



# THÈSE DE DOCTORAT

Préparée à l'Université de Lille

Par

**Doha KDOUH**

En vue de l'obtention du grade de Docteur en Énergétique, Thermique et Combustion  
Ecole Doctorale : Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement

**Étude expérimentale de l'impact des carburants oxygénés sur les émissions de polluants  
dans des conditions de flamme**

**Experimental study of the impact of oxygenated fuels on pollutant emissions in flame  
conditions**

Soutenance prévue pour le 27 Juin 2025

Composition du Jury :

<b>Christine ROUSSELLE</b>	Professeure, PRISME, Université d'Orléans	<b>Rapporteure</b>
<b>Stéphanie DE PERSIS</b>	Professeure, ICARE, Université d'Orléans	<b>Rapporteure</b>
<b>Pierre A. GLAUDE</b>	Directeur de Recherche CNRS, LRGP, Université de Lorraine	<b>Examineur</b>
<b>Véronique DIAS</b>	Maîtresse de Recherche, HDR, IMMC, Université de Louvain (BE)	<b>Examinatrice</b>
<b>Laurent GASNOT</b>	Professeur, PC2A, Université de Lille	<b>Directeur</b>
<b>Luc-Sy TRAN</b>	Chargé de Recherche CNRS, PC2A, Université de Lille	<b>Co-encadrant</b>

## Abstract

In the face of growing environmental challenges and depleting fossil fuel reserves, the shift toward sustainable energy solutions has become more than a goal, it is an imperative for the future of our planet. Among these sustainable alternatives, biofuels have emerged as a promising solution, particularly when blended with fossil fuels to mitigate emissions and reduce environmental impact. However, research on the combined use of alcoholic biofuels, such as iso-butanol, in gasoline fuel combustion remains limited, especially in premixed flames near sooting onset. Iso-butanol, a non-edible biomass-based biofuel, has high octane number and high calorific value. To bridge this gap, this study explores the effects of blending iso-butanol with toluene reference fuel (TRF), a gasoline surrogate composed of toluene, iso-octane, and n-heptane. Experiments with ethanol, the most widely used biofuel on a commercial scale, under the identical conditions were also performed for comparison.

The study investigates eight distinct fuel blends under atmospheric premixed laminar flame conditions, analyzing TRF at two equivalence ratios (1.72 and 1.82), TRF-E (TRF blended with ethanol) at four equivalence ratios (1.72, 1.82, 1.92, and 2.02), and TRF-B (TRF blended with iso-butanol) at two equivalence ratios (1.72 and 1.82). This study takes a comprehensive approach to pollutant characterization, systematically analyzing a broad spectrum of combustion byproducts, from small hydrocarbons to larger oxygenated compounds, PAHs, and ultimately, soot. To achieve a detailed and quantitative understanding of these processes, multiple techniques are employed. Gas chromatography (GC), laser-induced fluorescence (LIF-NO), laser induced incandescence (LII) and thermocouple-based temperature measurements. These techniques offer an in-depth exploration of how biofuel blends influence combustion chemistry and pollutant formation. When alcohols are introduced into TRF mixtures, they significantly alter combustion chemistry, influencing the formation of oxygenated and non-oxygenated hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and soot.

As can be noted, the study with simultaneous three- and four-component fuel mixtures, as well as the experimental measurements of products simultaneously from the gaseous phase to the solid phase at special flame conditions raised many challenges from a technical and scientific point of view for the present study. The success of these measurements makes this research particularly valuable for future developments of cleaner biofuel combustion technologies.

**Keywords:** premixed laminar flames, biofuels, ethanol, iso-butanol, aldehydes, PAHs, soot.

## Résumé

Face aux défis environnementaux croissants et à l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, la transition vers des solutions énergétiques durables est devenue plus qu'un objectif, elle constitue une nécessité pour l'avenir de notre planète. Parmi ces alternatives durables, les biocarburants apparaissent comme une solution prometteuse, en particulier lorsqu'ils sont mélangés aux carburants fossiles afin de réduire les émissions et l'impact environnemental. Cependant, les recherches portant sur l'utilisation combinée de biocarburants alcooliques, tels que l'iso-butanol, dans la combustion des carburants essence restent limitées, notamment dans le cas des flammes prémélangées proches de l'apparition de suie. L'iso-butanol, un biocarburant dérivé de biomasse non comestible, présente un indice d'octane élevé ainsi qu'une forte valeur calorifique. Afin de combler cette lacune, cette étude explore les effets du mélange d'iso-butanol avec le carburant de référence au toluène (TRF), un substitut d'essence composé de toluène, d'iso-octane et de n-heptane. Des expériences menées avec l'éthanol, le biocarburant le plus largement utilisé à l'échelle commerciale, dans des conditions identiques, ont également été réalisées à des fins de comparaison.

L'étude examine huit mélanges de carburants distincts dans des flammes laminaires prémélangées à pression atmosphérique, en analysant le TRF à deux rapports d'équivalence (1,72 et 1,82), le TRF-E (TRF mélangé à de l'éthanol) à quatre rapports d'équivalence (1,72, 1,82, 1,92 et 2,02), et le TRF-B (TRF mélangé à de l'iso-butanol) à deux rapports d'équivalence (1,72 et 1,82). Cette étude adopte une approche exhaustive de la caractérisation des polluants, en analysant de manière systématique un large éventail de sous-produits de la combustion, allant des petits hydrocarbures aux composés oxygénés de plus grande taille, en passant par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), jusqu'à la suie. Pour obtenir une compréhension détaillée et quantitative de ces processus, plusieurs techniques sont mises en œuvre : chromatographie en phase gazeuse (GC), fluorescence induite par laser (LIF-NO), incandescence induite par laser (LII) et mesures de température à l'aide de thermocouples. Ces techniques permettent une exploration approfondie de l'influence des mélanges de biocarburants sur la chimie de la combustion et la formation des polluants. L'introduction d'alcools dans les mélanges TRF modifie de manière significative la chimie de la combustion, influençant la formation d'hydrocarbures oxygénés et non oxygénés, de HAP, et de suie.

Il convient de noter que l'étude de mélanges de carburants à trois et quatre composants, ainsi que les mesures expérimentales simultanées des produits, depuis la phase gazeuse jusqu'à la phase solide dans des conditions de flamme particulières, ont soulevé de nombreux défis d'un point de vue technique et scientifique dans le cadre de cette recherche. Le succès de ces mesures rend cette étude particulièrement précieuse pour le développement futur de technologies de combustion de biocarburants plus propres.

**Mots-clés :** flammes laminaires prémélangées, biocarburants, éthanol, iso-butanol, aldéhydes, HAP, suie.