

Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

JULIE BEN ZENOU

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

Session 2026

1 - Parcours académique et scientifique

Formation académique

- 2025 – 2026 :** Préparation à l'agrégation de physique, Centre interuniversitaire de Montrouge, *ENS Paris, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Université Paris-Cité.*
- 2020 – 2021 :** Master AS-MAE : AéroSpatial - Mécanique, Automatique, Energétique de l'Université Paris-Saclay, *Major de promotion* (27 étudiants).
- 2017 – 2021 :** Diplôme d'ingénieur de l'École Centrale Paris, Université Paris-Saclay, Mention "Aéronautique, Espace, Transport", *Major de la promotion* Alphonse Lavallée (P2020, ~ 500 étudiants).
- 2015 – 2017 :** Classes Préparatoires aux Grandes Écoles (CPGE), Filière PCSI/PC*, *Lycée Louis-le-Grand.*

Expériences de recherche

- 2021 – 2025 :** Thèse de doctorat en énergétique de l'Université Paris-Saclay, intitulée "*Effets du rayonnement thermique sur la vitesse et l'accélération de flamme dans des mélanges dilués par des gaz brûlés*" préparée au laboratoire EM2C de CentraleSupélec sous la direction de Ronan Vicquelin.
- 2021 :** Stage R&T chez *Safran Aircraft Engines*. Simulation numérique d'un écoulement de purge de turbine haute pression.
- 2019 – 2020 :** Visiting Student Researcher au *Stanford Plasma Physics Laboratory*. Allumage et caractérisation du panache plasmique d'un propulseur à effet Hall à air.
- 2017 – 2019 :** Parcours recherche de CentraleSupélec. Projet de recherche 1 jour/semaine pendant 2 ans au laboratoire EM2C sur la caractérisation spectrale des plasmas en rentrées atmosphériques.

Expériences d'enseignement

- 2025 :** Cours particuliers de mathématiques et physique de la terminale aux CPGE.
- 2021 – 2024 :** Mission d'enseignement. Chargée de TD à CentraleSupélec en Sciences des transferts, Mécanique des fluides et Turbulence de la L3 au M2 (106h total). Encadrement de projets sur l'année pour des étudiants de L3 et M1 (36h).
- 2024 :** Mentorat d'une lycéenne avec l'association ESA (Entraide Sociale Amicale).

Médiation scientifique et tutorat

- 7 Oct. 2023 :** Fête de la Science : Présentation de différents stands (turboréacteur, vitesse de flamme, flammes dansantes) du laboratoire EM2C au public à l'ENS Paris-Saclay.
- 2017 – 2019 :** Tutorat en lycées dans le cadre de l'association OSER, membre des Cordées de la Réussite. Organisation de *Good Morning London*, un voyage à Londres pour 35 tutorés.
- Oct. 2018 :** Atelier apprentis chercheurs, Valorisation des travaux de mon Parcours Recherche pour le public du *Palais de la Découverte*.

2 - Enseignement et médiation scientifique

Mission d'enseignement à CentraleSupélec

Pendant ma thèse, j'ai effectué une mission d'enseignement de 64h par an (32h seulement la première année) auprès d'étudiants de niveau L3, M1 ou M2 de CentraleSupélec. J'y ai enseigné la mécanique des fluides, les transferts thermiques et la turbulence et j'y ai encadré différents projets.

Dans les modules de mécanique des fluides et de thermique, les séances de 2h avec environ 25 étudiants étaient consacrées à la résolution d'exercices. J'ai rapidement constaté que pour que les étudiants soient actifs, il fallait d'abord sécuriser leurs connaissances. Je commençais donc chaque séance par un rappel de cours d'une quinzaine de minutes, en laissant les formules essentielles affichées au tableau. Cela permettait d'éviter que les étudiants ne bloquent sur un simple trou de mémoire et se concentrent sur le raisonnement physique. Pendant la phase de recherche, j'encourageais le travail en binôme ou trinôme et je circulais dans les rangs. Cette proximité m'a permis de m'adapter à l'hétérogénéité du groupe, tant en termes de niveau que d'intérêt pour la matière. Je pouvais alors donner un indice pour débloquer un étudiant en difficulté ou, à l'inverse, poser une question d'ouverture à un groupe plus avancé. Lorsqu'une difficulté bloquait une grande partie de la classe, je reprenais la main au tableau pour expliquer le point gênant, sans pour autant rédiger une correction exhaustive, les étudiants disposant d'un corrigé photocopié par ailleurs.

Ce choix du rappel de cours en début de séance m'est venu de ma propre expérience d'étudiante : les TDs que j'avais préférés étaient ceux qui commençaient ainsi, car cela m'avait permis de me concentrer sur la résolution plutôt que sur la recherche d'une formule. Tous les chargés de TD du module ne faisaient pas ces rappels, et j'ai constaté que dans mes groupes, les étudiants entraient plus rapidement dans la phase active de l'exercice. Si cette approche n'a pas eu d'effet notable sur les résultats aux examens, elle a en revanche eu un impact réel sur l'engagement des étudiants. À la fin de mon dernier TD, deux étudiantes sont venues me remercier en me disant que c'était le meilleur TD de leur scolarité à Centrale, alors même qu'elles n'avaient pas choisi cette option. Le fait qu'un enseignement non désiré au départ puisse susciter un tel enthousiasme m'a confirmé que le dynamisme et la structuration d'une séance comptent beaucoup, au-delà du contenu lui-même, un enseignement que je compte bien transposer dans mes futures classes.

Les TDs de turbulence étaient eux basés sur des projets numériques de simulation RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, approche de modélisation statistique de la turbulence) sous ANSYS Fluent et demandaient une approche différente. Mon rôle était double : aider sur la prise en main du logiciel et du traitement de données (Python), mais surtout garantir le sens physique des simulations. Je guidais les étudiants pour qu'ils ne voient pas le code comme une "boîte noire" mais qu'ils s'interrogent sur la validité de leurs modèles (choix du modèle RANS, convergence du maillage, etc.).

Ces expériences m'ont aussi appris à accepter de ne pas tout savoir. Il m'est arrivé plusieurs fois de sécher sur des questions d'élèves. Plutôt que de tenter une explication approximative, je leur disais simplement que je ne savais pas, mais que je leur apporterais la réponse la semaine suivante. Le fait de revenir systématiquement avec l'explication promise a renforcé leur confiance sans impacter mon autorité. Enfin, dans l'encadrement de projets longs pour des groupes de trois étudiants, je ne savais pas tout non plus. Quand un groupe travaillant sur le propergol solide d'une fusée a par exemple rencontré des problèmes de résistance des matériaux (hors de mon domaine), je les ai orientés vers le laboratoire compétent à Centrale (MSSMAT), leur montrant ainsi qu'une partie du travail scientifique consiste aussi à savoir chercher l'information là où elle se trouve.

Tutorat avec OSER

En parallèle de ma formation à CentraleSupélec, je me suis engagée pendant deux ans (2017-2019) au sein de l'association OSER (Ouverture Sociale pour l'Égalité et la Réussite). J'intervenais le samedi matin au lycée Henri Matisse de Montreuil auprès de groupes de lycéens volontaires (de la Seconde à la Terminale). L'objectif principal de ce tutorat était l'ouverture culturelle et le développement de l'esprit critique.

Pour apprendre aux élèves à structurer leur pensée, nous organisons souvent des débats sur des sujets de société comme le nucléaire. Un élève ne pouvait parler que s'il avait la balle en main, et pour ne donner qu'un seul argument. Cette contrainte les obligeait à vraiment s'écouter plutôt qu'à parler plus fort que les autres.

Une des activités les plus marquantes a été une simulation de conseil de l'ONU sur la construction d'un barrage par la Turquie sur l'Euphrate. Nous avons réparti les élèves en groupes (Turquie, Syrie, Irak, Représentants Kurdes et WWF) avec des objectifs précis. Surtout, pour éviter que le débat ne reste dans l'émotion, nous leur avons fourni des vrais chiffres : débits du fleuve avec et sans barrage, besoins agricoles, production électrique... Avec ces données concrètes sous les yeux, le but était qu'ils essayent de trouver un compromis réaliste qui tienne compte des contraintes de chacun et qui respecte une certaine morale. Ils touchaient ainsi du doigt la démarche de l'ingénieur face aux enjeux énergétiques. L'objectif principal était là encore de développer leur esprit critique et de séparer les faits des idées et des émotions.

J'ai également animé des ateliers plus scientifiques. Je me souviens d'une séance dédiée à la tension superficielle, introduite par une question simple : pourquoi les bulles de savon sont-elles sphériques ? Comme cette force est difficile à intuitiver pour les élèves, nous sommes passés par l'expérience pour la visualiser. Avec très peu de matériel, nous avons montré qu'un trombone posé délicatement sur l'eau flotte alors que dès qu'on l'enfonce il coule. Nous avons aussi vu que le poivre flotte à la surface de l'eau et qu'il s'éloigne du centre pour se coller aux bords du verre quand on ajoute une goutte de savon. Cela a permis de rendre plus concrète la physique de la tension superficielle avant d'en discuter certaines conséquences comme le ménisque dans la verrerie de chimie ou la forme des bulles de savon.

Cette expérience m'a beaucoup appris sur la dynamique de groupe. Dans ces classes pourtant majoritairement féminines, les garçons avaient tendance à monopoliser la parole. J'ai dû apprendre à distribuer la parole équitablement pour que les filles osent intervenir sans pour autant braquer les garçons. Dans ma future classe, je serai particulièrement attentive à cette répartition de la parole, en veillant à interpeller aussi les élèves plus discrets et en variant les modalités de participation (travail en petits groupes où chacun a un rôle défini, temps de réflexion individuelle avant la mise en commun, etc.) pour que la prise de parole ne soit pas systématiquement accaparée par les mêmes profils.

Cette expérience de tutorat m'a enseigné deux choses essentielles pour ma future pratique. D'abord, l'ancrage dans le concret : les activités les plus réussies étaient celles qui partaient d'une situation tangible (l'expérience du trombone, les vrais chiffres du barrage) avant d'en tirer des concepts plus abstraits. Cela ne retire rien à l'importance du contenu théorique, mais le concret sert de point d'entrée pour accrocher les élèves. Ensuite, j'ai observé combien la dynamique de groupe est fragile : un seul élève désengagé peut très rapidement entraîner ceux qui l'entourent dans la dissipation, même s'ils étaient initialement intéressés. En tant que future enseignante, je resterai donc attentive à ces signaux pour intervenir tôt, par exemple en réorientant l'attention d'un élève distrait par une question plutôt qu'en laissant la situation se dégrader.

Par ailleurs, l'organisation d'un voyage à Londres pour 35 lycéens m'a permis de voir les élèves dans un tout autre cadre et de me confronter aux lourdes responsabilités logistiques et de sécurité qu'implique la gestion d'un groupe d'adolescents, d'autant plus à l'étranger.

Médiation scientifique au Palais de la Découverte et à la Fête de la Science

Mon goût pour la transmission s'est aussi exprimé à travers des actions de médiation scientifique, où le défi consiste à rendre accessibles des concepts complexes à un public hétérogène constitué de non-spécialistes.

Pendant deux ans à CentraleSupélec, j'ai suivi le Parcours Recherche sur l'étude spectroscopique de plasmas de rentrée atmosphérique qui incluait une formation à la médiation qui a abouti à une présentation théâtralisée à l'atelier "Apprentis Chercheurs" du Palais de la Découverte. Nous avons scénarisé notre sujet sous la forme d'un "retour de voyage spatial", simulant l'atterrissage d'un vaisseau pour expliquer le rôle du bouclier thermique ablatif et la formation d'un plasma par échauffement de l'atmosphère. Nous illustrions les transitions de phase à l'aide de boules en mousse avant de montrer comment la spectroscopie de ces plasmas permet de dimensionner les boucliers. Cette expérience m'a convaincue de l'importance de la contextualisation et de l'interaction avec le public pour l'impliquer dans une démarche scientifique.

Enfin, durant ma thèse, j'ai animé le stand du laboratoire EM2C à la Fête de la Science, présentant trois dispositifs expérimentaux. Le premier associait une maquette détaillée de turboréacteur à une expérience simple : un sèche-cheveux monté sur un chariot mobile lié à un dynamomètre. Cela permettait de discuter concrètement des notions de force et de poussée ainsi que du fonctionnement d'un moteur d'avion. J'ai aussi animé l'atelier "Vitesse de Flamme", où l'on chronométrait la propagation d'une flamme dans un tube transparent, illustrant la consommation des gaz frais par le front de réaction. Cet atelier permettait aussi d'introduire la distinction physique entre déflagration et détonation en s'appuyant sur l'intuition du public

(incendie vs explosion). Le dernier atelier, sans doute le plus marquant, présentait des "flammes dansantes" ¹. Un haut-parleur diffusait de la musique dans l'écoulement alimentant un bec Bunsen. Les ondes acoustiques, en créant des fluctuations locales de pression et de vitesse, perturbent le front de flamme qui se met en mouvement. Ce mouvement est trop rapide pour être perçu à l'œil nu aux fréquences audibles, mais grâce à un banc de striescopie permettant d'observer les gradients thermiques (Schlieren) et une caméra rapide, nous pouvions visualiser les déformations du front sur un écran. Au-delà de l'aspect ludique, c'était une opportunité d'expliquer le lien entre ondes acoustiques et combustion, et d'évoquer les instabilités thermoacoustiques, un enjeu industriel majeur.

J'ai pris beaucoup de plaisir à ces exercices de médiation. Ils m'ont confirmé que le passage par le concret et l'expérience visuelle est souvent le meilleur moyen de capter l'intérêt et de rendre accessibles des concepts physiques a priori compliqués. Dans mon futur métier d'enseignante, je mettrai à profit cette expérience en ancrant les notions dans des contextes concrets (applications industrielles, phénomènes du quotidien, etc.) et en proposant dès que possible des expériences d'accroche en début de chapitre pour susciter la curiosité avant d'entrer dans le contenu théorique. Contrairement à la médiation scientifique, l'enseignement exige ensuite de structurer les connaissances, de les formaliser et de s'assurer de leur acquisition. C'est cette articulation entre accroche concrète et apprentissage rigoureux que je souhaite construire dans mes cours.

3 - Recherche : Impact du rayonnement thermique sur des flammes hydrogène diluées

3.1 Contexte scientifique et motivation

Contexte énergétique mondial

La transition énergétique constitue aujourd'hui un enjeu majeur dans la lutte contre le changement climatique. Les activités humaines ont déjà provoqué une augmentation de plus de 1,4 °C de la température moyenne globale par rapport à l'ère pré-industrielle, entraînant des conséquences environnementales, sociales et économiques de plus en plus visibles.

Or, malgré le développement rapide des énergies renouvelables, la combustion reste au cœur du système énergétique mondial en tant que *source d'énergie primaire* : elle représente encore environ 80% de la consommation primaire d'énergie et devrait conserver une part significative en 2050 (20 à 70% selon les scénarios Net Zero Emission). En particulier, certains secteurs industriels (sidérurgie, ciment, verrerie) nécessitent des apports thermiques intenses qui les rendent difficiles à électrifier. La décarbonation de la combustion constitue donc un levier essentiel pour atteindre la neutralité carbone.

Mais la combustion joue également un rôle distinct en tant que *vecteur d'énergie* : les combustibles servent à stocker et transporter l'énergie produite par d'autres sources (électricité renouvelable convertie en hydrogène, par exemple). Aujourd'hui, 80% de la consommation finale d'énergie mondiale est assurée par des carburants ; différents scénarios NZE estiment qu'en 2050, environ 50% de cette énergie finale sera fournie par de l'électricité, l'autre moitié restant assurée par des vecteurs combustibles. Se passer de la combustion pour ses deux usages — source thermique directe et vecteur de stockage — représente donc deux défis distincts.

Malgré ce rôle central de la combustion dans le paysage énergétique mondial, la dépendance persistante aux combustibles fossiles traditionnels engendre des risques environnementaux et sanitaires importants : émissions de gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique ou encore émissions de polluants comme les oxydes d'azote (NO_x), néfastes pour la santé humaine. Il est donc impératif de décarboner au plus vite les procédés de combustion. Une des solutions envisagées est de remplacer les combustibles fossiles traditionnels par des combustibles propres comme l'hydrogène (sous réserve d'une production décarbonée).

Hydrogène : un vecteur d'énergie pour une combustion décarbonée

L'hydrogène combustible étant très peu présent à l'état naturel sur Terre, il est plutôt utilisé comme vecteur d'énergie que comme source primaire. Il présente l'avantage d'une combustion intrinsèquement sans carbone qui fait de lui le combustible propre par excellence. De plus, sa densité énergétique massique exceptionnelle (≈ 120 MJ/kg, soit trois fois celle de l'essence) et sa large plage d'inflammabilité (4 à 75 % dans l'air comparé à 5 à 15 % pour le méthane) en font un candidat prometteur pour des applications nécessitant de fortes puissances thermiques (turbines à gaz, procédés industriels). Évidemment, pour ne pas

1. Démonstration filmée par un professeur de CentraleSupélec.

simplement déplacer le problème, l'hydrogène doit lui-même être produit de manière propre (hydrogène vert par électrolyse de l'eau) ce qui n'est pas le cas actuellement (hydrogène gris par reformage du gaz naturel).

L'hydrogène présente également des inconvénients en tant que fuel dont le plus connu est sa très faible densité énergétique volumique (≈ 0.01 MJ/L à pression et température ambiantes, soit 3000 fois moins que l'essence). Autrement dit, si un kilogramme d'hydrogène contient trois fois plus d'énergie qu'un kilogramme d'essence, il occupe un volume considérablement plus grand du fait de sa très faible masse volumique (≈ 0.08 kg/m³). Cette contradiction entre richesse massique et pauvreté volumique demande un stockage et un transport à hautes pressions (jusqu'à 750 bars) et/ou basses températures (liquéfaction à -250°C) ce qui complexifie les infrastructures. De plus, sa forte réactivité, bien qu'un avantage en termes de polyvalence et de facilité d'allumage, constitue un défi majeur pour la sécurité, comme l'illustrent le dirigeable Hindenburg ou la catastrophe de Fukushima. Enfin, les températures de flamme élevées associées à la combustion de l'hydrogène peuvent entraîner une formation plus importante de NO_x , fortement dépendants de la température. Pour atténuer sa forte réactivité et ces effets négatifs liés aux hautes températures, il est possible de **diluer** les gaz frais (hydrogène et air) avec des gaz brûlés recirculés (de l'eau recondensée principalement). Cette approche est appelée **Exhaust Gas Recirculation** ou EGR.

Vitesse de Flamme et Rayonnement Thermique

La dilution des gaz frais par des gaz brûlés recirculés (EGR) est donc une solution pratique pour répondre aux défis liés à la forte réactivité de procédés de combustion plus propres comme la combustion de l'hydrogène. Cette dilution influe à la fois sur les propriétés thermiques, chimiques et de transport du mélange, avec en particulier une augmentation de la capacité thermique du mélange non brûlé. Ces effets vont modifier un paramètre fondamental de la propagation des flammes, leur vitesse.

Dans cette étude, on se concentre exclusivement sur des flammes prémélangées, où l'oxydant, le carburant et l'éventuel diluant sont mélangés en amont avant d'entrer dans la chambre de combustion. Dans ce cadre, la grandeur clef pour décrire la propagation d'une flamme est sa **vitesse de flamme** définie comme la vitesse à laquelle une flamme laminaire (non-turbulente) parfaitement plane (1D) se propage dans un mélange immobile de gaz frais. Cette vitesse est d'une importance capitale car elle mesure la réactivité d'un mélange et sert de référence pour valider les mécanismes chimiques et les modèles utilisés en simulations numériques.

Les effets de la dilution sur cette vitesse sont bien documentés : en agissant comme un lest thermique et chimique, la flamme est moins chaude et plus lente ce qui est précisément l'effet recherché pour sécuriser l'usage de l'hydrogène. De plus, si les diluants sont **radiativement actifs**, une autre boucle physique se met en place. C'est le cas en particulier de la vapeur d'eau : contrairement aux molécules diatomiques homonucléaires majoritaires dans l'air (N_2 , O_2) ou au combustible (H_2) qui sont transparents dans l'infrarouge du fait de leur symétrie (absence de moment dipolaire), la molécule d'eau possède des modes de vibration-rotation actifs qui lui permettent d'absorber et d'émettre efficacement le rayonnement thermique. Ainsi, les gaz brûlés chauds émettent du rayonnement thermique infrarouge (cette partie est aussi vrai dans une flamme non-diluée) qui peut être en partie absorbé en amont de la flamme par les gaz frais dilués. Cette réabsorption entraîne un préchauffage des gaz frais avant le front de flamme. Une flamme plus chaude brûle plus vite donc le ralentissement attendu de la dilution peut être en partie compensé par ce préchauffage radiatif. L'ampleur de ce couplage dépend de plusieurs paramètres, incluant le taux de dilution $y_{\text{H}_2\text{O}}$ (fraction massique de vapeur d'eau dans les gaz frais) ou la richesse ϕ . Cette dernière est définie comme le rapport réel carburant/oxydant divisé par le même rapport dans des conditions stœchiométriques (combustion complète), et indique si le mélange est riche ($\phi > 1$) ou pauvre ($\phi < 1$) : ainsi, $\phi = 0,8$ correspond à un mélange pauvre où l'hydrogène est le réactif limitant et un léger excès d'oxygène subsiste après réaction.

La littérature s'est surtout intéressée au rôle refroidissant des pertes thermiques par rayonnement émis côté gaz brûlés, souvent jugé négligeable sur la vitesse de flamme lorsque les gaz frais (non-dilués) sont supposés transparents. La **réabsorption** possible par les gaz frais et le préchauffage associé est un angle très peu étudié. En effet, les deux communautés, combustion d'une part et rayonnement d'autre part, sont plutôt séparées et les simulations numériques couplées sont rares à cause du coût de calcul important que représente la capture simultanée de la chimie détaillée, le transport multi-espèces et le transfert radiatif spectral.

Motivation scientifique et positionnement du travail

Mon travail de thèse a ainsi consisté à comprendre en détails le couplage complexe entre combustion diluée et rayonnement thermique, en considérant l'émission des gaz brûlés et la possible réabsorption des gaz

frais, dans le contexte de la combustion décarbonée avec un mélange d'intérêt : H₂-Air-H₂O. Des simulations numériques dans une configuration géométrique simple (flammes 1D) mais pour une large gamme de conditions avec des variations du taux de dilution, de la richesse, et de la pression permettent d'isoler les mécanismes clefs du couplage combustion-rayonnement. Pour quantifier rigoureusement l'effet du préchauffage radiatif des gaz frais, chaque phénomène physique (chimie, transport, rayonnement) sera modélisé numériquement par les méthodes les plus précises possibles.

La question centrale qui guide ces travaux est ainsi : **dans quelles conditions et selon quels mécanismes le rayonnement thermique modifie-t-il de manière significative la structure et la vitesse des flammes hydrogène diluées ?**

3.2 Modélisation de la combustion prémélangée et du rayonnement thermique

Une flamme réelle, telle qu'on l'observe dans l'industrie, est un objet extrêmement complexe régi par la turbulence et des effets géométriques tridimensionnels. Pour parvenir à une compréhension fine des mécanismes physiques en jeu dans le couplage combustion-rayonnement, il est indispensable de simplifier le problème. Nous nous plaçons donc dans la configuration la plus fondamentale possible : une **flamme laminaire plane monodimensionnelle**. Ce choix permet une étude approfondie de l'impact du rayonnement sur la combustion diluée sans l'influence d'autres phénomènes complexes.

Flamme Prémélangée 1D Laminaire

Nous considérons une flamme plane se propageant dans un prémélange gazeux en régime établi. Physiquement, la vitesse de flamme S_ℓ (pour *laminar speed*) est la vitesse à laquelle la flamme avance dans des gaz frais au repos et les "consomme". Numériquement, on maintient la flamme immobile en injectant les gaz frais à une vitesse donnée ; le problème se réduit à une seule dimension x sans dépendance temporelle. S_ℓ est la valeur propre du système : c'est l'unique vitesse d'injection pour laquelle une solution stationnaire existe.

Le cadre théorique est celui de la mécanique des fluides réactifs : il s'agit d'une extension des équations de Navier-Stokes appliquées à un mélange multi-espèces. Dans le cas 1D, l'équation de quantité de mouvement se réduit, pour les faibles nombres de Mach caractéristiques de la combustion laminaire, à une pression quasi-constante. Le système est alors régi par les trois équations de conservation suivantes (masse globale, masse de chaque espèce, énergie) :

Conservation de la masse globale : $\frac{d(\rho u)}{dx} = 0$. Le débit massique ρu (produit de la masse volumique et de la vitesse) est constant à travers toute la flamme et vaut sa valeur dans les gaz frais (indice u) : $\rho_u S_\ell$.

Conservation de chaque espèce chimique : $\frac{d}{dx}(\rho u Y_k) = \frac{d}{dx}(\rho D_k \frac{dY_k}{dx}) + \dot{\omega}_k$ pour $k = 1 \dots N_{esp}$. La fraction massique Y_k de chaque espèce k évolue le long de x sous l'effet de deux phénomènes : la diffusion moléculaire (coefficient D_k) qui tend à lisser les gradients de concentration, et les réactions chimiques (terme source $\dot{\omega}_k$) qui produisent ou consomment l'espèce. En effet, contrairement à l'équation bilan globale souvent enseignée ($H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$), la combustion réelle fait intervenir de nombreuses espèces intermédiaires appelées radicaux (H, O, OH, HO_2 , etc.). Les simulations de cette étude utilisent un mécanisme chimique détaillé (Varga et al.) avec 12 espèces et 30 réactions élémentaires.

Conservation de l'énergie : $\frac{d}{dx}(\rho u c_p T) = \frac{d}{dx}(\lambda \frac{dT}{dx}) + \dot{Q}_{chim} + P_R$. La température T évolue sous l'effet combiné de la conduction thermique (conductivité λ), de la chaleur libérée par les réactions chimiques (\dot{Q}_{chim} , localisée dans le front de flamme) et d'un terme P_R représentant la puissance volumique échangée par **rayonnement thermique**. C'est ce dernier terme, absent des modélisations adiabatiques classiques ($P_R = 0$), qui est au cœur de cette étude.

Modélisation du rayonnement et couplage

Pour déterminer P_R (W/m³) en chaque point, il faut quantifier le rayonnement émis et absorbé localement. La grandeur de base est l'intensité radiative I_ν , qui correspond à l'énergie rayonnée par unité de temps, surface, angle solide et fréquence ν dans une direction s . Son intégrale sur toutes les directions et fréquences donne le flux radiatif \vec{q}_R (W/m²), dont P_R est la divergence : $P_R = -\nabla \cdot \vec{q}_R$. L'évolution de I_ν le long d'un trajet optique rectiligne est régie par l'**Équation de Transfert Radiatif** (ETR) :

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \underbrace{\kappa_\nu I_{b,\nu}(T)}_{\text{Émission}} - \underbrace{\kappa_\nu I_\nu}_{\text{Absorption}} \quad (1)$$

Cette équation traduit un bilan simple : le long d'un rayon lumineux, l'intensité augmente par émission thermique du milieu (premier terme, proportionnel à la luminance du corps noir $I_{b,\nu}$ à la température locale) et diminue par absorption (second terme). Le coefficient κ_ν , appelé coefficient d'absorption spectral, mesure la capacité du milieu à interagir avec le rayonnement à la fréquence ν . Il dépend de la température, de la composition du mélange et de la fréquence. Sous l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local valable ici, le même κ_ν gouverne émission et absorption.

C'est dans ce coefficient que réside la principale difficulté de la modélisation du rayonnement dans une géométrie 1D simple. En effet, les gaz de combustion comme la vapeur d'eau ne se comportent ni comme des corps noirs ($\kappa_\nu = 1$) ni même comme des corps gris ($\kappa_\nu = \text{cste} < 1$) : pour H_2O , κ_ν varie fortement avec la fréquence ν , via des millions de raies spectrales très fines. Résoudre l'ETR pour chaque raie serait numériquement hors de portée. Nous utilisons des modèles de bandes qui regroupent ces raies, ce qui permet de capturer la physique des échanges radiatifs en se limitant à environ un millier de résolutions de l'ETR.

Couplage multiphysique : comme le rayonnement dépend de la température et de la composition (qui dépendent elles-mêmes du rayonnement), la résolution est itérative : un solveur de combustion résout les équations de conservation (masse, espèces, énergie) avec un champ radiatif figé, puis un solveur radiatif résout l'ETR et en déduit P_R , qui est réinjecté dans l'équation de l'énergie, modifiant en retour la température. Ce processus est répété jusqu'à convergence, fournissant simultanément la structure et la vitesse de flamme S_ℓ .

3.3 Phénoménologie du couplage et préchauffage radiatif

Pour comprendre les implications physiques du système d'équations couplées, nous l'appliquons à un point de fonctionnement représentatif des conditions post-compression dans une turbine à gaz industrielle : un mélange H_2/Air injecté à 500 K, sous 5 bars, dilué par 30% de vapeur d'eau et avec une richesse $\phi = 0.8$ (rapport carburant/oxydant normalisé par la stoechiométrie, définie en section 3.1 ; ici $\phi < 1$ correspond à un mélange pauvre). Ces conditions sont choisies car elles correspondent à un cas réaliste où la dilution est suffisamment forte pour que le rayonnement puisse jouer un rôle significatif.

Analyse de la structure thermique d'une flamme diluée couplée

La Figure 1 compare les profils de température obtenus par une modélisation adiabatique classique ($P_R = 0$) et par la modélisation couplée incluant le rayonnement spectral détaillé. On retrouve les gaz frais à gauche et les gaz brûlés à droite séparés par une très fine zone de réaction, le front de flamme.

L'analyse comparée de ces profils révèle deux effets principaux du rayonnement :

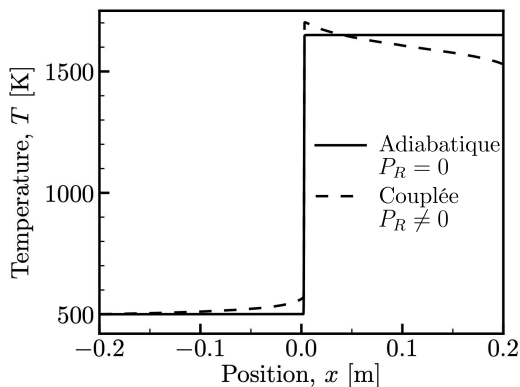


FIGURE 1 – Profils de température

- **En aval (Gaz brûlés, $x > 0$ sur la figure)** : dans le référentiel de la flamme, les gaz frais arrivent par la gauche, traversent le front de réaction puis s'en éloignent vers la droite en tant que gaz brûlés. De ce côté, la température décroît progressivement : les gaz chauds émettent du rayonnement thermique, perdant ainsi de l'énergie.
- **En amont (Gaz frais, à gauche sur la figure)** : contrairement au cas adiabatique où la température reste figée à T_u (500 K) jusqu'à la réaction, on observe dans le cas couplé une élévation progressive de plusieurs dizaines de degrés *avant* la zone de réaction. Ce préchauffage résulte de la réabsorption par la vapeur d'eau (présente dans les gaz frais dilués) du rayonnement émis par les gaz brûlés.

Il s'opère donc un transfert d'énergie radiatif de l'aval vers l'amont, des gaz brûlés vers les gaz frais. Ce transfert agit sur plusieurs centimètres, une distance considérable comparée à l'épaisseur du front de flamme lui-même (de l'ordre du millimètre). Ce préchauffage des gaz frais a deux conséquences principales : une température maximale dans les gaz brûlés supérieure à la température adiabatique de flamme et une augmentation de la vitesse de flamme. En effet, une flamme plus chaude brûle plus vite.

Pour quantifier ce dernier effet, on définit le facteur d'augmentation de vitesse par rayonnement, R :

$$R = \frac{S_{l,\text{couplé}} - S_{l,\text{adiabatique}}}{S_{l,\text{adiabatique}}} \quad (2)$$

La vitesse de flamme S_ℓ est directement fournie par le solveur de combustion. C'est la vitesse d'injection des gaz frais pour laquelle la flamme reste immobile donc qui donne une solution stationnaire. Dans le cas étudié, elle passe de $S_\ell = 22$ cm/s (adiabatique) à $S_\ell = 34$ cm/s (couplé), soit $R \approx 55\%$. Ignorer le rayonnement conduirait donc ici à une sous-estimation importante de la vitesse de flamme, c'est-à-dire de la réactivité du mélange de gaz frais.

Le résultat précédent peut sembler surprenant : les gaz frais passent de 500 K à ~ 570 K par préchauffage radiatif, soit une variation modeste comparée à la température après réaction (≈ 1800 K). Comment cette relativement faible augmentation de la température des gaz frais peut-elle produire une augmentation de 55% de la vitesse de flamme ? C'est que la vitesse de flamme, liée à la vitesse de consommation des réactifs, dépend de manière exponentielle de la température des gaz frais via la loi d'Arrhenius qui régit la cinétique chimique : un petit incrément de température suffit à augmenter considérablement les taux de réaction.

Analogie de la flamme adiabatique préchauffée

Pour vérifier que le préchauffage des gaz frais est bien le phénomène clé expliquant cette accélération de la flamme, nous définissons une température équivalente $T_u^{\text{eff}} = T_u + \Delta T_{\text{rad}}$, où $T_u = 500$ K et ΔT_{rad} correspond à l'élévation de température induite par l'absorption radiative mesurée juste devant le front de flamme. Il est ensuite possible de réaliser une simulation adiabatique simple mais en injectant les gaz frais directement à cette température T_u^{eff} au lieu de T_u . Ici, $T_u^{\text{eff}} = 568$ K.

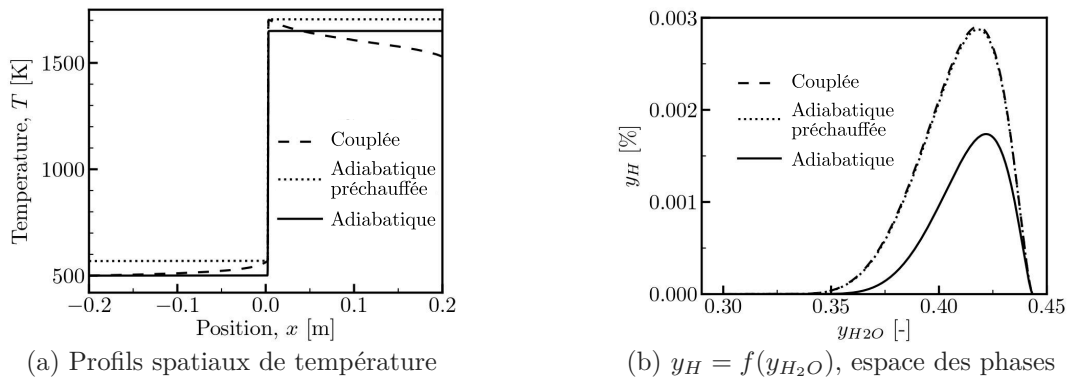


FIGURE 2 – Comparaison des modèles : Adiabatique, Couplé et Adiabatique Préchauffé

La Figure 2a compare les profils de température dans les trois cas : adiabatique à 500 K, couplée et adiabatique préchauffée. On constate d'abord que la température maximale de la flamme couplée est bien reproduite par la flamme adiabatique préchauffée. Pour aller plus loin, la Figure 2b représente la structure du front dans l'espace des phases : au lieu de tracer les grandeurs en fonction de la position x , on trace la fraction massique du radical H, notée y_H (un intermédiaire réactionnel clé, révélateur de l'activité chimique), en fonction de celle de H_2O , notée y_{H_2O} . Cette représentation a l'avantage de s'affranchir de la position spatiale et de comparer directement la chimie interne du front en "zoomant dedans" : si deux flammes suivent la même trajectoire dans cet espace, elles ont la même structure chimique. On observe que les courbes couplée et adiabatique préchauffée sont parfaitement superposées, confirmant que le rayonnement n'altère pas la chimie interne du front. Enfin, la vitesse de flamme de la simulation préchauffée ($S_\ell = 33.6$ cm/s) est remarquablement proche des 34 cm/s de la flamme couplée.

Cette validation confirme que, pour cette condition, le rayonnement agit uniquement comme un préchauffage des gaz frais en amont du front de flamme, sans modifier la structure interne de la zone de réaction. Cette observation ouvre une question importante : peut-on toujours réduire l'effet du rayonnement à un simple préchauffage des gaz frais, ou existe-t-il des conditions où le couplage est plus complexe ?

3.4 Analyse physique par les temps caractéristiques : les limites de l'analogie

Le modèle de la "flamme adiabatique préchauffée équivalente" est séduisant par sa simplicité : il permettrait de découpler le problème radiatif (un simple préchauffage en amont) du problème de combustion. Cependant, une exploration plus large de l'espace des paramètres montre que cette simplification n'est pas universelle.

Mise en évidence des limites de l'approche simplifiée

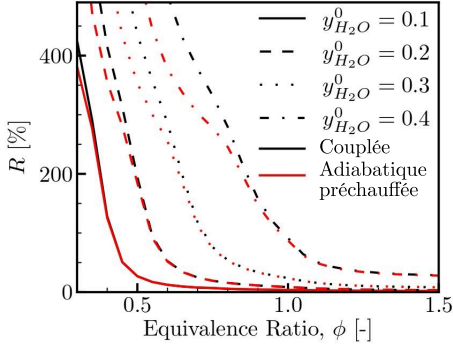


FIGURE 3 – Validité du modèle simplifié

Pour tester la robustesse de cette analogie, nous avons fait varier la richesse et le taux de dilution. La Figure 3 montre le facteur d'augmentation de vitesse R en fonction de la richesse ϕ pour quatre niveaux de dilution (quatre styles de courbes). Les courbes noires correspondent aux simulations couplées complètes (référence), les rouges au modèle simplifié avec des flammes adiabatiques préchauffées. Lorsque les deux courbes se superposent, le modèle fonctionne et l'effet du rayonnement se résume à un préchauffage des gaz frais en amont du front. On constate que c'est le cas pour les flammes assez riches (ϕ élevé) ou peu diluées (y_{H_2O} faible), mais qu'un écart significatif apparaît aux faibles richesses (ϕ faible) et fortes dilutions (y_{H_2O} élevé) : le modèle simplifié ne suffit plus.

Quelles sont ces flammes pour lesquelles le modèle échoue ? Ce sont les flammes les plus **pauvres** et/ou les plus **diluées**, c'est-à-dire des flammes particulièrement **lentes** et **épaisses**. L'idée physique est la suivante : pour qu'un phénomène ait un effet, il faut qu'il ait le *temps* d'agir. Dans une flamme rapide au front très fin, le rayonnement n'a pas le temps d'être absorbé au sein de la zone de réaction et agit uniquement sur les gaz frais en amont, qui s'étendent sur une distance beaucoup plus grande. Dans une flamme lente et épaisse, en revanche, le front est suffisamment large pour que le rayonnement y soit absorbé. Le couplage ne se réduit alors plus à un simple préchauffage en amont mais affecte aussi la structure interne de la flamme.

Compétition d'échelles de temps et régimes

Pour formaliser cette intuition, nous adoptons une approche par analyse dimensionnelle en comparant les échelles de temps des différents phénomènes physiques en compétition.

Nous définissons d'abord les temps caractéristiques de l'écoulement et de la réaction :

- $\tau_{\text{conv}} = L_u/S_l$: le temps de résidence convectif dans la zone de préchauffage, défini par le rapport entre la longueur de cette zone (L_u) et la vitesse de flamme.
- $\tau_{\text{chim}} = \delta_l/S_l$: le temps caractéristique de la réaction chimique, correspondant à la traversée de l'épaisseur de flamme δ_l sur laquelle la température varie fortement – c'est-à-dire la zone de la réaction chimique proprement dite.

Face à ces temps de transport, nous définissons par analyse dimensionnelle des **temps caractéristiques d'absorption radiative** : τ_{abs}^u dans les gaz frais et τ_{abs}^f dans le front de flamme. Ils mesurent la durée nécessaire pour que le milieu absorbe une fraction significative de l'énergie radiative incidente. Plus le milieu est absorbant (fort taux de vapeur d'eau), plus ces temps sont courts.

La physique du couplage est alors pilotée par deux nombres sans dimension comparant la vitesse des processus de transport/chimie à celle de l'absorption radiative :

$$\mathcal{N}_u = \frac{\tau_{\text{conv}}}{\tau_{\text{abs}}^u} \quad \text{et} \quad \mathcal{N}_f = \frac{\tau_{\text{chim}}}{\tau_{\text{abs}}^f} \quad (3)$$

Ces nombres permettent de discriminer trois régimes physiques distincts :

- **Régime Transparent (WeakAbs)** : Si $\mathcal{N}_u \ll 1$ et $\mathcal{N}_f \ll 1$. L'absorption est beaucoup trop lente par rapport à la convection et à la chimie. Le rayonnement traverse le milieu sans interagir notablement. Les effets sont négligeables, on retrouve la flamme adiabatique classique.
- **Régime Radiatif-Convectif (RadConv)** : Si $\mathcal{N}_u \sim 1$ mais $\mathcal{N}_f \ll 1$. Le temps de résidence dans les gaz frais est suffisant pour absorber le rayonnement ($\tau_{\text{conv}} \sim \tau_{\text{abs}}^u$), créant un préchauffage significatif. En revanche, la traversée du front de flamme reste trop rapide par rapport à l'absorption ($\tau_{\text{chim}} \ll \tau_{\text{abs}}^f$). On a un découplage des phénomènes : le rayonnement agit en amont, la chimie agit dans le front. C'est le domaine de validité de notre modèle de "flamme adiabatique préchauffée".
- **Régime Radiatif-Chimique (RadChem)** : Si $\mathcal{N}_u \sim 1$ et $\mathcal{N}_f \sim 1$. La flamme est suffisamment lente et épaisse pour que l'absorption radiative soit significative *même* au sein du front de flamme, en plus d'être toujours importante dans les gaz frais. Le couplage est fort et l'analogie du simple préchauffage ne suffit plus à capturer toute la complexité de l'effet du rayonnement sur la structure de flamme.

3.5 Synthèse : Cartographie des régimes et implications pour la modélisation

Cartographie des régimes pour H₂-Air-H₂O

L'analyse dimensionnelle précédente permet de classer n'importe quelle flamme diluée dans les différents régimes. La Figure 4 présente une telle cartographie pour les mélanges H₂-Air-H₂O à 5 bars, en fonction de la richesse (ϕ) et du taux de dilution (y_{H_2O}).

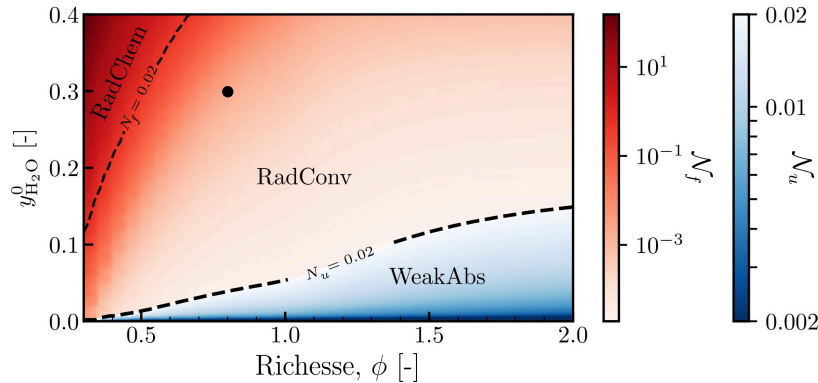


FIGURE 4 – Cartographie des régimes (H₂-Air-H₂O à 5 bars)

Sur cette carte, chaque point correspond à une flamme caractérisée par sa richesse (axe horizontal) et son taux de dilution en vapeur d'eau (axe vertical). La couleur du point est donnée par la valeur de \mathcal{N}_u et \mathcal{N}_f comme représenté sur les deux échelles de couleur à droite. Les deux lignes en tirets délimitent les frontières entre les trois régimes identifiés précédemment, tracées à partir du seuil $\mathcal{N} = 0.02$ (utilisé pour quantifier la condition mathématique " $\ll 1$ "). En bas à droite (très faible dilution et/ou mélange riche), on retrouve le régime WeakAbs où le rayonnement est négligeable. En montant en dilution, on entre d'abord dans la zone RadConv où le rayonnement agit seulement comme un préchauffage des gaz frais puis dans la zone RadChem où on a un couplage fort combustion-rayonnement jusque dans le front de flamme. Le cas étudié en détail précédemment ($\phi = 0.8$, 30% H₂O, point noir sur la cartographie) se situe dans la zone RadConv, ce qui est cohérent avec le succès du modèle de flamme adiabatique préchauffée pour cette condition.

Cette cartographie révèle deux informations capitales :

1. **Pertinence physique de la classification** : Les trois régimes identifiés théoriquement sont effectivement peuplés par des flammes réelles.
2. **Confirmation de l'analyse physique** : La zone RadChem ($\mathcal{N}_u > 0.02$ et $\mathcal{N}_f > 0.02$) regroupe précisément les conditions où notre modèle simplifié de "flamme adiabatique préchauffée" échouait, c'est-à-dire les flammes très pauvres et/ou très diluées. Cela valide a posteriori l'hypothèse d'un couplage fort intra-flamme pour ces conditions.

Cette classification fournit un guide pratique pour les ingénieurs et chercheurs :

- En zone **WeakAbs**, le rayonnement peut être négligé (modèles adiabatiques classiques suffisants).
- En zone **RadConv**, l'effet du rayonnement peut être capturé par le modèle simplifié de flamme adiabatique préchauffée, évitant le recours à des simulations couplées coûteuses.
- En zone **RadChem**, le couplage est fort : il est impératif d'utiliser des simulations complètement couplées résolvant l'ETR, malgré leur coût élevé.

Conclusion

Ces travaux ont permis de mettre en lumière et de quantifier l'impact majeur du rayonnement thermique sur les flammes d'hydrogène diluées, un mélange clé pour la transition énergétique. Nous avons montré que loin d'être négligeable, le rayonnement peut accélérer la flamme de plus de 50% via un mécanisme de préchauffage des gaz frais. L'identification des régimes physiques et le développement de modèles simplifiés offrent des outils concrets pour intégrer cette physique dans les codes de calcul industriels. Toutefois, cette étude s'est restreinte à la brique élémentaire de la flamme plane laminaire. La réalité des foyers industriels étant intrinsèquement turbulente et tridimensionnelle, la prochaine étape consiste à confronter ces mécanismes fondamentaux à la complexité des flammes turbulentes dans des géométries réalistes.

4 - Activités pédagogiques

La physique de l'énergie – des échanges radiatifs qui régissent le climat aux combustibles qui alimentent nos sociétés – occupe une place croissante dans les programmes. Mes expériences de recherche, d'enseignement et de médiation m'ont amenée à concevoir deux activités pédagogiques ancrées dans des questions auxquelles mes futurs élèves seront confrontés en tant que citoyens : la première, un TP sur le rôle des propriétés radiatives dans l'échauffement des surfaces, introduit la notion d'albédo ; la seconde, une activité documentaire, compare les bilans énergétiques et environnementaux de la combustion du méthane et de l'hydrogène.

Activité 1 – Albédo et bilan radiatif terrestre

Niveau : 1^{ère} Enseignement Scientifique

Thème : Le Soleil, notre source d'énergie – Le bilan radiatif terrestre

Durée : 1 à 2 h (adaptable en une ou deux séances)

Matériel : 3 feuilles d'aluminium identiques (une nue, une peinte en noir, une peinte en blanc) ; sonde de température ; lampe à incandescence ; chronomètre ; ordinateur pour le tracé des courbes

Objectifs d'apprentissage

- Comprendre que l'échauffement d'un corps par rayonnement dépend de sa capacité à absorber et réfléchir ce rayonnement.
- Mettre en évidence expérimentalement l'influence de la nature d'une surface sur les échanges radiatifs.
- Définir et utiliser la notion d'albédo. Appliquer au bilan radiatif terrestre et au changement climatique.

Cette activité prend la forme d'un TP en binômes ou trinômes. Elle met en œuvre une véritable démarche scientifique – partir d'une question sur le monde réel, formuler des hypothèses, tester expérimentalement en comparant des cas, puis confronter les observations à un modèle – mobilisant des compétences expérimentales que j'ai pu développer lors de mes expériences d'enseignement et de médiation scientifique.

Déroulé

1. **Mise en situation** (5 min) – « 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 ? »
2. **Phase expérimentale** (20–30 min)
 - Les élèves placent les trois plaques à égale distance de la lampe et mesurent la température pendant 5 minutes d'exposition.
 - Ils coupent la lampe et enregistrent le refroidissement pendant 5 minutes.
 - Ils tracent les courbes de chauffe et de refroidissement des trois plaques sur un même graphe.
3. **Analyse et interprétation** (15–20 min)
 - Comparer les températures maximales atteintes et les vitesses de refroidissement. En déduire que la plaque noire absorbe et émet davantage que la blanche, et que la plaque métallique nue réfléchit l'essentiel du rayonnement.
 - Définir l'albédo A comme la fraction de puissance radiative réfléchiée par une surface. Classer les trois plaques par albédo croissant.
 - Appliquer à la Terre : la fonte des glaces (fort albédo) remplacées par de l'océan (faible albédo) amplifie le réchauffement – c'est une rétroaction positive du changement climatique.
4. **Prolongement** (optionnel) – Évoquer qualitativement que la puissance émise par un corps croît très rapidement avec sa température (loi de Stefan-Boltzmann, $P = \sigma T^4$, au programme de Terminale Spécialité) et que l'équilibre thermique résulte du bilan entre puissance absorbée et puissance émise.

5. **Ouverture** – Au-delà du bilan radiatif terrestre, cette introduction au rayonnement thermique permet de souligner que ce mode de transfert de chaleur est omniprésent : de la bougie que les élèves ont chez eux jusqu'aux flammes industrielles étudiées dans ma thèse, où le rayonnement de la vapeur d'eau joue un rôle central.

Activité 2 – Méthane ou hydrogène : quel combustible pour la transition énergétique ?

Niveau : Terminale Générale, Spécialité Physique-Chimie

Thème : Constitution et transformations de la matière – Transformations chimiques

Prérequis : Énergies de liaison (programme de Première Spécialité)

Durée : 2 h

Objectifs d'apprentissage

- Écrire et équilibrer l'équation de combustion complète d'un combustible dans le dioxygène.
- Utiliser les énergies de liaison pour estimer l'énergie libérée par une réaction et identifier son caractère exothermique.
- Comparer quantitativement deux combustibles en termes d'énergie libérée par unité de masse.
- Analyser les produits de combustion en termes d'impact environnemental (émissions de CO_2).

Cette activité documentaire, réalisée en groupes de 3 ou 4 élèves, ancre les notions de chimie dans un enjeu de société concret. La transition énergétique est un sujet que les élèves rencontrent quotidiennement dans les médias ; cette activité leur donne les outils quantitatifs pour dépasser les discours généraux et comparer rigoureusement deux combustibles d'actualité.

Documents fournis aux élèves

- **Document 1 :** Table d'énergies de liaison et masses molaires du méthane et du dihydrogène.
- **Document 2 :** Schéma de principe de la combustion dans un brûleur industriel avec les notions de réactifs (combustible + comburant) et de produits.
- **Document 3 :** Court texte sur l'hydrogène comme vecteur d'énergie pour la transition énergétique, mentionnant ses avantages (pas de CO_2 , forte énergie massique) et ses défis (stockage, forte réactivité, coût de production verte).

Questions

1. Écrire les équations de combustion complète du méthane ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \dots$) et du dihydrogène ($\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \dots$). Identifier les produits dans chaque cas.
2. À l'aide du Document 1, calculer l'énergie libérée par la combustion d'une mole de méthane, puis d'une mole de dihydrogène. Vérifier que ces réactions sont exothermiques.
3. Calculer l'énergie libérée par kilogramme de combustible brûlé. Quel combustible libère le plus d'énergie par unité de masse ? Commenter.
4. Parmi les produits identifiés à la question 1, lequel est un gaz à effet de serre ? Calculer la masse de CO_2 émise par MJ d'énergie produite pour le méthane. Comparer avec le dihydrogène.
5. *Pour aller plus loin :* l'hydrogène semble être le combustible idéal. À l'aide du Document 3, identifier au moins deux obstacles à son utilisation à grande échelle.

Ouverture – La forte réactivité de l'hydrogène (question 5) signifie que ses flammes brûlent très vite et très chaud, favorisant la formation de polluants (NO_x). Pour y remédier, on peut diluer le mélange avec de la vapeur d'eau recirculée (procédé EGR, présenté en section 3). C'est dans ce contexte que s'inscrivent mes travaux de thèse, où j'ai étudié comment cette dilution, combinée au rayonnement thermique de la vapeur d'eau, modifie la vitesse de propagation de la flamme.