

ARTICLES

Le mélange gaz naturel/hydrogène : un combustible alternatif pour réduire les émissions polluantes

Natural gas/hydrogen blends: An alternative fuel to reduce pollutants emissions

Solène de FERRIERES*, Guillaume VANHOVE*, Abderrahman EL BAKALI*,
Jean-François PAUWELS*, Micheline MONTERO**

Résumé

Propulser un véhicule avec un mélange de combustibles gaz naturel/hydrogène est une première étape vers un déploiement plus significatif de l'hydrogène. Ces mélanges permettraient de limiter les problèmes liés aux émissions polluantes des véhicules essences et diesels et d'améliorer la qualité de l'air.

L'hydrogène est un combustible propre sans émission de carbone : la combustion de l'hydrogène produit seulement de l'eau et une quantité réduite d'oxydes d'azote, limitant ainsi considérablement la pollution locale. De plus, les émissions de CO₂, principal gaz à effet de serre en volume, sont soumises à des normes sévères.

L'incorporation progressive d'hydrogène dans le mix énergétique peut accroître l'indépendance énergétique et permettre de développer des alternatives.

Cet article fait le point sur les avantages et les inconvénients du combustible hydrogène. Les différentes techniques de laboratoire utilisées au PC2A pour caractériser précisément la combustion de mélanges hybrides gaz naturel/hydrogène dans des brûleurs et dans des conditions moteur sont présentées : analyse chimique de l'évolution des espèces dans des flammes gaz naturel/hydrogène et analyse de l'auto-inflammation de mélanges gaz naturel/hydrogène en condition moteur dans une machine à compression rapide. L'objectif de ces études, expérimentales et de simulation, est de mettre au point et valider en laboratoire un mécanisme chimique détaillé de combustion des mélanges hybrides gaz naturel/hydrogène. Ce mécanisme sera ensuite introduit, éventuellement sous forme réduite, dans un code de simulation 3D du fonctionnement d'un brûleur ou d'un moteur automobile pour tester sa faisabilité et le respect des normes environnementales de rejets polluants.

Mots clés

Gaz naturel. Polluant. Hydrogène. Combustion. Cinétique chimique. Pollution atmosphérique.

* *Physicochimie des processus de combustion et de l'atmosphère (PC2A), UMR CNRS 8522 – Université des Sciences et Technologies de Lille – 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex. E-mail : abderrahman.el-bakali@univ-lille1.fr*

** *GDF SUEZ – Direction de la Recherche – B.P. 33 – 93211 Saint-Denis-La-Plaine Cedex.*

Abstract

Vehicles fuelled by natural gas/hydrogen blends are a first step toward a significant hydrogen deployment. These natural gas/hydrogen blends can partially solve pollution problems and increase air quality.

Hydrogen is a clean fuel with no carbon emissions; the combustion of hydrogen produces only water and a reduced amount of nitrogen oxides, that limits in a significant way, local pollution. Furthermore CO₂, first greenhouse gas, is subject to stringent regulations. The progressive incorporation of hydrogen in the energy mix may increase the energetic independence.

This paper points the advantages and inconvenient of hydrogen fuel. The different techniques used in PC2A laboratory to analyse precisely natural gas/hydrogen blends combustion in burners and in engine conditions are presented: Experimental mole fraction profiles for stable species in natural gas/hydrogen flames and auto-ignition analyses in a rapid compression machine. The aim of these experimental and numerical studies is to build and validate a detailed kinetic mechanism of natural gas/hydrogen blends combustion. This mechanism will after be used in 3D codes of the working of a burner or an engine to test the respect of environmental regulations.

Keywords

Natural gas. Pollutant. Hydrogen. Kinetics. Atmospheric pollution.

1. Pourquoi un mélange gaz naturel/hydrogène ?

Propulser un véhicule avec un mélange de combustibles gaz naturel/hydrogène est une première étape vers un déploiement plus significatif de l'hydrogène. Ces mélanges permettraient de limiter les problèmes de pollution et d'améliorer la qualité de l'air.

L'hydrogène est un combustible propre sans émission de carbone : sa combustion produit seulement de l'eau et une quantité réduite d'oxydes d'azote, limitant ainsi considérablement la pollution locale. La combustion, en substituant les combustibles fossiles par de l'hydrogène, peut conduire à une réduction des émissions de CO₂ à condition que l'hydrogène soit produit de manière propre.

En effet, bien qu'on le trouve en abondance dans l'univers, l'hydrogène est un gaz qui n'existe pas à l'état naturel. L'hydrogène n'est donc pas une énergie primaire mais un vecteur énergétique. On peut le produire à partir de combustibles fossiles ou d'énergies renouvelables. Si l'hydrogène est produit à partir d'énergies fossiles comme le reformage du gaz naturel, solution la plus économique aujourd'hui, il faut régler le problème des émissions de CO₂ dégagées lors de sa production (par exemple par captage et stockage du CO₂), sous peine d'annuler l'un de ses principaux atouts, notamment si cet hydrogène n'est pas utilisé dans une pile à combustible. Les émissions de CO₂, principal gaz à effet de serre en volume, sont soumises à des normes sévères. La Commission européenne s'est engagée à réduire les émissions de CO₂ de 8 % entre 1990 et 2012, conformément au protocole de Kyoto. La lutte contre le changement climatique est donc devenue une priorité dans les politiques de l'environnement, de l'énergie et de la recherche. L'incorporation progressive d'hydrogène

dans le mix énergétique peut accroître l'indépendance énergétique et permettre de développer des alternatives.

Même si l'hydrogène est vu comme un futur vecteur d'énergie clé, il y a plusieurs points de résistance sur le plan technique et sur l'aspect économique. Premièrement, les technologies relatives à la production, au stockage et à la distribution doivent être développées de sorte que l'on puisse utiliser l'hydrogène comme un combustible usuel. Deuxièmement, les limites d'inflammabilité de l'hydrogène sont très étendues. Cela nécessitera de redéfinir certaines normes de sécurité. Les mélanges gaz naturel/hydrogène peuvent être un moyen de transition vers un déploiement plus important de « l'hydrogène énergie ». La combustion de ces mélanges permettrait une réduction globale des émissions et permettrait rapidement d'incorporer de l'hydrogène dans le paysage énergétique, pour travailler sur l'ensemble des verrous qui freinent encore son développement (réglementation, technologies...).

2. Techniques expérimentales développées au laboratoire PC2A pour caractériser la combustion de mélanges hybrides gaz naturel/hydrogène

Les différentes techniques de laboratoire utilisées au PC2A pour caractériser précisément la combustion de mélanges hybrides gaz naturel/hydrogène dans des brûleurs et dans des conditions moteur sont présentées : analyse de l'évolution des espèces chimiques dans des flammes gaz naturel/hydrogène et analyse de l'auto-inflammation de mélanges gaz naturel/hydrogène en condition moteur dans une machine à compression rapide.

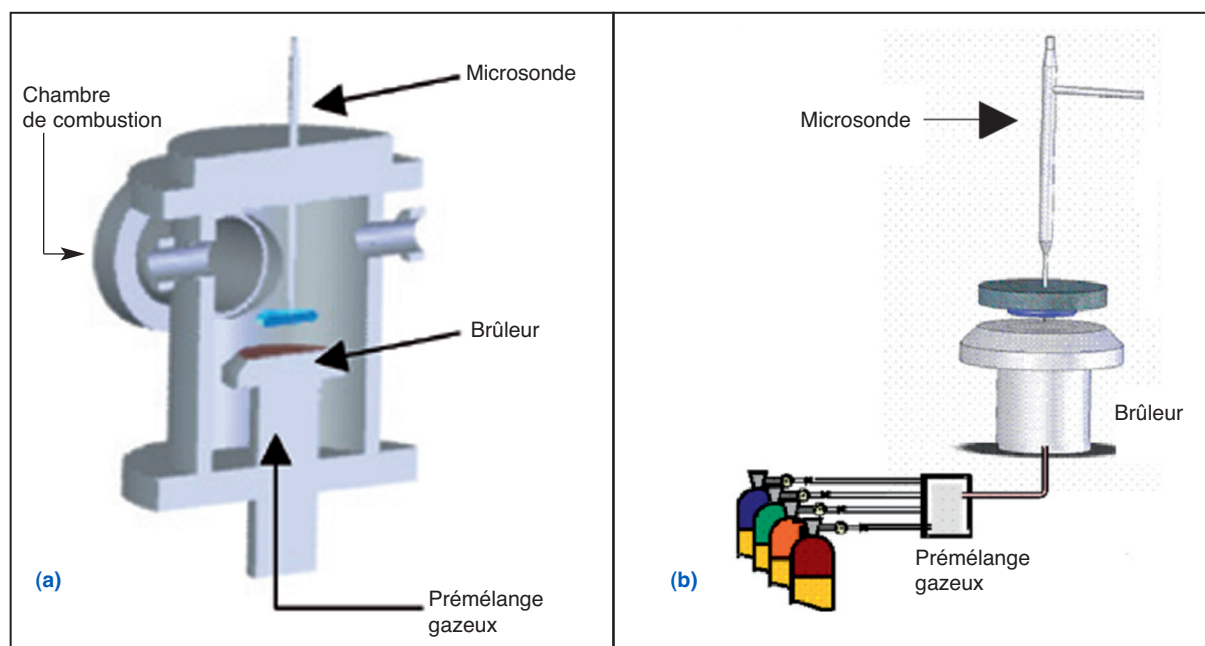


Figure 1.

Schéma du dispositif expérimental de stabilisation de flamme à basse pression (a) et à pression atmosphérique (b).
Diagram of the experimental set-up of flame stabilization of low pressure flames (a) and atmospheric pressure flames (b).

2.1. Les brûleurs

Deux types différents de dispositifs de stabilisation de flammes à pression atmosphérique et à basse pression sont utilisés. Un dispositif à basse pression, reconnaissable par l'enceinte sous vide qui entoure le brûleur (Figure 1a) et un dispositif à pression atmosphérique (Figure 1b).

Les flammes laminaires, prémélangées et plates sont stabilisées sur le brûleur. En déplaçant le brûleur (dispositif (a)) ou la microsonde en translation (dispositif (b)), des échantillons gazeux sont prélevés par différence de pression avec une microsonde en quartz dans les différentes zones de la flamme étudiée. Ce type de brûleur permet d'obtenir une vitesse des gaz frais homogène sur toute la surface du brûleur et une flamme à caractère unidimensionnel.

Des flammes plates prémélangées ont été étudiées dans les conditions stœchiométriques en combustible ($\phi = 1,0$). Trois prémélanges sont analysés : un mélange GN/O₂/N₂, un mélange (80 % GN/20 % H₂)/O₂/N₂ et un mélange 40 % GN/60 % H₂/O₂/N₂ à pression atmosphérique et basse pression (Tableau 1). Le gaz naturel (GN) synthétique utilisé est le mélange de combustibles 89 % CH₄/9 % C₂H₆/2 % C₃H₈, représentatif du gaz naturel originaire d'Algérie.

Les conditions d'analyse ont été fixées de manière à examiner l'effet de la substitution d'une partie du gaz naturel par de l'hydrogène.

La substitution d'hydrogène au gaz naturel rend le front de flamme plus diffus et moins lumineux comme le montrent les photographies (Figure 2) et l'imagerie des flammes réalisée à l'aide d'une caméra CCD

Tableau 1.
Conditions de stabilisation des flammes étudiées.
Conditions of flame stabilization under study.

	Flamme	X _{CH₄}	X _{C₂H₆}	X _{C₃H₈}	X _{H₂}	X _{O₂}	X _{N₂}	D _T (L/h)
P = 0.08 atm	GN	7,8.10 ⁻²	7,9.10 ⁻³	1,8.10 ⁻³	—	0,19	0,72	310
	80 % GN/20 % H ₂	7.10 ⁻²	7,1.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	2.10 ⁻²	0,18	0,72	310
	40 % GN/60 % H ₂	4,6.10 ⁻²	4,6.10 ⁻³	1.10 ⁻³	7,8.10 ⁻²	0,15	0,72	310
P = 1 atm	GN	6,08.10 ⁻²	6,1.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³	—	0,15	0,78	1 261
	80 % GN/20 % H ₂	5,4.10 ⁻²	5,5.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³	1,5.10 ⁻²	0,14	0,78	1 261
	40 % GN/60 % H ₂	3,57.10 ⁻²	3,6.10 ⁻³	8.10 ⁻⁴	6.10 ⁻²	0,1181	0,7817	1 262

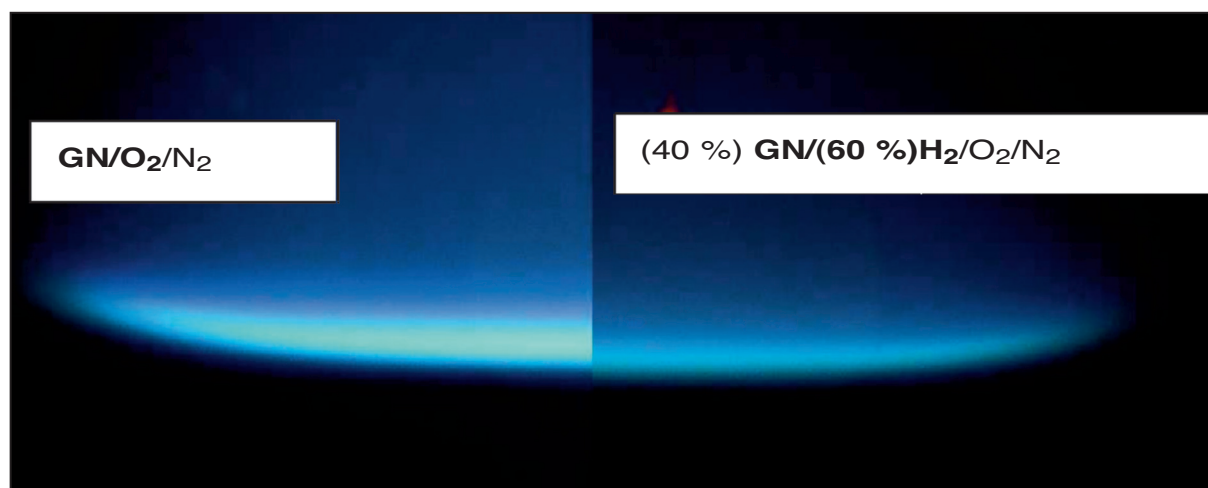


Figure 2.

Photographies des flammes GN et 40 % GN/60 % H₂ (P = 0.08 atm).

Pictures of NG flames and of 40% NG/60% H₂ flames (P = 0.08 atm).

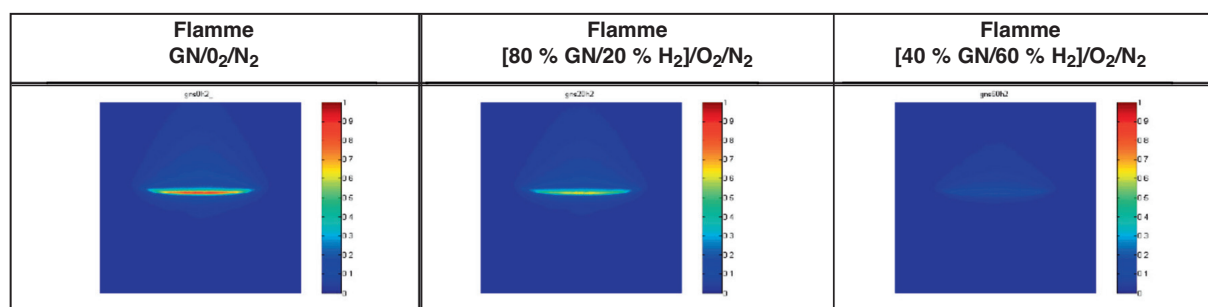


Figure 3.

Imagerie des flammes GN, 80 %GN/20 % H₂ et 40 %GN/60 % H₂ (P = 0.08 atm).

Images of NG flames, 80% NG/20% H₂ and 40% NG/60% H₂ flames (P = 0.08 atm).

intensifiée (Figure 3). L'intensité lumineuse est due à l'émission des radicaux excités CH* (violet bleu), C₂* (vert), CHO*. La baisse d'intensité lumineuse liée à une baisse des radicaux CH* et C₂* provient de la diminution de la quantité de carbone initialement présent dans la flamme.

Le principal atout de l'étude à basse pression est d'avoir un front de flamme (zone visible) plus large, ce qui permet une meilleure précision sur les positions et donc sur la résolution des profils d'évolution des espèces. De plus, cela permet de tester les mécanismes cinétiques représentatifs de la combustion des mélanges GN/H₂/O₂/N₂ sur un domaine de pression plus étendu (c.f. paragraphe 2.3). Ces mécanismes, pour le cinéticien, sont élaborés de façon très détaillée. Pour d'autres applications, ils pourront être réduits et introduits dans des modèles de simulation numérique bi- ou tridimensionnels industriels. Comme nous nous intéressons à la réactivité des espèces issues de la combustion de mélanges gaz naturel/hydrogène, il est nécessaire d'utiliser une chimie complexe et de s'affranchir des

problèmes de dynamique des fluides. Pour cela, les flammes étudiées sont prémélangées laminaires et monodimensionnelles (plates).

L'étude à pression atmosphérique permet quant à elle de se rapprocher des conditions réelles (brûleur domestique, turbines à gaz...). Par contre, le front de flamme est beaucoup moins large qu'à basse pression en raison d'une augmentation du libre parcours moyen des radicaux, celui-ci étant inversement proportionnel à la pression (Figure 4).

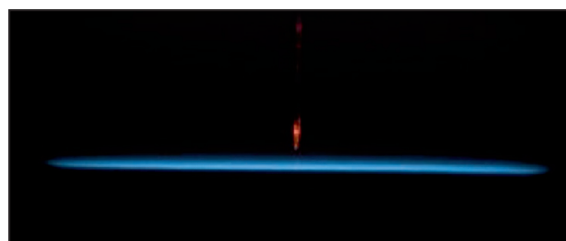


Figure 4.

Photographie d'une flamme GN à pression atmosphérique (P = 1.0 atm).

Pictures of a NG flame at atmospheric pressure (P = 1.0 atm).

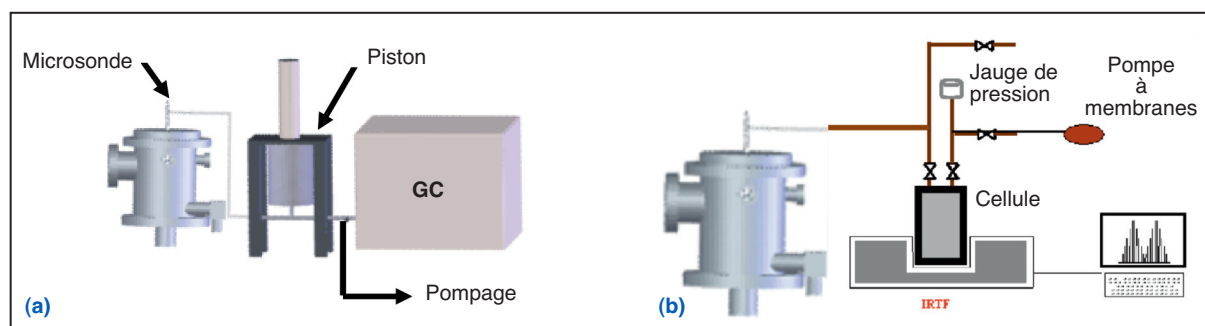


Figure 5.

Schéma des dispositifs expérimentaux d'analyse de la structure de flamme : GC/MS et IRTF.

Installation for flame structure analysis: GC/MS and IRTF.

2.1.1. Le dispositif expérimental

Les profils d'évolution des espèces chimiques présentes dans les flammes sont obtenus grâce à deux techniques d'analyse complémentaires (Figure 5) :

- la chromatographie en phase gazeuse (GC) (Agilent 6890N ou Varian CP-3800) couplé à un spectromètre de masse (Varian 1200) ;
- la spectroscopie d'absorption infrarouge à transformée de Fourier (IRTf).

La chromatographie en phase gazeuse permet d'analyser les espèces hydrocarbonées (colonne capillaire HP-Plot Al_2O_3 , détecteur à ionisation de flamme), l'hydrogène, oxygène, azote et le monoxyde de carbone (colonne tamis moléculaire, détecteur à conductivité thermique) ainsi que le dioxyde de carbone (colonne Poraplot Q, détecteur à conductivité thermique). Les espèces sont directement étalonnées : des mélanges de concentrations connues (MicroMAT, précision $\pm 2\%$) permettent la détermination des coefficients de sensibilité pour chaque espèce.

La spectroscopie d'absorption infrarouge à transformée de Fourier (IRTf) permet l'analyse quantitative des espèces H_2O , CO , CO_2 . Les effluents gazeux à analyser sont prélevés au sein du milieu réactionnel (flamme) au moyen de la même microsonde que pour les analyses chromatographiques. Une pompe à palettes biétagée permet d'assurer le prélèvement et d'acheminer directement l'échantillon dans une cellule à gaz ($V = 2\text{L}$) chauffée (100°C) couplée au spectromètre IRTf. Les espèces chimiques présentes dans l'échantillon gazeux sont analysées lors de leur passage dans la cellule selon un trajet optique de 10 mètres. Quinze scans sont effectués pour une résolution de 1 cm^{-1} . L'étalonnage est réalisé à l'aide d'échantillons de différentes concentrations connues de H_2O , CO , CO_2 .

Les profils de température, indispensables pour procéder à la modélisation des phénomènes, sont obtenus avec un thermocouple recouvert Pt/Rh 6 %-Pt/Rh 30 %. Les pertes de chaleur par conduction sont négligées en plaçant le thermocouple dans un

plan parallèle au brûleur. Les pertes par radiation sont corrigées en utilisant une méthode de compensation électrique. Les erreurs au pic de température sont estimées à $\pm 100\text{ K}$.

2.1.2. Résultats expérimentaux

Sur la Figure 6 sont présentés les profils d'évolution du réactif méthane à basse pression et à pression atmosphérique. Lorsqu'une partie du gaz naturel est substituée par de l'hydrogène, la fraction de carbone initial diminue. Les fractions molaires initiales de méthane diminuent en présence d'hydrogène. La Figure 6 présente également le profil de fraction molaire de l'oxygène. Afin de conserver une richesse constante, il est nécessaire de diminuer la fraction molaire initiale de l'oxygène, car la combustion de l'hydrogène nécessite moins d'oxygène que celle du méthane.

L'hydrogène présent dans le combustible conduit à une diminution en carbone initial par rapport à la flamme de gaz naturel. Par conséquent, les fractions molaires maximales des espèces intermédiaires hydrocarbonées diminuent en présence d'hydrogène (Figure 7 et Tableau 2). Un plus grand nombre d'espèces intermédiaires hydrocarbonées, telles que l'éthylène, l'acétylène, le propène, le propyne, le n-butane, l'isobutane, le trans-2-butène, le cis-2-butène, le 1-butène, l'isobutène et le 1,3-butadiène sont analysées. Seuls les profils de l'éthylène et de l'acétylène seront présentés. Les résultats expérimentaux complets à basse pression sont publiés dans [1].

L'effet de l'hydrogène est limité dans le cas des flammes 80 % GN/20 % $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$: les fractions molaires maximales de l'éthylène et de l'acétylène diminuent de l'ordre de 20 %. L'effet est beaucoup plus significatif dans le cas des flammes stœchiométriques 40 % GN/60 % $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$. L'acétylène est l'espèce intermédiaire la plus sensible à la présence de l'hydrogène. Sa fraction molaire maximale diminue de 80 % à basse pression et 70 % à pression atmosphérique. Celle de l'alcène majoritaire, l'éthylène, diminue de 70 % à basse pression et à pression atmosphérique.

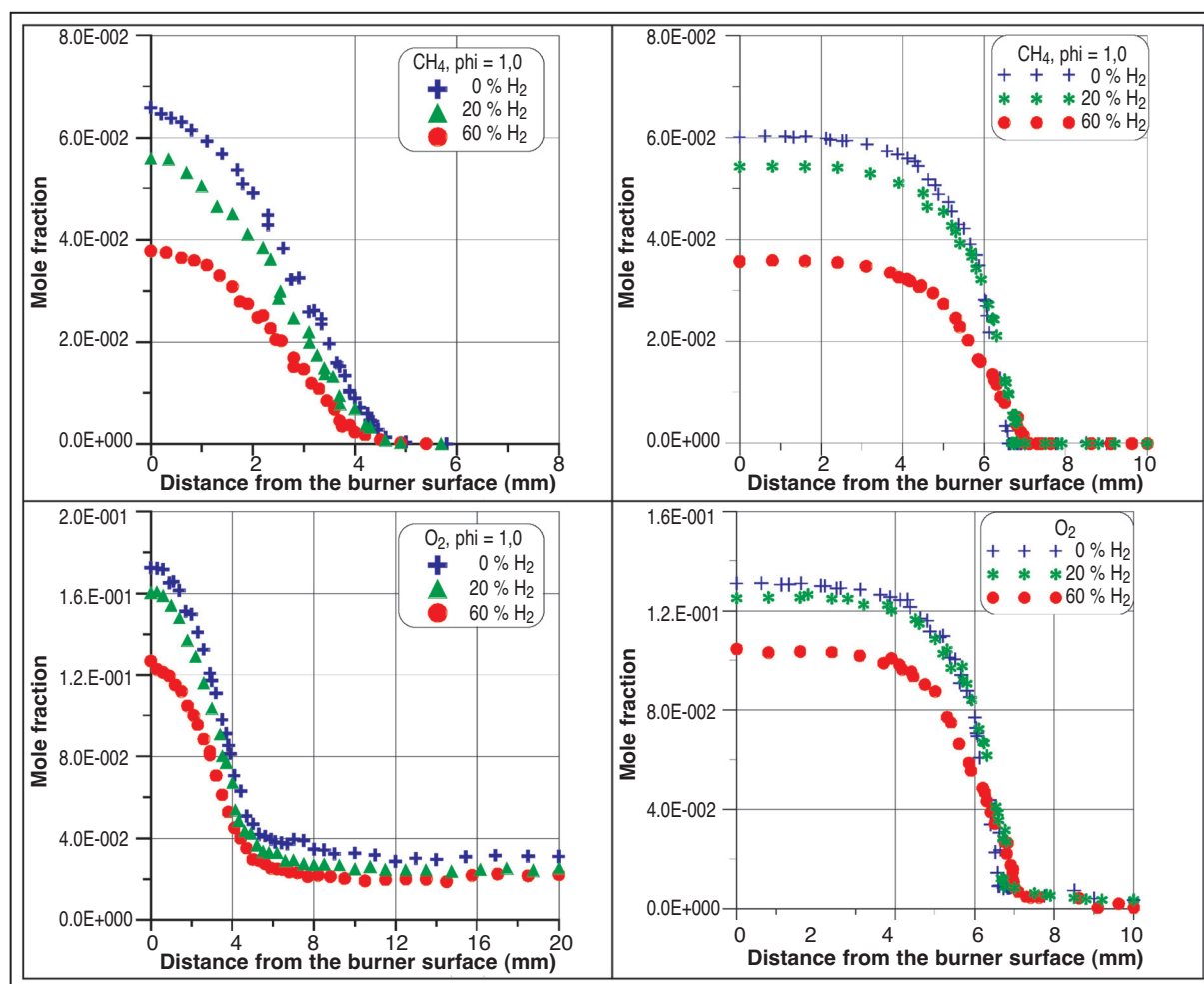


Figure 6.

Profil de fraction molaire du méthane et de l'oxygène mesurés par GC dans les différentes flammes GN/(0, 20, 60 % H₂)/O₂/N₂ stœchiométriques à basse pression (figures de gauche) et à pression atmosphérique (figures de droite).

Profiles of mole fraction of methane and oxygen measured by GC in different NG stoichiometric flames, NG/(0, 20, 60% H₂)/O₂/N₂ at low pressure (left) and at atmospheric pressure (right).

Tableau 2.

Fractions molaires maximales des espèces intermédiaires hydrocarbonées C₂H₄ et C₂H₂ et fractions molaires de CO et CO₂ dans les gaz brûlés dans le cas des flammes GN/H₂/O₂/N₂ stœchiométriques.

Maximum mole fractions of intermediary hydrocarbon species C₂H₄ and C₂H₂ and mole fractions of CO and CO₂ in burnt gases in stoichiometric flames NG/H₂/O₂/N₂.

		Éthylène	Acétylène	Monoxyde de carbone	Dioxyde de carbone	Eau
	Flamme	Fraction molaire maximale	Fraction molaire maximale	Fraction molaire finale	Fraction molaire finale	Fraction molaire finale
P = 0.08 atm	GN	1,69. 10 ⁻³	5,75. 10 ⁻⁴	2,32. 10 ⁻²	8,04. 10 ⁻²	0,131
	80 % GN/20 % H ₂	1,34. 10⁻³	4,36. 10⁻⁴	2,01. 10 ⁻²	7,08. 10 ⁻²	0,128
	40 % GN/60 % H ₂	4,97. 10⁻⁴	1,08. 10⁻⁴	1,25. 10 ⁻²	4,96. 10 ⁻²	0,133
P = 1 atm	GN	7,39. 10 ⁻⁴	1,79. 10 ⁻⁴	5,43. 10 ⁻³	6,27. 10 ⁻²	0,129
	80 % GN/20 % H ₂	6,43. 10 ⁻⁴	1,54. 10 ⁻⁴	5,09. 10 ⁻³	5,70. 10 ⁻²	0,129
	40 % GN/60 % H ₂	3,24. 10 ⁻⁴	6,12. 10 ⁻⁵	2,52. 10 ⁻³	3,78. 10 ⁻²	0,131

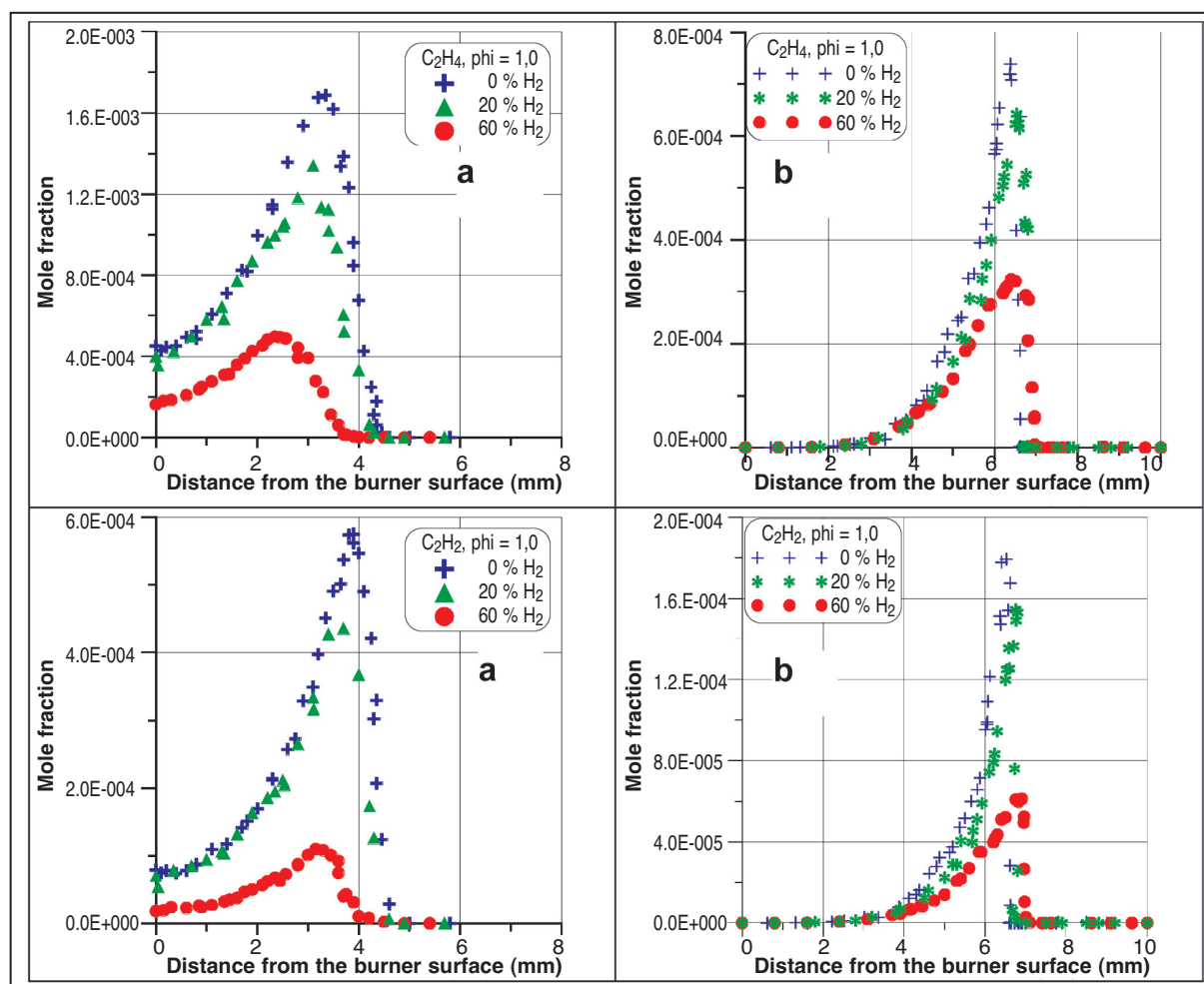


Figure 7.

Profil de fraction molaire des espèces intermédiaires hydrocarbonées C_2H_4 et C_2H_2 mesurés par GC dans les différentes flammes GN/(0, 20, 60 % H_2)/ O_2/N_2 stœchiométriques à basse pression (a) et à pression atmosphérique (b).

Profiles of mole fraction of intermediary hydrocarbon species C_2H_4 and C_2H_2 measured by GC in different NG stoichiometric flames, NG/(0, 20, 60% H_2)/ O_2/N_2 at low pressure (left) and at atmospheric pressure (right).

La présence d'hydrogène dans la flamme affecte les produits de combustion CO et CO_2 (Tableau 2 et Figure 8). Par exemple, la fraction molaire résiduelle de CO dans les gaz brûlés diminue de 50 % entre les flammes stœchiométriques 40 % GN/60 % $H_2/O_2/N_2$ et GN/ O_2/N_2 à basse pression et à pression atmosphérique. Dans le cas du dioxyde de carbone CO_2 , la diminution est de l'ordre de 40 % à basse pression et 70 % à pression atmosphérique. Les fractions molaires de l'eau dans les flammes GN/ O_2/N_2 et 40 % GN/60 % $H_2/O_2/N_2$ sont quasiment identiques dans les gaz brûlés (Figure 8).

2.2. La machine à compression rapide (conditions « moteur »)

La machine à compression rapide (MCR) du PC2A, présentée sur la Figure 9, permet l'analyse détaillée du milieu réactionnel pendant le délai d'auto-inflammation en conditions moteur.

Pour cela, le milieu réactionnel est comprimé rapidement et ainsi amené à des températures comprises entre 600 et 950 K. Le volume est rigoureusement constant après la compression : ceci est dû à la forme de la came qui couple le mouvement du piston moteur avec celui du piston compresseur. Les vitesses de réactions ne sont ainsi pas modifiées par la variation de volume provoquée par la descente du piston, et l'interprétation des phénomènes cinétiques en est grandement facilitée. L'évolution de la pression, de l'émission lumineuse et de la position du piston sont mesurées avec un pas de temps de 40 μs . La température peut varier entre 600 et 950 K en jouant sur la capacité calorifique du mélange en modifiant la composition des gaz inertes. À partir des profils de pression obtenus pendant et après la compression, les délais d'auto-inflammation sont déterminés et la phénoménologie de l'auto-inflammation est reconnue : en un ou deux stades, avec ou sans flamme froide et coefficient négatif de température associé.

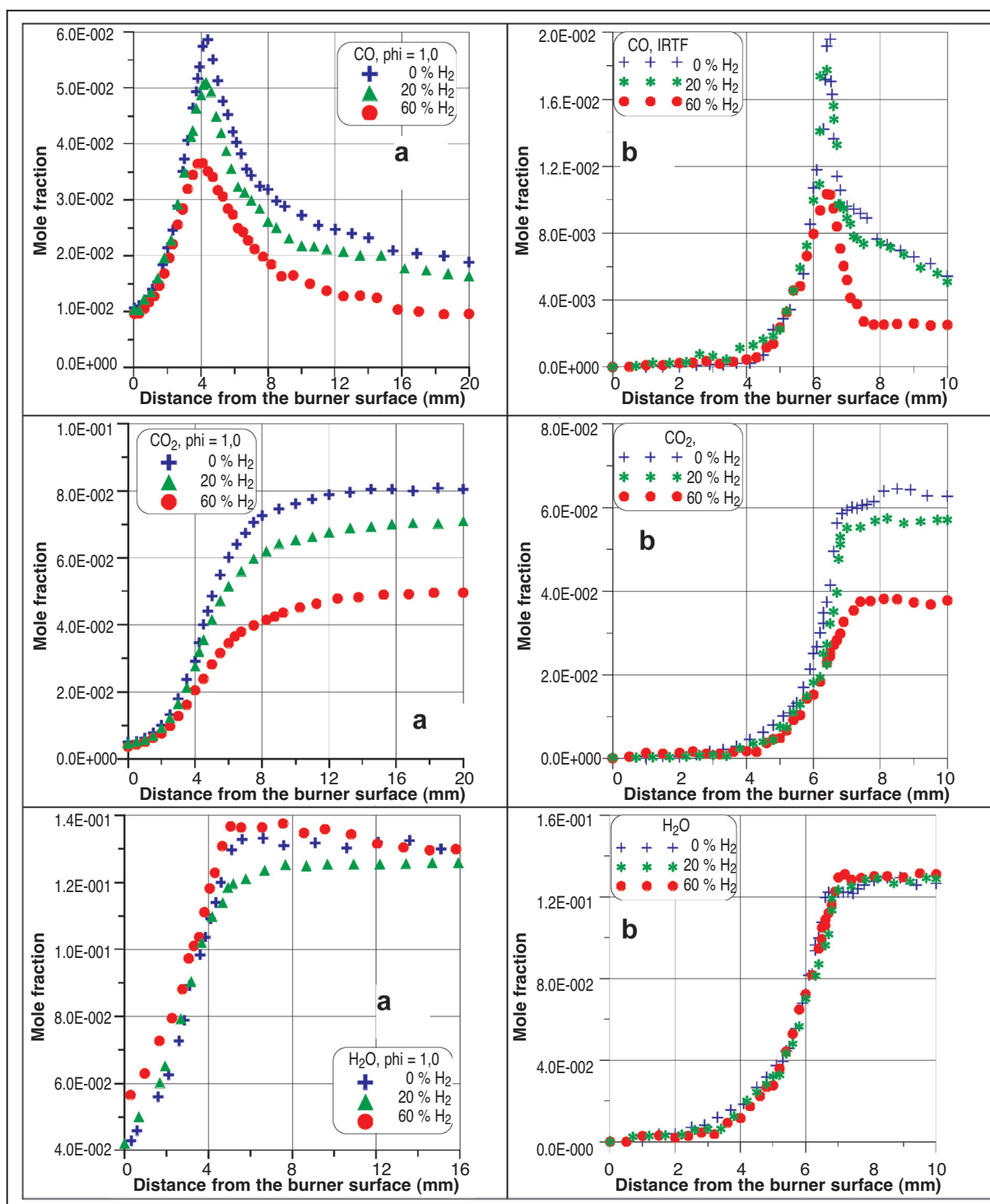


Figure 8.

Profiles de fraction molaire de CO et CO₂ mesurés par GC dans les différentes flammes GN/(0, 20, 60 % H₂)/O₂/N₂ stœchiométriques à basse pression (a) et à pression atmosphérique (b).

Profiles of mole fraction of CO and CO₂ measured by GC in different stoichiometric flames, NG/(0, 20, 60% H₂)/O₂/N₂ at low pressure (a) and at atmospheric pressure (b).

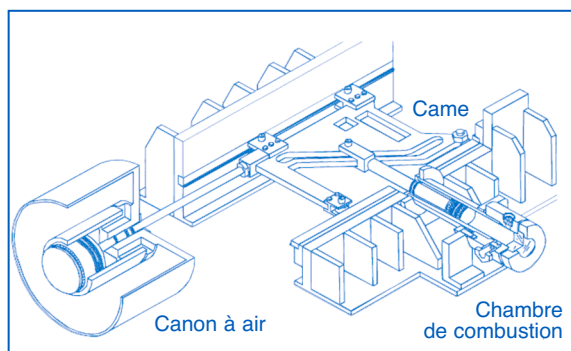


Figure 9.

Schéma de la machine à compression rapide du PC2A.
Scheme of the fast compression machine of PC2A.

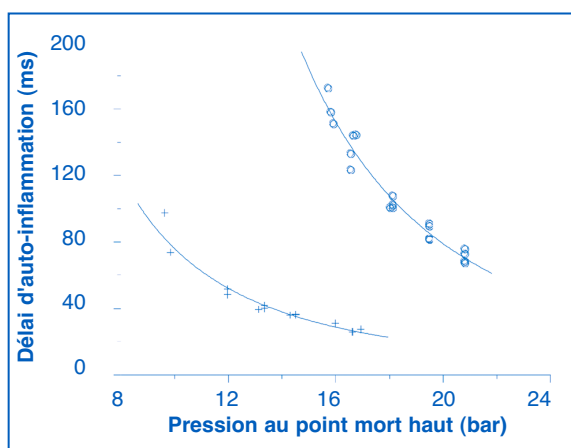


Figure 10.

Évolution du délai d'auto-inflammation d'un mélange gaz naturel/hydrogène 80-20/O₂/N₂ (croix) et d'un mélange gaz naturel/O₂/Ar (cercles) en fonction de la pression au point mort haut pour une température en fin de compression de 908 $\pm$ 5 K (gaz naturel/hydrogène) et 920 $\pm$ 5 K (gaz naturel).

Evolution of auto-ignition time delay of a mixture of NG/H₂ 80-20/O₂/N₂ (cross) and a mixture of NG/O₂/Ar (circles) according to pressure at high neutral point for an end of compression temperature of 908 $\pm$ 5 K (natural gas).

L'oxydation d'un mélange représentatif du gaz naturel en présence d'hydrogène a été entreprise en conditions moteur d'auto-inflammation dans le cas de différents mélanges combustible/comburant : un mélange 80 % gaz naturel/20 % hydrogène dans un air de synthèse oxygène/argon : richesse 1 et dilution de l'oxygène dans l'argon comme dans l'air. Ce mélange, une fois comprimé, atteint la température de 908 $\pm$ 5 K. Ce mélange s'auto-enflamme dans nos conditions à partir d'une pression au point mort haut de 9 bars. L'évolution du délai d'auto-inflammation en fonction de la pression au point mort haut de ce mélange est présentée sur la Figure 10 en comparaison avec celle d'un mélange gaz naturel/O₂/Ar de référence.

La présence d'hydrogène facilite grandement l'auto-inflammation, pour des températures et des compositions de gaz naturel équivalentes. Les délais sont en effet plus courts d'un facteur quatre à cinq.

2.3. Modélisation des phénomènes – Comparaison avec l'expérience

L'objectif de ces études expérimentales est de mettre au point et de valider en laboratoire un mécanisme chimique détaillé représentatif de la combustion des mélanges hybrides gaz naturel/hydrogène. Ce mécanisme sera ensuite introduit, éventuellement sous forme réduite, dans un code 3D industriel capable de simuler le fonctionnement d'un brûleur ou d'un moteur diesel pour tester sa faisabilité et le respect des normes environnementales de rejets polluants.

On utilise dans ce cas les codes de calcul PREMIX pour la modélisation des flammes et SENKIN pour la modélisation des délais d'auto-inflammation [6]. Le mécanisme détaillé GDF-Kin®3.0 a été développé au laboratoire PC2A en collaboration avec Gaz de France et il est optimisé pour l'oxydation du gaz naturel [1-5]. La dernière version comporte la chimie des NO_x et comprend 121 espèces impliquées dans 874 réactions réversibles. Ce travail de modélisation est en cours.

3. Conclusion

L'hydrogène est un vecteur énergétique possible pour le transport, le stockage et la transformation d'énergie. Il peut être considéré comme une réponse crédible aux questions stratégiques de sécurité d'approvisionnement, de dépendance vis-à-vis du pétrole et d'épuisement à terme des réserves énergétiques fossiles. L'étude du mélange gaz naturel/hydrogène est une première étape dans cette voie.

La combustion de mélanges hybrides est étudiée et valorisée au laboratoire PC2A : analyse chimique de l'évolution des espèces dans des flammes gaz naturel/hydrogène et analyse de l'auto-inflammation de mélanges gaz naturel/hydrogène en condition moteur dans une machine à compression rapide.

Le résultat marquant obtenu en flammes est que l'effet de l'hydrogène dépend fortement du pourcentage d'hydrogène présent dans le mélange initial et de la richesse relative au gaz naturel ; il dépend peu de la pression. La substitution de 20 % d'hydrogène au gaz naturel a un effet très limité contrairement à 60 %, effet qui est partiellement dû à une diminution de carbone initial. En machine à compression rapide, la présence d'hydrogène dans un mélange d'alcane augmente la réactivité et facilite l'auto-inflammation du mélange.

Ce travail a été cofinancé par GDF SUEZ et la « Région Nord-Pas-de-Calais ».

Références

1. De Ferrières S, El Bakali A, Lefort B, Montero M, Pauwels JF. Experimental and numerical investigation of low pressure laminar premixed synthetic natural gas/O₂/N₂ and natural gas/H₂/O₂/N₂ flames. *Combustion and Flame*, in press.
2. El Bakali A *et al.* *Combustion and Flame* (2004) ; 137 : 109-28.
3. Turbiez A, El Bakali A, Pauwels JF, Rida A, Meunier P. *Fuel* (2004) : 83 : 933-41.
4. El Bakali A *et al.* *Fuel* (2006) ; 85 : 896-909.
5. Pillier L, El Bakali A, Mercier X, Rida A, Pauwels JF, Desgroux P. *Proceedings of the Combustion Institute* (2005) ; 30 : 1183-91.
6. Kee RJ, Grcar JF, Smooke MD, Miller JA. Report No. SAND85-8220 SANDIA National Laboratories, 1985.