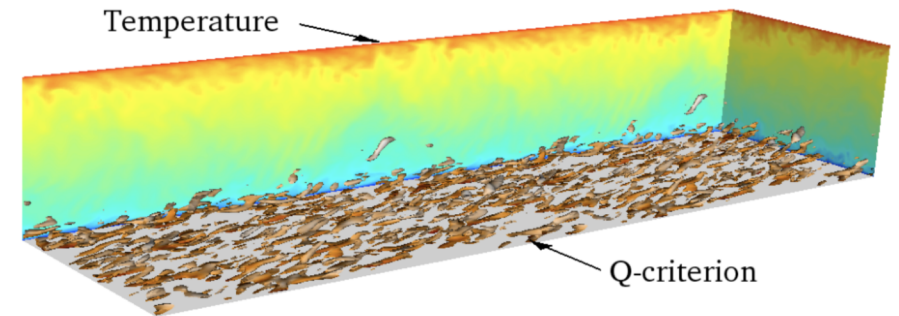
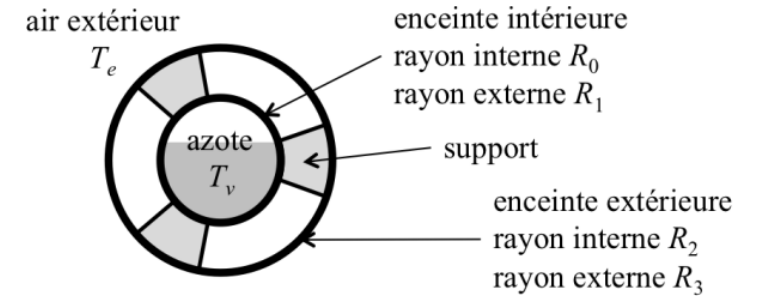
Méthode

Rappels de cours. Formules clefs au tableau.

Ce que j'en retire

Pendant phase de résolution de problème : il ne faut pas qu'un oubli soit bloquant.

D'autres moments restent consacrés à la restitution de connaissance.



Tutorat avec OSER au lycée Henri Matisse

2 ans – Lycéens volontaires – ouverture culturelle et esprit critique

Ouverture Sociale pour l'Égalité et la Réussite

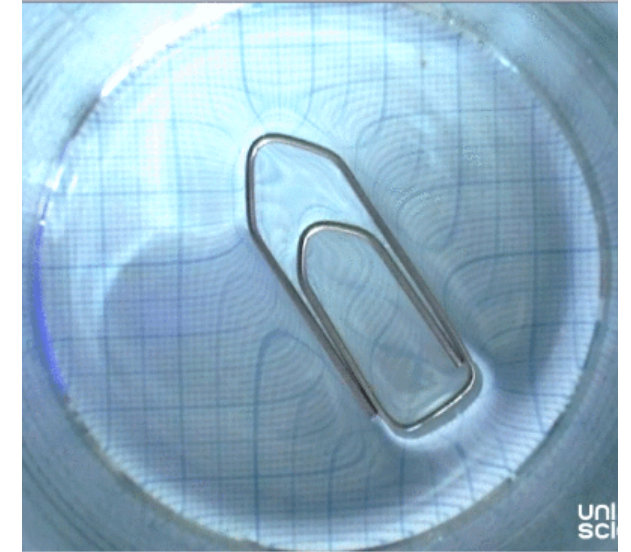
Un exemple : la tension superficielle

Comment expliquer qu'un trombone, plus dense que l'eau, puisse flotter ?
On ajoute une goutte de savon, le trombone coule, pourquoi ?

→ Ménisque en chimie, forme des bulles...

Ce que j'en retire

Les manipulations concrètes créent de bonnes ouvertures.
Elles accrochent et intéressent. Reste à construire un savoir.



Médiation scientifique – Fête de la Science

Stands du laboratoire EM2C – flamme dansante

Flamme perturbée par un haut-parleur.

Strioscopie et caméra rapide pour observer les mouvements du front.

Ce que je retire du tutorat et de cette médiation

Le concret, le visuel, l'inattendu ↔ accroche puissante.

Mais l'émerveillement ne suffit pas à retenir un concept, le mobiliser 6 mois plus tard dans un domaine connexe...



Médiation ouvre une porte.

Enseignement : ce qui se passe une fois qu'on a franchi le seuil
→ formalisation, répétition, mémorisation, évaluation...

Activité pédagogique – Rayonnement thermique et Albédo

Enseignement Scientifique, 1ère – « Le Soleil, notre source d'énergie » – 1h30 à 2h – TP en binômes

Par une journée ensoleillée, on marche pieds nus. Le sable *blanc* de la plage est *tiède*, mais le goudron *noir* du parking *brûle* les pieds. Pourquoi ?



Activité pédagogique – Rayonnement thermique et Albédo

Dispositif expérimental

3 feuilles d'aluminium identiques :

- Une nue et brillante
- Une peinte en noir mat
- Une peinte en blanc mat

à égale distance d'une lampe chaude et équipées d'une sonde de température

Démarche

I. Hypothèses

Laquelle chauffe le plus fort et le plus vite ?

II. Mesures

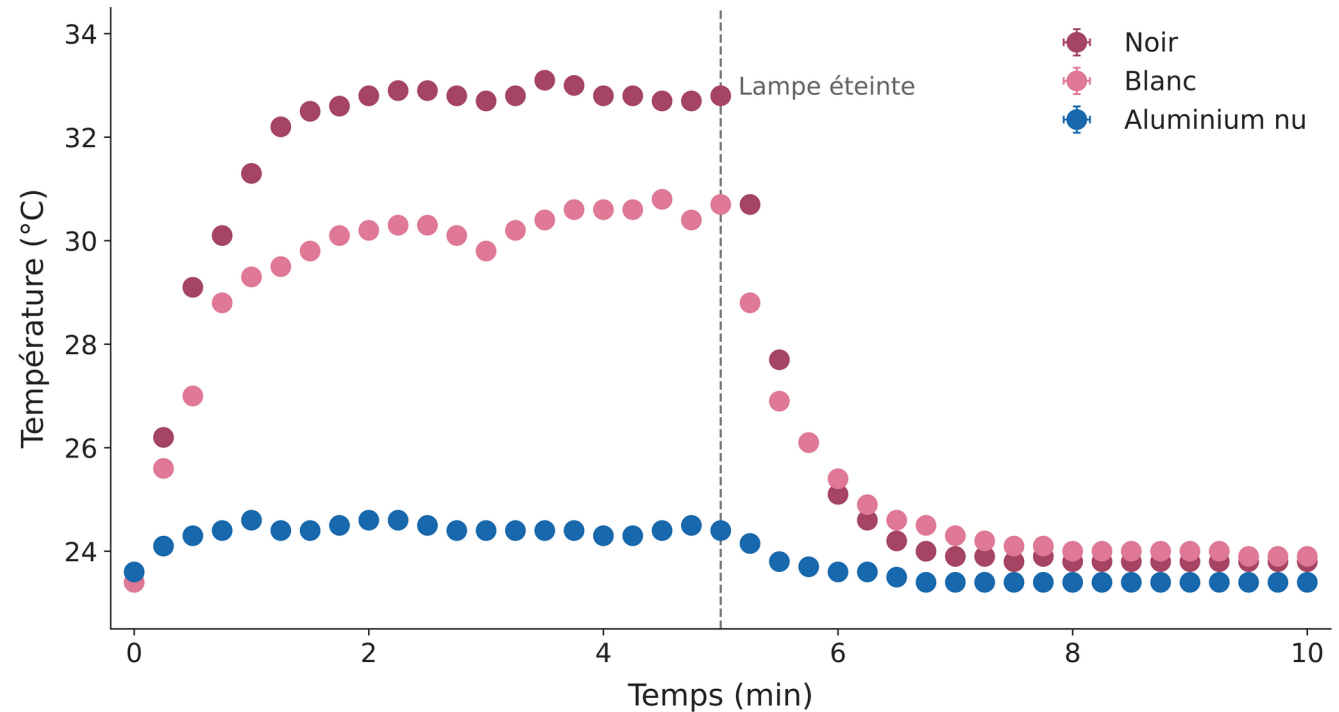
T pendant 5 minutes d'exposition puis refroidissement.

III. Tracé

3 courbes T(t) sur le même graphe

IV. Analyse

Confronter résultats et hypothèses.



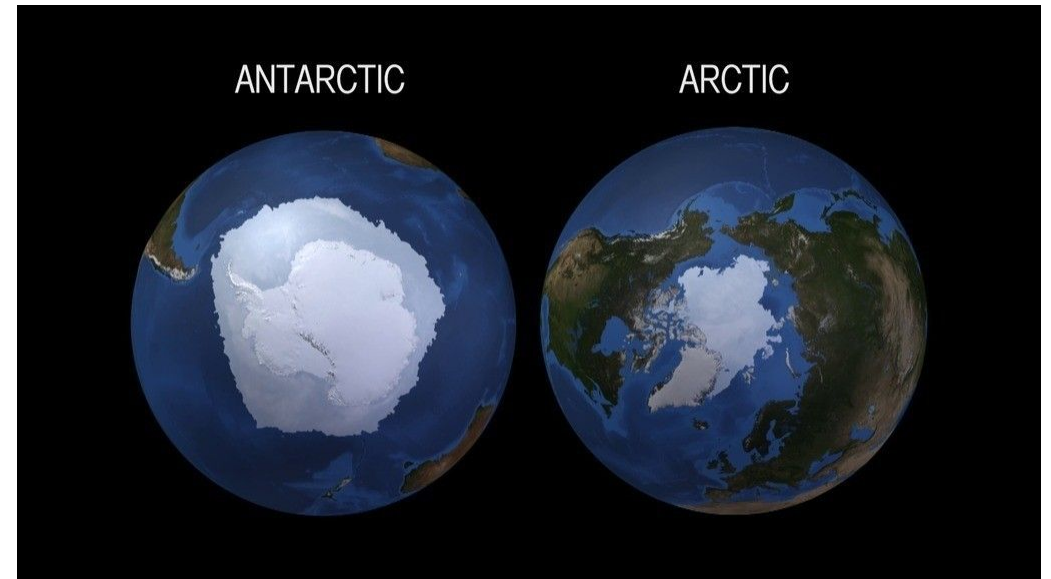
Activité pédagogique – Rayonnement thermique et Albédo

Albédo

Fraction de puissance radiative réfléchiée par une surface.

Valeurs typiques

Glace/Neige	~ 70 %	Réfléchit
Forêt	~ 10 %	Absorbe
Océan	~ 10 %	Absorbe



Rétroaction amplificatrice du changement climatique

Fonte des glaces → surfaces réfléchissantes remplacées par absorbantes → réchauffement amplifié.

Conclusion



Merci pour votre
attention !