

## **La combustion d'hydrogène vert produit par électrolyseur**



***Etudiants :***

**Gabriel BOURGEOIS**  
**Orianne CALES**  
**Lucie GUILIELMO**  
**Fatima LEMFARRAK**  
**Lisa ROBERT**  
**Yinzhou WU**

***Enseignant-responsable du projet :***

**David HONORE**

Date de remise du rapport : 11/06/2022

Référence du projet : STPI/P6/2022 – 019

Intitulé du projet : *La combustion d'hydrogène vert produit par électrolyseur*

Type de projet : *Bibliographique et expérimental*

Objectifs du projet :

*Les principaux objectifs de ce sujet sont l'étude de la combustion de l'hydrogène vert et de ses caractéristiques, cet hydrogène étant produit par électrolyseur. Nous étudions différentes flammes d'hydrogène afin de comprendre les caractéristiques de chacune d'entre-elles. Nous cherchons aussi à comprendre les enjeux écologiques actuels en se questionnant sur la place de l'hydrogène aujourd'hui et surtout celle de l'hydrogène vert, ces enjeux, ces moyens de productions, ces atouts mais aussi ces contraintes.*

Mots-clefs du projet : *électrolyseur, combustion, hydrogène vert*

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction .....	4
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	5
3. Production de l'hydrogène.....	6
3.1. Les techniques de production .....	6
3.2. L'électrolyse c'est quoi ? .....	6
3.3. Avantages et inconvénients de la production et de la combustion de H <sub>2</sub> .....	7
3.4. Les applications (projet du Havre) .....	8
4. La combustion de l'hydrogène .....	9
4.1. Le principe de la combustion.....	9
4.2. Flamme prémélangée et mélangée .....	10
4.3. Les différentes applications.....	11
5. Expériences et résultats .....	14
5.1. La démarche .....	14
5.2. L'expérience .....	15
5.3. Les résultats .....	16
6. Conclusions et perspectives.....	18
7. Bibliographie .....	19
8. Annexes .....	22
8.1. Diagramme de Gantt .....	22
8.2. Les différentes couleurs de l'hydrogène .....	23
8.3. Les trois types d'électrolyse .....	25
8.4. Flamme de diffusion et flamme de prémélange .....	28
8.5. Le tableau récapitulatif des électrolyseurs.....	31
8.6. Excel des calculs pour l'expérience .....	32
8.7. Fichiers et résultats de l'expérience.....	33

## 1. INTRODUCTION

L'hydrogène, de symbole H, est le premier élément chimique du tableau périodique. Il possède un seul électron et c'est un gaz très léger. C'est l'élément le plus abondant de l'univers (1/4 de la masse de l'univers) mais il n'est cependant que très peu présent à l'état naturel sur terre. On le trouve dans l'eau (H<sub>2</sub>O), le pétrole, les hydrocarbures (HC) ou encore les gaz naturels (CH<sub>4</sub>). De nombreux procédés permettent de séparer et décomposer ces éléments comme l'électrolyse de l'eau dont nous parlerons. [1]

L'histoire de l'hydrogène remonte au 16<sup>ème</sup> siècle avec l'alchimiste Paracelse qui fut intrigué par un gaz inodore mais ce n'est qu'au 18<sup>ème</sup> siècle que le chimiste Suisse Théodore Turquet met en évidence l'inflammabilité de ce gaz. L'hydrogène est exploité par les frères Montgolfier comme gaz de remplissage des ballons et ensuite sera utilisé afin d'éclairer des villes, de propulser des fusées ou pour des applications domestiques. [2]

Mais aujourd'hui, il existe différentes façons d'exploiter cet hydrogène comme les piles à combustible par exemple ou encore la combustion directe de l'hydrogène dont nous serons amenés à traiter ici. L'hydrogène représente de nos jours moins de 2% de la consommation mondiale d'énergie et c'est un enjeu majeur que de développer son exploitation au niveau mondial. [1]

La molécule qui nous intéresse est le dihydrogène H<sub>2</sub> qui est un gaz inflammable, incolore, non corrosif, non toxique et inodore. La transition écologique amène de plus en plus de consommateurs vers l'hydrogène et plus précisément le dihydrogène grâce à sa formule renouvelable. Il est donc intéressant de voir comment nous pouvons obtenir de l'hydrogène dit « vert », c'est-à-dire écologique. L'hydrogène est aussi très intéressant quant à son stockage et sa gestion énergétique. [1]

Ainsi, en vue des enjeux écologiques du réchauffement climatique, nous traiterons ici de la combustion de l'hydrogène vert par électrolyseur en abordant dans un premier temps les différentes façons d'obtenir de l'hydrogène et notamment de l'hydrogène vert et de ces caractéristiques (stockage, avantages, inconvénients, prix...). Ensuite, nous étudierons l'utilisation de cet hydrogène grâce à la combustion et enfin, nous parlerons de notre expérience réalisée à savoir la création d'une flamme d'hydrogène par un brûleur en laboratoire.

## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin de mener à bien notre projet dans les meilleures conditions possible et en étant efficace, nous avons travaillé en équipe en se divisant les recherches et les diverses tâches, en discutant régulièrement de notre avancée et en écoutant attentivement les remarques de notre professeur référent.

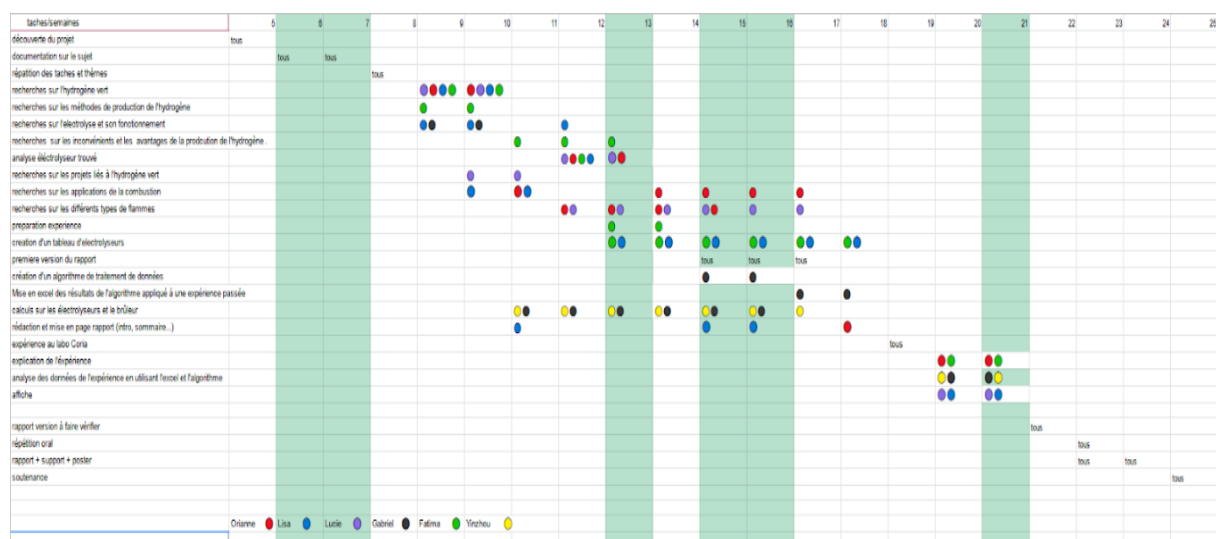
La méthode du diagramme de Gantt nous a permis de nous projeter tout au long de ce semestre de manière efficace et de ne pas se retrouver surchargés en fin de semestre. Nous pouvons le lire ci-après. Nous pouvons nous fixer des dates limites des différentes tâches à réaliser et chacun pouvait respecter ces dates en réalisant son travail quand il le souhaitait. Cet outil permet à chacun de savoir ce qu'il a à faire et de répartir tous les travaux entre chaque membre de l'équipe.

Mais ce diagramme n'est pas resté fixe, il a évolué tout au long du projet et les dates limites ont été avancées et parfois reculées selon l'avancement de nos recherches et calculs. Pendant les séances, nous discutons tous ensemble et avec le professeur sur la répartition des tâches et l'avancée du travail puis nous continuons nos recherches. Pendant les vacances de février et de Pâques, nous avons beaucoup avancé sur la partie recherches en février et sur la rédaction du rapport à Pâques. Les expériences ont quant à elles été réalisées après ces dernières vacances et nous avons dû faire le bilan de celle-ci et les analyses ainsi que se préparer à l'oral, terminer le rapport écrit et réaliser l'affiche.

L'utilisation de google docs nous a permis de rédiger le rapport du projet tout en regardant l'avancée de chaque membre du groupe. Nous nous sommes répartis en binômes pour les travaux plus complexes afin d'être le plus efficace possible.

Nous nous sommes tous sentis investis dans ce projet et nous sommes tous satisfaits de la pierre que nous avons apportée à l'édifice de ce rapport et de ces expériences. La communication s'est très bien déroulée entre nous et nous n'avons jamais eu de problème à nous répartir les rôles. Chacun a fait sa partie de travail dans les temps impartis.

Nous avons donc pris du plaisir à voir avancer notre projet de manière efficace et régulière et sommes ravis d'avoir abouti à celui-ci. La bonne communication a grandement favorisé le bon déroulement du rendu et a permis à chacun de travailler dans de bonnes conditions.



*Tableau 1: Diagramme de Gant*

### 3. PRODUCTION DE L'HYDROGENE

#### 3.1. Les techniques de production

Il existe plusieurs méthodes utilisées pour produire de l'hydrogène, cependant la plupart d'entre elles sont émettrices de CO<sub>2</sub>. Les différentes techniques sont les suivantes :

**Le vaporeformage du gaz naturel** : il s'agit de la technique la plus utilisée pour produire de l'hydrogène (environ 95%) et repose sur le principe de mélange entre le gaz naturel contenant du méthane et de la vapeur d'eau. Le mélange est placé sous haute température et pression et avec la présence d'un catalyseur (le nickel), ce qui conduit à une réaction qui a pour produit le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et l'hydrogène.

**La gazéification** : permet de produire à partir de la combustion du charbon ou de la biomasse un mélange de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>. L'hydrogène est ensuite séparé du monoxyde de carbone.

**L'oxydation partielle** : consiste à mélanger le gaz naturel avec une quantité limitée d'oxygène afin de produire un gaz riche en hydrogène sans l'utilisation d'un catalyseur.

**Distillation cryogénique** : cette technique consiste à provoquer la condensation des composants associés (à l'état gazeux) à l'hydrogène et ayant une température d'ébullition supérieure à celle de l'hydrogène. Les composants sont ainsi éliminés et seul l'hydrogène reste à l'état gazeux.

**La décomposition thermochimique de l'eau (thermolyse)** : la molécule de l'eau peut se décomposer sous l'effet d'une haute température (800/1000°C) et donc libérer de l'hydrogène. Cette technique nécessite néanmoins de l'énergie nucléaire. [14] [15] [17]

Par ailleurs, il existe aussi une autre méthode de production d'hydrogène qualifiée d'hydrogène vert (peu émettrice de gaz à effets de serre) : il s'agit de **l'électrolyse de l'eau**. Cette méthode sera expliquée en détail dans la prochaine partie.

#### 3.2. L'électrolyse c'est quoi ?

Dans notre sujet, nous étudions en particulier la création d'hydrogène grâce aux électrolyseurs. Cette méthode de l'électrolyse consiste à décomposer les molécules d'eau, à l'aide d'un courant électrique pour obtenir d'un côté de l'oxygène et de l'autre, du dihydrogène.

Tout d'abord, un électrolyseur est composé de deux barres de matériaux différents qu'on nomme électrodes (une anode et une cathode), d'un circuit électrique, et d'une eau fortement composée en minéraux. Dans un montage classique, une partie des électrodes sont situées dans l'eau.

D'après [25] et [27], la création d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau se fait selon le processus suivant : les électrodes sont alimentées en électricité par un circuit électrique. L'électricité, arrivant dans la première électrode, va chercher à sortir par la seconde. Le liquide est traversé par l'électricité ce qui fait que les molécules d'eau contenues sont perturbées. Au bout d'un moment, une des liaisons reliant l'atome d'oxygène et les deux atomes d'hydrogène cède et un hydrogène est séparé du reste de la molécule. Ensuite, les atomes d'hydrogène se lient entre eux pour créer du dihydrogène, qui, étant un gaz, remonte directement à la surface de l'eau. C'est ce gaz qui nous intéresse dans notre étude, il sera envoyé ensuite dans un brûleur.

Plus précisément, il y a trois types d'électrolyse de l'eau connus aujourd'hui : l'électrolyse alcaline, l'électrolyse PEM et l'électrolyse à Haute Température (HTE). L'électrolyse alcaline est la plus utilisée actuellement et affiche des coûts d'investissement faibles et un rendement

de 68 à 77 %. Peu réactive aux variations de puissance, elle produit de l'hydrogène facilement à partir d'hydroélectricité mais n'est pas adaptée au couplage avec de l'énergie photovoltaïque ou éolienne.

Avec l'évolution rapide des technologies, l'électrolyse à membrane PEM (Membrane à échange de proton) ouvre de nouvelles voies. Ces électrolyseurs utilisent un électrolyte solide fait de membranes polymères conductrices de protons H<sup>+</sup>. Les P.E.M. sont dans l'ensemble supérieurs aux alcalins, en particulier en rendement (+ 5%), leur handicap étant un prix nettement plus élevé à cause du coût de la membrane et des catalyseurs (métaux nobles).

Enfin, l'électrolyse à Haute température est tout aussi intéressante et est même vu comme le futur de l'électrolyse. Elle consomme moins d'énergie, étant donné que la réaction se déroule entre 700°C et 1000°C, sa cinétique est nettement améliorée.

L'électrolyse en elle-même ne dégage aucun CO<sub>2</sub>. Mais, dans la globalité du processus, il faut tenir compte de la production d'électricité. Dans le cas où l'électricité utilisée est produite à partir de sources qui n'émettent pas de CO<sub>2</sub>, comme les énergies renouvelables, l'hydrogène sera produit sans aucune émission de gaz à effet de serre et peut-être considéré comme vert. Cette méthode est généralement utilisée pour produire de faibles volumes d'hydrogène ou à proximité de sources électriques à faible coût, l'hydroélectricité par exemple. Actuellement, de nombreuses recherches sont effectuées pour améliorer le rendement de l'électrolyse.

Des précisions sur les fonctionnements de ces trois types d'électrolyses, leurs avantages et inconvénients sont données en annexe.

### 3.3. Avantages et inconvénients de la production et de la combustion de H<sub>2</sub>.

#### Les avantages :

**Carburant propre:** l'hydrogène qui alimente une pile à combustible permet de produire de l'électricité sans émettre de gaz à effet de serre s'il est produit par électrolyse (elle-même utilisant les énergies renouvelables). Il peut donc apporter l'énergie nécessaire aux véhicules équipés d'une pile à combustible et permet une mobilité sans émission de polluants. [6]

**Le transport:** l'hydrogène perd et nécessite à la fois une quantité d'énergie lors de son transport par rapport à l'essence mais il ne faut pas oublier que celui-ci possède un avantage majeur qui réside dans sa facilité de transport. En effet l'hydrogène peut être transporté par pipeline, par camions ou par bateaux, sous forme gazeux ou bien liquide, il prend alors très peu de place. [6]

**Le coût:** on sait qu'à énergie équivalente, transporter de l'hydrogène est 12 fois moins cher que de transporter de l'électricité sur les réseaux haute tension. Aussi, le prix de l'hydrogène d'origine fossile est estimé aujourd'hui entre 10 et 12 € TTC pour faire 100km, alors que l'essence sans plomb 98 (pour parcourir la même distance) coûte environ 12.74€ TTC. [8]

**Domaine d'utilisation:** l'hydrogène peut être très pratique pour des applications très exigeantes comme l'aéronautique ou le spatial, car il contient beaucoup d'énergie par unité de poids par rapport au kérosène par exemple. Il possède de plus une très large gamme d'utilisation qui rend son utilisation très intéressante (exemple dans la suite du rapport). [6]

#### Les inconvénients :

**Aspect énergétique :** 1L d'essence contient 9 KWh d'énergie sous forme de chaleur. Par ailleurs 1L d'hydrogène contient 3 KWh d'énergie et nécessite 1L d'eau et 5 Kwh d'électricité pour produire un normal mètre cube soit 1000L sous forme gazeuse. Cela demande donc beaucoup plus d'énergie que d'autres ressources. [8]

**Le mode de stockage :** le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse utilise 15% de son énergie stockée, et sous sa forme liquide 35% de l'énergie stockée. Il y a donc des pertes par stockage. [10]

**La distribution :** si l'hydrogène est distribué par canalisation, 5 à 10% de l'H<sub>2</sub> est estimé à être perdu lors de cette distribution dans les canalisations et dans les fuites du stockage de la centrale de production et de la station-service. [10]

#### **Risques associés à la production d'hydrogène :**

- Risque d'inflammation et d'explosion : la production d'hydrogène notamment par vapocraquage et par la combustion de la biomasse peut conduire à la formation d'une atmosphère explosive (ATEX). Le risque d'explosion par électrolyse s'avère être, lui, encore plus important car on produit simultanément de l'hydrogène et de l'oxygène.
- Risques mécaniques à température et pression élevées: environ 95 % d'hydrogène est produit par reformage (ou vapocraquage) qui nécessite des températures et pressions élevées (qui peuvent atteindre 1500°C). Ces dernières peuvent conduire à des risques de défaillances des réacteurs ou risques d'éclatements. [7]

### **3.4. Les applications (projet du Havre)**

Malgré tous les avantages que nous pouvons trouver à l'hydrogène vert, sa production et son utilisation restent encore limitées. En effet, cette forme d'énergie étant une découverte récente, peu de moyens ont été déployés pour le moment.

Cependant l'Europe et la France tentent de soutenir des projets liés à l'énergie verte. La France déclare en 2020 investir 7 milliards d'euros dans le développement de l'hydrogène vert. De grands projets émergent alors, dont le projet Normand 'Hy.

Ce grand projet devrait débuter dès l'été 2022 sur le site du Port-Jérôme-sur-Seine et se conclure d'ici 2025. A la clé se trouvent, 2 grandes usines de production d'hydrogène vert de 100 MW chacune. Par procédé d'électrolyse de l'eau, ces usines permettraient de produire 28000 tonnes d'hydrogène renouvelables par an. Cette production devrait profiter aux industries locales et au secteur de la mobilité lourde (bus et poids lourds).

Un tel projet implique un investissement considérable de la part d'entreprises. Le groupe de gaz industriels Air Liquide a investi 250 millions d'euros dans le projet Normand 'Hy en reprenant 60% à la société H2V Product. Ce projet constitue alors l'un des plus gros projets de production d'hydrogène vert en France.



*Figure 1 : Maquette du projet du Havre sur l'hydrogène*



## 4. LA COMBUSTION DE L'HYDROGENE

### 4.1. Le principe de la combustion

La combustion est une réaction chimique exothermique d'oxydoréduction entre un combustible et un comburant. Cette réaction est déclenchée par une énergie d'activation, généralement de la chaleur ou une flamme. Le combustible peut être un solide (bois, papier...), un liquide (essence, huile...) ou un gaz (butane, gaz de ville...). Le comburant est l'air ambiant avec le dioxygène. [28] [30]

Le combustible, le comburant et l'énergie d'activation sont les trois éléments essentiels qui doivent être présents simultanément afin que la réaction de combustion se produise : on parle du triangle de feu.



*Figure 2 : Triangle du feu*

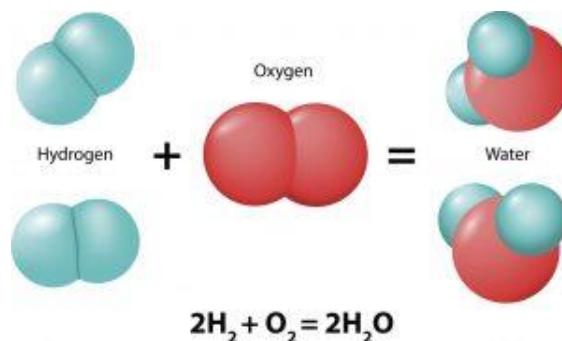
#### Exemple 1 : Combustion du méthane dans le dioxygène :



Lors de la combustion du méthane dans le dioxygène on arrive à des produits plus stables : l'eau et le dioxyde de carbone. Le combustible est oxydé (oxydation= passage d'un oxydant à son réducteur) et le comburant est réduit (réduction= passage de l'oxydant au réducteur). Cette réaction produit de la chaleur, on dit qu'elle est exothermique. Lorsqu'elle est vive, il y a formation d'une flamme voire d'une explosion. [28]

On remarque que lors de la combustion du méthane, du CO<sub>2</sub> est dégagé, qui est un gaz à effets de serre (tout comme le CH<sub>4</sub>). C'est pourquoi aujourd'hui on s'intéresse à changer de combustible en substituant le méthane par le dihydrogène.

#### Exemple 2 : Combustion de l'hydrogène dans le dioxygène



*Figure 3 : Combustion de l'hydrogène*

Lors de la combustion de l'hydrogène dans le dioxygène on remarque que l'on obtient uniquement de l'eau, c'est-à-dire aucun gaz à effet de serre. De plus, cette réaction libère trois fois plus d'énergie que la même masse d'essence, elle est très réactive et sa température de combustion est élevée ce qui améliore les rendements thermodynamiques. [29]

## 4.2. Flammes prémélangées et mélangées

La combustion est un vaste domaine de recherche en physique. Nous avons eu besoin de nous y intéresser pour comprendre le sujet de notre projet dans sa globalité. Nous sommes alors rendu compte qu'en combustion, 2 types de flammes se distinguaient :

- la flamme de diffusion pour laquelle le combustible et le comburant sont séparés avant le début de la réaction de combustion

- la flamme de prémélange pour laquelle les réactifs forment une phase homogène et cela avant la combustion [31, 32]

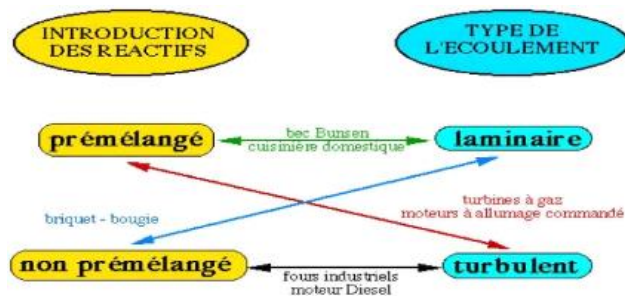


Figure 4 : schéma des différents types de flamme

On a pu voir qu'il existe des flammes de diffusion et de prémélanges mais ces 2 types de flammes peuvent encore se séparer en 2 catégories selon l'écoulement des gaz: on parle d'écoulement laminaire ou d'écoulement turbulent (on parle aussi d'écoulement ordonné, respectivement désordonné).

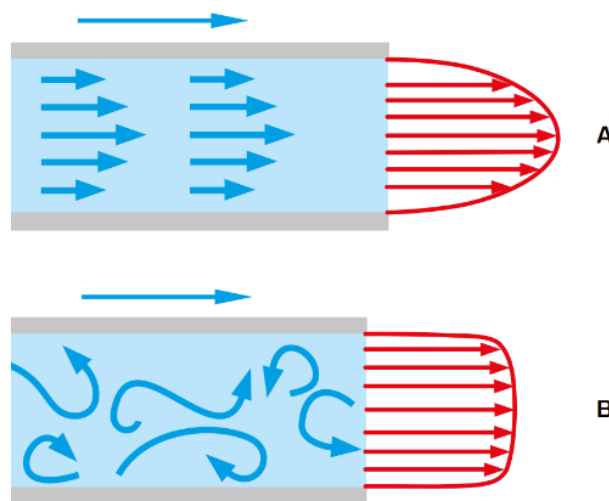


Figure 5 : Schéma des types d'écoulement des fluides : laminaires (A) et turbulents (B)

Si les fluides suivent un écoulement laminaire (ordonné) alors ils s'écoulent dans la même direction. On peut alors le représenter comme sur le schéma par des couches de fluide qui s'écoulent de manière parallèle. Au contraire si les fluides suivent un écoulement turbulent (désordonné) les différentes couches de fluides se mélangent et tourbillonnent. Ce qui explique la recherche d'un écoulement laminaire dans la plupart des cas. [33,34]

Un nombre existe pour caractériser la nature de l'écoulement d'un fluide: le nombre de Reynolds (Re). Ce nombre est sans dimension et lorsque qu'il est inférieur à 2300 il s'agit d'un écoulement laminaire. Au contraire, pour un nombre de Reynolds supérieur ou égal à 2300 on parle d'un écoulement turbulent. Ce nombre est important en mécanique des fluides car 2 fluides de même nombre de Reynolds ont un comportement similaire. [34]

Dans un tuyau il est simple de calculer un nombre de Reynolds grâce au diamètre du tuyau (d), grâce à la vitesse moyenne du fluide (v) et grâce la viscosité cinématique ( $\nu$ ) selon la formule suivante:  $Re=(v*d) / \nu$ .

L'écoulement laminaire est souvent le type d'écoulement recherché lorsqu'il s'agit d'écoulement de fluides dans un tuyau car il limite la perte de charges, il est plus stable et il est donc plus simple à étudier et prévoir.

Pour le comprendre, on peut s'intéresser aux pertes de charges. Pour l'écoulement laminaire, il est aisé de se rendre compte que le fluide ne s'écoule pas de manière uniforme. En effet le fluide en contact avec le tuyau sera freiné par les frottements et aura donc une vitesse moins élevée que le fluide se trouvant au centre du tuyau. La perte de charges est alors proportionnelle à la vitesse moyenne du fluide. Dans le cas de l'écoulement turbulent la vitesse est quasiment constante en tout point. Cependant la perte de charges est cette fois proportionnelle au carré de la vitesse moyenne du fluide.

Maintenant que l'on a intégré les différents types d'écoulements on peut étudier les 2 catégories de flamme (voir en annexe les flammes de diffusion et de prémélange).

### 4.3. Les différentes applications

L'hydrogène est un vecteur énergétique et joue un rôle clé dans la décarbonisation du secteur énergétique tels que les transports, l'industrie, la production d'électricité et le chauffage municipal. Nous allons ainsi voir les différentes applications de l'hydrogène.

Aujourd'hui l'hydrogène est principalement utilisé dans la production de méthanol, d'ammoniac, et dans le raffinage du pétrole mais aussi en tant que pile à combustible dans les transports, l'industrie lourde et le domaine spatial. [19]

L'hydrogène peut aussi être utilisé comme combustible direct avec l'oxygène. Cette utilisation à l'avantage de ne générer aucune émission directe de polluants ou de gaz à effet de serre mais elle est encore très peu développée contrairement à la pile à combustible.

L'une des applications de la combustion de l'hydrogène est celle des chaudières à hydrogène. Ce nouveau mode de chauffage plus écologique est majoritairement développé par le Groupe BDR Thermea. "*Ce que nous visons, ce sont des chaudières fonctionnant à l'hydrogène qui soit de même taille que celles au gaz actuel, de la même facilité de fonctionnement, aussi sûres et au même prix*", résume Claude Freyd, directeur de l'innovation de BDR Thermea. Ces chaudières sont, pour le moment, encore à l'essai en France et plusieurs pistes sont à l'étude. Par exemple, le groupe BDR Thermea a installé en janvier 2021 la première chaudière 100% hydrogène dans un ensemble communal de Châteauneuf en Loire. Les brûleurs ont donc été adaptés à un gaz plus léger et la tuyauterie a été renforcée afin d'éviter toute fuite. [22] [23]



*Figure 6 : Chaudière à hydrogène*

Une autre application de la combustion de l'hydrogène est réalisée par la start-up Bulane qui a développé une gamme d'électrolyseurs afin de produire une flamme à très haute température, sans aucun dégagement de CO<sub>2</sub>. Cette nouvelle technologie est destinée aux industriels. Le procédé fonctionne grâce à la combustion de l'hydrogène, à partir de l'électrolyse de l'eau, et a été mis au point avec deux laboratoires de recherche: l'ICGM et l'IMFT. « Aujourd'hui, l'entreprise souhaite étendre sa technologie afin de décarboner les chaudières dans les bâtiments », Nicolas Jerez président et fondateur de Bulane.

L'entreprise a aussi développé une technologie d'électrolyse de l'eau qui est destinée à alimenter des combustions. Plusieurs aspects concernant la sécurité de l'appareil ont été réalisés. Par exemple, le système a été conçu pour éviter tout retour de flamme. De plus cet électrolyseur a la particularité d'être peu encombrant et relativement léger en comparaison avec un électrolyseur standard. Le plus petit électrolyseur de la gamme Dyomix ne pèse qu'une trentaine de kilogramme pour une puissance de 2 400 W et se déplace sur des roulettes. [20]



*Figure 7 : Electrolyseur de la gamme Dyomix*

Depuis 2015 l'entreprise a vendu plus de 1 200 électrolyseurs pour une puissance totale électrique installée d'environ 4 MW, ce qui représente plusieurs dizaines de milliers de tonnes de CO<sub>2</sub> économisées. Cette technologie possède plusieurs applications comme une gamme d'appareils dans le domaine des chalumeaux, pour le soudage mais aussi remplacer les gaz de chauffe utilisés en distillation par de l'hydrogène.

De plus, depuis plus d'un an, l'entreprise travaille également sur la décarbonation de l'énergie de chauffage dans les bâtiments en connectant leurs électrolyseurs à des chaudières afin d'intégrer l'hydrogène dans la combustion finale. Ce projet s'appelle LP2H pour Local

Power to Heat. Il est lauréat du concours d'innovations i-Nov 2020 du SGPI (Secrétariat général pour l'investissement) et de l'ADEME ce qui a permis à la start-up Bulane d'obtenir un soutien financier du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA). Ainsi le marché potentiel est très important et l'hydrogène peut jouer un rôle majeur pour décarboner massivement les bâtiments. [20]

La dernière application de la combustion de l'hydrogène que nous allons aborder ici a été réalisée par Henri Bécu, un ingénieur centralien de 66 ans dans sa résidence en Bretagne, à Saint-Briac, où il a développé un aérotherme (générateur d'air chaud) qui fonctionne grâce à la combustion de l'hydrogène sans émettre de polluants. «Ce brûleur, conçu avec des nanomatériaux, permet l'utilisation d'un mélange pauvre en hydrogène. De ce fait, la température de combustion de l'hydrogène est fortement abaissée, à 200 °C, contre plus de 1400 °C, pour les nouvelles chaudières à hydrogène», Explique Henri Bécu.

Dû à cette température très basse, ce brûleur ne pollue pas du tout et à un rendement de 100%. Ce brûleur permet de réchauffer l'air ambiant, il dans un premier temps chauffé à l'intérieur de l'aérotherme et est ensuite soufflé vers la pièce à chauffer. Henri Bécu explique qu'il destine cette invention à l'industrie afin de chauffer des bâtiments logistiques ou d'intégrer des processus industriels pour produire de la vapeur. [21]

## 5. EXPERIENCES ET RESULTATS

### 5.1. La démarche

Nous souhaitons à première vue commander un électrolyseur afin de pouvoir à terme réaliser une flamme à hydrogène. Pour cela, nous avons entamé des recherches afin de savoir quel électrolyseur nous pourrions possiblement acheter. Nous avons regardé sur différents sites ainsi que les sites proposés par notre professeur et nous avons réalisé un tableau récapitulatif de nos recherches avec les différentes caractéristiques de différents électrolyseurs (voir tableau complet en annexe).

Après nos premières recherches, notre professeur nous a conseillé de refaire notre tableau sur Excel afin de mieux comparer les différents électrolyseurs et de mettre toutes les grandeurs dans la même unité ainsi que de continuer à chercher sur différents sites. Nous avons aussi demandé à certains professeurs de chimie s'ils n'avaient pas déjà des électrolyseurs dans leurs laboratoires et si non, s'ils leurs seraient utile d'en avoir et avec quelles caractéristiques. Les caractéristiques n'ont pas été précisées mais l'achat d'un futur électrolyseur leur serait probablement utile.

Ces recherches n'ont pas abouti à la commande d'un électrolyseur dans notre temps de projet (délais de livraison trop long) donc nous ne pourrons pas l'utiliser mais il servira à de prochains groupes de projet.

#### Détails du tableau :

Nom du fournisseur	Nom du modèle de l'électrolyseur	Pureté	Débit converti en Nm <sup>3</sup> /h	La puissance (PCI*Q0 <sup>0</sup> ) kW	Dimensions ( H x L x P)	Prix (euros)
Piel	Gen Gaz	99.9999%	2,4	7,2	40* 38*53 cm	8 649,60 € TTC
Dyoflamme	Bulane	pas de précision	0,71	2,13	40,3 x 36,1 x 97,4 cm	5 684,59 € HT
M.S.E.I	BI -Eau Energie	pas de précision	0,662	1,986	51*50*50 cm	6 400,00 €
Cookson	Microdard Aquafame, modèle 800	pas de précision	0,113	0,339	40 *8 *38 cm	2 450,00 €
ErreDue	MARS	>99.99999%	0,034	0,102	24,5*46*50 cm	11,00 €
VICI DBS / Labo and Co	NM-600 Plus - VICI DBS	pas de précision	0,034	0,102	23 *45 *37 cm	11 330,00 € HT
LNI SWISSGAS	HG PRO series	99.99996 %	0,028	0,084	27*44*41 cm	7000 à 15000 €
VICI DBS / Labo and Co	PG-100 Plus - VICI DBS	99.9996 %	0,006	0,018	23 *48* 37 cm	5 884,00 € HT
Horizon	HYDROFILL PRO	99.99%	0,003	0,009	14,5*20,8*15,3 cm	999 € + 22 livraison.

Tableau 2 : Aperçu d'une partie de notre tableau

Nous recherchons un électrolyseur avec un fonctionnement continu et une puissance de 1 KW/H (puissance assez importante). Les trois électrolyseurs qui sont proches de cette puissance sont le Proton Energy, Bulane et le MSEI. Mais le proton energy a un rapport cyclique donc il n'est pas intéressant à ce point (on l'a donc enlevé du tableau pour le tableau récapitulatif ci-dessus). On reste donc avec le MSEI et le Bulane proche de 2 KW/H. Les deux étant en fonctionnement continu et avec des puretés très proches, il nous a fallu trancher et notre professeur a commandé le MSEI.

On peut donc remarquer à la suite de ce tableau qu'il y a deux types d'applications : les électrolyseurs de grande pureté pour des calibrations d'analyses chimiques mais à faible débit et faible puissance (mais en créant des réservoirs de grande quantité on pourrait stocker l'hydrogène pour l'utiliser après coup et peut-être ainsi augmenter la puissance en sortie) et les électrolyseurs dit de "production" d'hydrogène avec une plus grande puissance mais des puretés plus faibles. Les dimensions et poids de ces machines étant toutes sur une même échelle de grandeur, c'est bien ces deux caractéristiques qu'il faut prendre en compte.

Dans un deuxième temps, nous avons à notre disposition un très ancien électrolyseur. Nous avons traduit le mode d'emploi présent sur l'électrolyseur, puis nous avons contacté une

professeure d'allemand afin de vérifier notre traduction. Ensuite, nous avons entamé des recherches pour trouver des informations plus précises sur son utilisation et sur la solution alcaline nécessaire à la manipulation. Les résultats sur internet étaient très insuffisants mais nous avons tout de même trouvé une potentielle solution alcaline qui pourrait être utilisée avec cet électrolyseur (la potasse).

Dans la partie des calculs, nous avons d'abord étudié le cas où le combustible est uniquement du dihydrogène. Nous avons utilisé le PCI de H<sub>2</sub>, le pouvoir comburivore de H<sub>2</sub>, l'excès d'air et les données des différents électrolyseurs indiquées dans le tableau comparatif pour calculer la puissance, le débit d'air et le débit total (voir tableau en annexe).

Ensuite nous avons pris le brûleur "Bluff-Body" de prémélange pour étudier le cas où le combustible est un mélange de dihydrogène et de méthane. Nous avons introduit un nouveau paramètre  $\alpha$  (proportion volumique H<sub>2</sub>) pour différencier le débit du H<sub>2</sub> et le débit du CH<sub>4</sub>. Nous avons calculé le débit d'air total, le débit du H<sub>2</sub>, le débit du CH<sub>4</sub> et la vitesse en utilisant la surface et la puissance totale du brûleur. Les détails des calculs sont dans l'Excel calcul.

## 5.2. L'expérience

Dans le cadre de l'expérience de notre projet P6 nous avons rencontré Clément un doctorant effectuant ses recherches aux laboratoires CORIA. Sa thèse porte sur l'étude des flammes d'hydrogène en général. Son aide a été précieuse pour nous et nous a permis de découvrir le monde de la recherche. L'objectif de cette expérience était donc d'étudier les caractéristiques de la flamme produite par hydrogène en la comparant avec celle du méthane afin de pouvoir quantifier l'intensité d'énergie produite par les 2 flammes et ainsi voir jusqu'à quel point pouvons-nous compter sur l'hydrogène comme vecteur énergétique et substituant du méthane dans le cadre de la transition énergétique.

Dans le cadre de l'expérience une oxycombustion a été réalisée. Cette combustion utilise l'oxygène pur à la place de l'air comme carburant afin d'augmenter la température de la flamme car l'azote nécessite une grande énergie pour se réchauffer. Cette combustion a été réalisée dans une chambre à combustion avec un injecteur coaxial qui comporte deux tuyaux imbriqués l'un dans l'autre suivant le même axe. Le tuyau intérieur contient le combustible (méthane) et le tuyau extérieur contient le comburant (l'oxygène pur). Cet injecteur permet de confiner le gaz injecté afin d'obtenir un bon mélange avec une faible chute de pression. Le corps de la chambre est quant à lui conçu pour résister aux fortes pressions et températures et pour empêcher la dissipation de l'énergie dégagée à la suite de la combustion.

La flamme est ensuite analysée par spectrophotométrie. Cette technique permet d'obtenir des spectres de la flamme grâce aux longueurs d'ondes émises par chaque photon; celles-ci sont réfléchies sur une lentille convergente puis passent à travers une fibre optique qui les transmet par réflexion totale interne au lecteur. L'analyse des spectres obtenus nous permet ensuite d'identifier les différentes espèces chimiques (moléculaires et atomiques) de la flamme.

Puisque l'objectif de notre expérience est de comparer les caractéristiques de la flamme d'hydrogène avec celle du méthane, nous avons fait varier progressivement la proportion volumique d'hydrogène ( $\alpha$ ) dans le tuyau de combustible. Dans un premier temps nous avons débuté avec un  $\alpha = 0$ , c'est à dire 100% de méthane. Nous avons alors observé une flamme avec une base étroite et de couleur bleue. Nous avons ensuite augmenté la valeur d' $\alpha$  par intervalle de 10% jusqu'à 100%. Nous avons constaté que plus l'on augmentait la quantité d'hydrogène plus la flamme s'élargissait et devenait jaune. La couleur bleue de la flamme est due aux radicaux CH présents majoritairement au début et qui disparaissent au fur à mesure pour laisser place au sodium (et à la suie) de couleur jaune orangé.



Figure 8 : Flamme 100% méthane Figure 9 : Flamme 100% hydrogène

### 5.3. Les résultats

Pour l'analyse des résultats, nous avons dû réfléchir à un programme qui puisse calculer, à l'aide des fichiers textes que nous donnait l'expérience, la moyenne et l'écart-type des intensités. Les fichiers textes (Annexe) étaient composés d'environ 2000 intensités qui correspondaient chacune à une longueur d'onde dans un intervalle de 200,763 nm et 1121,335 nm. Nous avons aussi, pour chaque alpha, 50 fichiers texte ayant ces données et donc, en compilant ces fichiers textes dans un programme, nous pouvions calculer la moyenne et l'écart-type pour chaque longueur d'onde. Les résultats sont répertoriés dans un fichier texte (Annexe).

Ensuite, pour étudier ces données, nous avons mis les résultats dans un fichier Excel afin d'avoir, pour chaque alpha, un graphique représentatif de la moyenne et de l'écart-type en fonction de la longueur d'onde. Ces graphes représentent les spectres chimiques de la combustion.

Enfin, nous avons calculé le taux de fluctuation pour chaque longueur d'onde en divisant l'écart-type par la moyenne. Ce taux de fluctuation est un pourcentage qui représente la variation des intensités selon les différentes mesures prises. Par exemple, si un taux de fluctuation d'une certaine longueur d'onde dépasse les 40%, c'est que les intensités correspondant à cette longueur d'onde étaient très diverses. Nous avons ensuite créé un graphique représentatif de ce taux de fluctuation. Une fois qu'on a ces différents graphiques, nous pouvons passer à l'analyse.

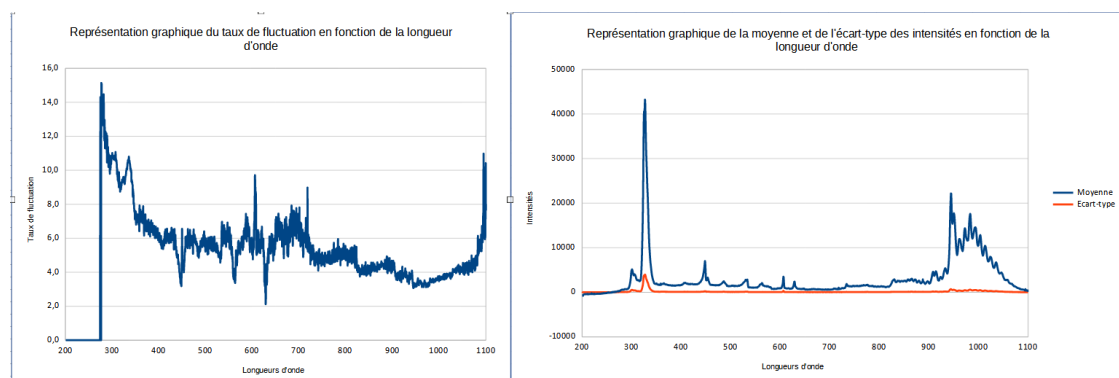


Figure 10 : Spectre chimique et taux de fluctuation pour l'expérience correspondant à une combustion de 30% d'hydrogène

Tout d'abord, chaque spectre chimique se ressemble ; au niveau des longueurs d'onde 300-350, nous remarquons un pic représentatif de la présence d'OH, un intermédiaire réactionnel dans la combustion. Nous avons aussi une concentration de pics pour les



longueurs d'onde 900-1050, elle démontre la création de vapeur d'eau dans la combustion. Ensuite, nous avons, selon les alphas, une présence de sodium représentée par un pic au niveau de la longueur d'onde 589. Enfin, nous avons une concentration de pics entre les longueurs d'onde 450-550 représentative de la présence de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et plus précisément, la longueur d'onde 430 représente la présence de carbone. Cependant, les molécules de méthane ne sont pas représentées par ce spectre, les longueurs d'onde correspondantes ne sont pas visibles mais, le méthane étant composé de carbone, nous pouvons trouver un lien entre les pics correspondants au carbone et la présence de méthane. Quant à l'hydrogène, le spectre chimique n'indique pas de pic lui correspondant. Pour la suite des analyses, nous allons notamment étudier les variations des présences de sodium et de dioxyde de carbone car il y a peu de variations entre les différences présence d'OH et de vapeur d'eau.

Si on compare les différentes expériences entre elles, toutes indiquées en annexe, nous remarquons que l'intensité de sodium est la plus présente pour l'alpha 80 (9688). Nous remarquons aussi une présence très faible de dioxyde de carbone. Ceci peut être expliqué par le fait que l'apport énergétique d'environ 76% d'hydrogène est égale à l'apport énergétique d'environ 24% de méthane. Nous avons calculé cette valeur à l'aide de formules utilisant les pouvoirs comburivores et calorifiques intérieurs respectifs de l'hydrogène et du méthane. Ainsi lorsqu'il y a 80% d'hydrogène dans la combustion de la flamme, la puissance énergétique qu'apporte l'hydrogène est supérieure à la puissance énergétique apportée par le méthane. Ce fait peut être expliqué par la différence entre les pouvoirs calorifiques inférieurs, 3 kWh/Nm<sup>3</sup> pour l'hydrogène et 9,97 kWh/Nm<sup>3</sup> pour le méthane, qui montre que le méthane a un apport énergétique naturel plus conséquent. Ce n'est qu'une hypothèse liée à des observations concordantes.

Ensuite, nous remarquons que la présence en dioxyde de carbone diminue au fur et à mesure que l'alpha augmente car les graphes présentent moins de pics aux alentours des longueurs d'ondes 450-550. Ce qui est logique puisqu'il y a de moins en moins d'apport de méthane dans la flamme. Cependant, cela n'est pas identique pour le sodium. Nous remarquons une forte intensité, environ 5500 pour le sodium lorsque alpha est égale à 0 et 10. Cette intensité diminue ensuite aux alentours de 3500 mais atteint 8870 à alpha 50. Elle descend à 3268 pour alpha 60 et augmente à nouveau pour atteindre 9688 pour alpha 80. L'intensité diminue de nouveau et revient à 5316 pour alpha 100.

Nous pouvons donc remarquer que l'intensité varie énormément et nous ne pouvons pas réellement expliquer ce phénomène. Si l'on compare ces observations avec le taux de fluctuation, nous remarquons que le taux de fluctuation est plus faible lorsque l'intensité de l'hydrogène est faible (aux alentours des 20%). De plus, hormis lorsque alpha est égale à 50, les taux de fluctuation des alphas ayant des intensités élevées sont aussi élevés (minimum 29%). Enfin, nous remarquons que les taux de fluctuations des longueurs d'onde 600 sont très élevées pour alpha 0 et alpha 100, respectivement 55% et 46%.

Finalement, nous pouvons expliquer que certaines expériences démontrant des intensités de sodium élevées ont des variations de ces intensités très fortes dans un court laps de temps. Nous avons donc, peut-être, des expériences qui mériteraient d'être étudiées sur un temps plus long afin d'être certain des résultats. Nous remarquons aussi que les taux de fluctuation relatifs aux autres espèces ne sont pas aussi élevés que ceux correspondant à l'hydrogène, qui atteignent au maximum 20%. Nous pouvons dire que le sodium peut être qualifié d'instable dans une combustion d'hydrogène. C'est donc difficile, dans une expérience courte, de trouver des observations et des analyses cohérentes. De plus, le fait que l'hydrogène ne soit pas représenté sur les spectres nous bloque sur les études de son comportement lors des différentes combustions et nous oblige à faire quelques hypothèses.

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion, nous avons tout au long de ce semestre pu acquérir de nouvelles compétences; que ce soit dans nos aptitudes à rechercher des informations, dans la réalisation de travaux en groupe, mais aussi dans le suivi de l'avancée d'un projet (gestion du délai) ou dans la communication en équipe. En effet, notre bonne communication et notre investissement a permis la finalisation de notre projet dans les meilleures conditions et chacun a pu trouver sa place dans le groupe.

De plus, certains étudiants ont dû communiquer avec le monde professionnel comme différentes entreprises ou certains professeurs et d'autres ont dû apprendre à utiliser des outils informatiques externes au projet, pour coder le programme informatique par exemple. Nous avons aussi entrepris une expérience inédite, peu documenté, car l'étude de la combustion d'hydrogène n'est pas très populaire et nécessite encore de nombreuses recherches pour pouvoir envisager un avenir fonctionnant à l'énergie produite par l'hydrogène. Finalement, ce projet nous a appris à travailler autrement qu'habituellement et nous a permis de comprendre certains points du travail de chercheur ou de doctorant.

Nous avons aussi appris de nombreuses informations sur un sujet qui nous intéresse. Dans un premier temps, par rapport à l'étude de la production d'hydrogène, on a vu qu'il existe une méthode principale pour produire de l'hydrogène vert, l'électrolyse, qui utilise seulement de l'eau et un courant électrique. Cette méthode est en cours de développement puisqu'elle possède de nombreux atouts pour le futur, notamment en matière de transition énergétique. Pour la partie combustion, nous avons comparé la combustion d'hydrogène avec la combustion de méthane, remarquant notamment que, la combustion d'hydrogène vert est une énergie dite « décarbonée ». Nos recherches nous ont également amené à expliquer les différences entre les brûleurs utilisant des flammes mélangées ou prémélangées, ainsi que les différentes applications de la combustion d'hydrogène dans la vie quotidienne.

Concernant notre expérience, nous n'avons pas pu réaliser l'idée de départ qui demandait l'utilisation d'un électrolyseur pour créer de l'hydrogène afin de l'emmener dans un brûleur et d'étudier la flamme créée lors sa combustion. N'ayant pas eu de réponses assez rapides des entreprises et avec un temps de livraison trop important, nous n'avons donc pas pu utiliser un électrolyseur. Mais grâce à l'expérience d'un doctorant en laboratoire Coria, nous avons pu observer une flamme en combustion qui était composée partiellement de méthane ou d'hydrogène. Nous avons ensuite analysé, grâce à différents outils informatiques, les différentes mesures d'expériences pour obtenir à la fin, plusieurs spectres chimiques et observations nous permettant encore ici de comprendre plus en détails certains aspects de la combustion d'hydrogène. Nous avons notamment pu constater la différence de production d'énergie entre le méthane et l'hydrogène, la création d'intermédiaires réactionnels et les difficultés d'études de l'hydrogène qui a comme caractéristique une grande variation lors de sa combustion.

Enfin, à la fin de ce projet, nous avons constaté que la combustion d'hydrogène vert produit par électrolyseur a beaucoup d'avantages. Evidemment, la production d'énergie liée à cette combustion n'est que très peu développée mais si elle le devient, elle peut devenir une production d'énergie écologique, car elle pourrait s'autosuffire, c'est-à-dire, produire plus d'énergie qu'elle n'en consomme. Cependant, beaucoup de points restent inconnus et il faut continuer à étudier les différents comportements de l'hydrogène pour à terme, l'utiliser dans la vie quotidienne, comme dans le chauffage d'une maison par exemple ou peut-être même pour faire fonctionner des voitures. Nous proposons donc de poursuivre activement les études sur l'hydrogène dans le domaine de la recherche pour l'avenir.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

### INTRODUCTION

- [1] <https://www.engie.com/renouvelables/hydrogene/hydrogene-fonctionnement> (04 juin 2022)
- [2] <https://www.encyclopedie-energie.org/lhydrogene/#:~:text=Histoire,-Fig.&text=L%27histoire%20de%20l%27hydrog%C3%A8ne.inodore%20qui%20s%27en%20d%C3%A9gageait.> (04 juin 2022)

### LES COULEURS DE L'HYDROGÈNE

- [3] [L'hydrogène et ses 50 nuances de gris, vert, bleu ... - Energy Cities \(energy-cities.eu\)](https://www.energy-cities.eu/fr/lhydrogene-et-ses-50-nuances-de-gris-vert-bleu...) (04 juin 2022)
- [4] [Toutes les couleurs de l'hydrogène | mobility-observatory.arval.fr](https://www.mobility-observatory.arval.fr/toutes-les-couleurs-de-lhydrogene) (04 juin 2022)
- [5] [EEIP: Décoder le code couleur de l'hydrogène \(ee-ip.org\)](https://www.ee-ip.org/fr/decoder-le-code-couleur-de-lhydrogene) (04 juin 2022)

### AVANTAGES INCONVÉNIENTS DE L'HYDROGÈNE

- [6] <https://www.ecologie.gouv.fr/lhydrogene-et-avantages> (avantages de l'hydrogène, 16 mars 2022)
- [7] [https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Techniques\\_prod\\_H2\\_web.pdf](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Techniques_prod_H2_web.pdf) (risques associés à la production d'hydrogène, 30 mars 2022)
- [8] Annexe 1, [L'hydrogène cet hallucinogène, Michel Gay, 26 septembre 2013] (comparaison de l'hydrogène avec l'essence, 23 mars 2002)
- [9] <https://mateis.insa-lyon.fr/fr/content/fragilisation-par-lhydrogene> (fragilisation par hydrogène, 30 mars 2022)
- [10] <https://www.ecosources.org/stockage-hydrogene> (le mode de stockage de l'hydrogène, 30 mars 2022)

### PROJET DU HAVRE

- [11] [Feu vert aux deux usines de production d'hydrogène en Normandie \(ouest-france.fr\)](https://www.ouest-france.fr/normandie/usine-d-hydrogene-air-liquide-entre-en-capital-d-h2v-7131803) (04 juin 2022)
- [12] <https://www.ouest-france.fr/normandie/usine-d-hydrogene-air-liquide-entre-en-capital-d-h2v-7131803> (04 juin 2022)
- [13] <https://www.paris-normandie.fr/id243050/article/2021-10-21/projet-hydrogene-air-liquide-rachete-h2v-saint-jean-de-folleville-pres-du-havre> (04 juin 2022)

### PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE

- [14] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene> (les différentes méthodes de production d'hydrogène, 2 mars 2022)
- [15] [https://record-net.org/storage/etudes/13-0239-1A/rapport/Rapport\\_record13-0239\\_1A-V2.pdf](https://record-net.org/storage/etudes/13-0239-1A/rapport/Rapport_record13-0239_1A-V2.pdf) (les différentes méthodes de production de l'hydrogène, 9 mars 2022)
- [16] <https://www.youtube.com/watch?v=sza5lqWAXi0> (premier site de production d'hydrogène vert en France à Bouin, 04 juin 2022)
- [17] <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-produire-lhydrogene> (Article sur les différents modes de production de l'hydrogène sur le site internet Air liquide énergies, 04 juin 2022)
- [18] [Découvrir & Comprendre - L'hydrogène \(cea.fr\)](https://www.cea.fr/decouvrir-comprendre-lhydrogene) (vidéos sur la production de l'hydrogène, 04 juin 2022)

### APPLICATION DE LA COMBUSTION

- [19] <https://www.revolution-energetique.com/la-chaudiere-a-hydrogene-debarque-en-france/> (Chaudières à hydrogène en France, 16 mars 2022)
- [20] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/une-flamme-propre-a-base-dhydrogene-afin-de-decar> (Bulane a développé une gamme d'électrolyseurs pour produire une flamme à très haute température, sans dégagement de CO<sub>2</sub>, 30 mars 2022)

[21] [boner-la-combustion-103744/Une invention bretonne pour chauffer sans polluer - Edition du soir Ouest-France - 18/10/2021](#) (Invention d'un aérotherme qui fonctionne grâce à la combustion de l'hydrogène, 6 avril 2022)

[22] [BDR Thermea — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#) (Histoire du groupe BDR Thermea, 13 avril 2022)

[23] [Chaudières à hydrogène \(bdrthermeagroup.com\)](#) (Chaudières BDR Thermea, 13 avril 2022)

## FONCTIONNEMENT D'UN ÉLECTROLYSEUR

[25] <https://www.youtube.com/watch?v=AFZZoMc8PjU> (23 Février 2022)

[26] <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-4-hqe/differentes-technologies-electrolyseur.php> (9 Mars 2022)

[27] <https://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/359/dossier/l-electrolyse-de-l-eau> (16 Mars 2022)

## COMBUSTION

[28] [Combustion — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#) (16 Mars 2022)

[29] <https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2021/02/GP8-Combustion-de-H2-NH3.pdf> (9 Mars 2022)

[30] <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-hydrogene.aspx> (9 Mars 2022)

## TYPES DE FLAMME

[31] [Flamme - T.P.E Combustion \(google.com\)](#) (30 mars 2022)

[32] [Redirecting \(google.com\)](#) (6 avril 2022)

[33] [Memoire Online - Investigation numérique et expérimentale d'une flamme de diffusion d'impact - Nadjib GHITI](#) (13 avril 2022)

[34] [Memoire Online - Simulation numérique d'une flamme turbulente prémélangée axysymétrique par le code fluent - CHERAD Ibrahim OUBADI Abdelghani](#) (23 mars 2022)

## APPLICATIONS

[35] [https://res.cloudinary.com/mychauffage/image/upload/v1640184148/MyChauffage/chaudiere-hydrogene\\_fonctionnement.png](https://res.cloudinary.com/mychauffage/image/upload/v1640184148/MyChauffage/chaudiere-hydrogene_fonctionnement.png) (flamme de diffusion et de prémélange, 04 juin 2022)

[36] [Flamme \(combustion\) — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#) (Explication flamme de diffusion et flamme de prémélange, 23 mars 2022)

[37] <https://sites.google.com/site/tpecombustion/flamme> (Structure de flamme et schéma, 30 mars 2022)

[38] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02126043/document> (Différence entre la combustion non pré-mélangée laminaire et turbulente, 6 avril 2022)

[39] [https://www.memoireonline.com/07/08/1325/m\\_investigation-numerique-experimentale-flamme-diffusion-impact1.html](https://www.memoireonline.com/07/08/1325/m_investigation-numerique-experimentale-flamme-diffusion-impact1.html) (Types de flamme, 13 avril 2022)

## LES DIFFERENTS ELECTROLYSEURS

[40] [Chalumeau hydrogène - Poste à souder avec un chalumeau pour braser, chauffer, le bi eau énergie MSEI . \(bi-eau-energie.fr\)](#) (04 juin 2022)

Les autres liens sont directement dans le tableau.

## DESCRIPTION EXPERIENCE

[41] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Chambre\\_de\\_combustion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chambre_de_combustion) (18 mai 2022)

[42] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrophotom%C3%A9trie\\_d%27%C3%A9mission\\_de\\_flamme](https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrophotom%C3%A9trie_d%27%C3%A9mission_de_flamme) (une image de spectrophotométrie de flamme, 25 mai 2022)

## FIGURES et TABLEAUX

Figure1 : [https://prmeng.rosselcdn.net/sites/default/files/dpistyles\\_v2/ena\\_16\\_9\\_extra\\_big/2021/05/10/node\\_191\\_278/38481332/public/2021/05/10/B9726872271Z.1\\_20210510182236\\_000%2BGT9I1GKAR.2-0.jpg?itok=bPkRjy\\_j1620663762](https://prmeng.rosselcdn.net/sites/default/files/dpistyles_v2/ena_16_9_extra_big/2021/05/10/node_191_278/38481332/public/2021/05/10/B9726872271Z.1_20210510182236_000%2BGT9I1GKAR.2-0.jpg?itok=bPkRjy_j1620663762)

Figure 2 : [L'incendie expliqué avec le triangle du feu \(extincteur.net\)](#) (2 Juin 2022)

Figure 3 : [Comment ça marche - GRHYD](#) (2 juin 2022)

Figure 4 : [Memoire Online - Simulation numérique d'une flamme turbulente prémélangée axysimétrique par le code fluent - CHERAD Ibrahim OUBADI Abdelghani](#) (6 avril 2022)

Figure 5 : [Laminar Flow and Turbulent Flow of fluid \(withdebasishsir.wixsite.com\)](#) (23 mars 2022)

Figure 6 : [Chaudière à hydrogène : comment ça marche ? \(izi-by-edf-renov.fr\)](#) (23 mars 2022)

Figure 7 : [Une flamme propre à base d'hydrogène afin de décarboner la combustion | Techniques de l'Ingénieur \(techniques-ingenieur.fr\)](#) (6 avril 2022)

Figures 8 et 9 : Photos de l'expérience depuis le téléphone

Figure 10 : Capture d'écran d'analyses représentées par notre tableau Excel

Figures 11,12 et 13 : <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-4-hqe/differentes-technologies-electrolyseur.php> (9 mars 2022)

Figure 14 : <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/632968> (30 mars 2022)

Figure 15 : [1-Structure d'une flamme de diffusion laminaire | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#) (6 avril 2022)

Figure 16 : <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/632968> (13 avril 2022)

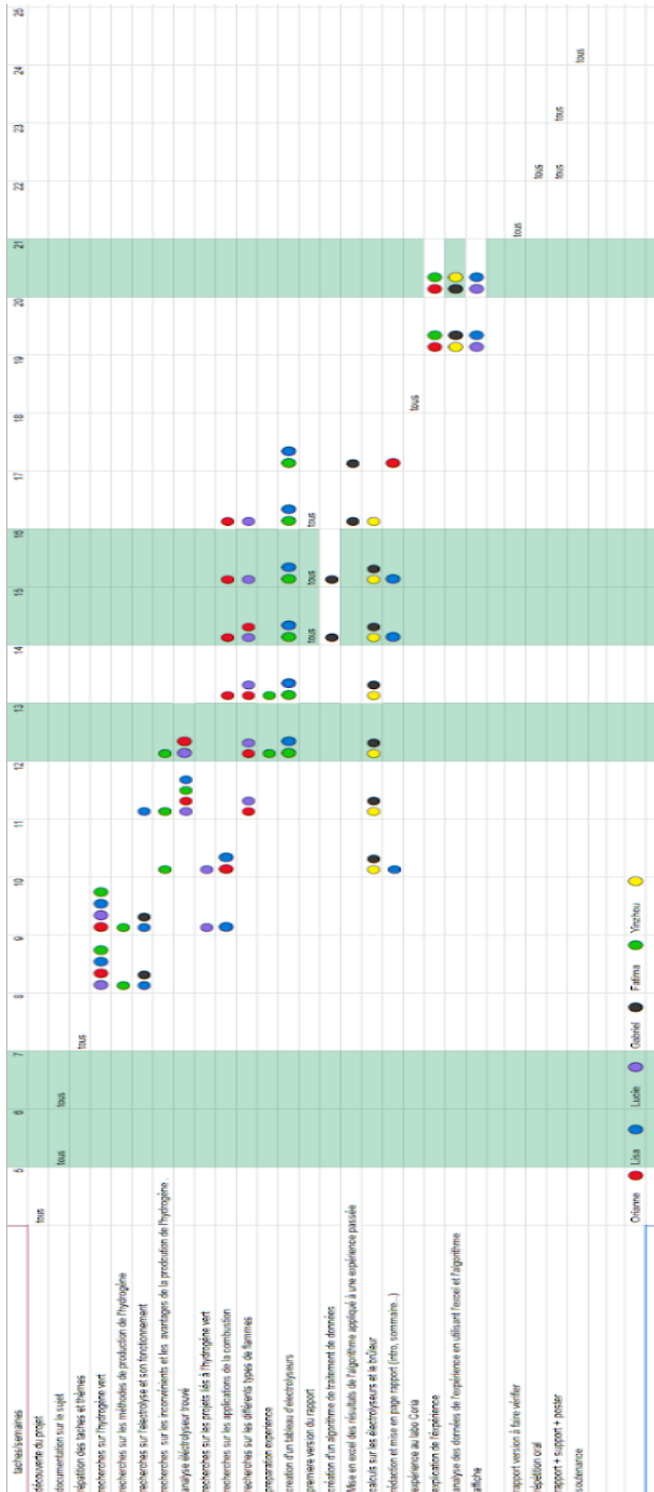
Figure 17 : [Fr- Structure de flamme \(upmc.fr\)](#) (23 mars 2022)

Tableau 1: Diagramme de Gant rédigée sur un Excel

Tableau 2: Aperçu d'une partie du tableau contenant les différents électrolyseurs recherchés rédigé sur un Excel

## 8. ANNEXES

### 8.1. Diagramme de Gantt



## 8.2. Les différentes couleurs de l'hydrogène

La couleur attribuée à l'hydrogène n'est rien de plus qu'une étiquette qui permet de le classer selon son origine et la quantité de dioxyde de carbone libérée lors de sa production. En d'autres termes, un moyen simple de comprendre à quel point c'est "propre" :

- **HYDROGÈNE NATUREL**

Hydrogène blanc :

Il est également connu sous le nom « d'hydrogène natif » ou « hydrogène naturel ». Il y a trois phénomènes géologiques différents qui produisent l'hydrogène blanc : le dégazage mantellique, l'altération hydrothermale des minéraux ferreux par une réaction d'oxydoréduction ou la radiolyse de l'eau riche en radioéléments. A l'état naturel H essentiellement présent sous la forme gaz (H<sub>2</sub>) et grâce à sa couleur, on l'appelle donc « l'hydrogène blanc ». Comme c'est rare de trouver l'hydrogène à l'état naturel dans des couches géologiques, on le produit artificiellement. Les différentes nuances de l'hydrogène interviennent donc et elles sont relatives à la source ou le procédé de production.<sup>[3]</sup>

- **ÉMISSIONS DE CARBONE TRÈS ÉLEVÉES**

Hydrogène brun/noir :

Il est obtenu grâce à la gazéification du charbon (le plus ancien procédé)<sup>[3]</sup> et, au cours du processus de production, du dioxyde de carbone est libéré. Appelé brun ou noir selon le type de charbon (noir: fabriqué à partir de charbon bitumineux; brun: fabriqué à partir de lignite et plus intensif en carbone que l'hydrogène noir<sup>[5]</sup>). Ce procédé est plus polluant que les autres car le CO<sub>2</sub> et CO ne sont pas réutilisables et sont directement rejetés dans l'atmosphère (hydrogène noir: sans piégeage du carbone; hydrogène brun: sans captage du carbone<sup>[5]</sup>).

- **ÉMISSIONS DE CARBONE ÉLEVÉES**

Hydrogène gris :

Il est obtenu à partir du reformage du gaz naturel (le procédé vaporeformage). Il s'agit actuellement de la production la plus abondante et la moins chère mais ce procédé produit également beaucoup de CO<sub>2</sub>. Lorsque le CO<sub>2</sub> produit n'est pas capté, l'hydrogène produit est alors appelé l'hydrogène gris. La production de 1 tonne de cendres H<sub>2</sub> émettra 9 à 12 tonnes de CO<sub>2</sub><sup>[3-4]</sup>.

- **ÉMISSIONS DE CARBONE MOYENNES**

Hydrogène turquoise :

Il est obtenu grâce à la pyrolyse du méthane: à haute température, le méthane ou les déchets plastiques sont séparés en H<sub>2</sub> gazeux et en carbone solide et l'hydrogène produit est nommé hydrogène turquoise. Les émissions de carbones sont liées au carburant nécessaire pour la pyrolyse.<sup>[3-5]</sup>

- **ÉMISSIONS DE CARBONE TRÈS FAIBLES OU PAS DES ÉMISSIONS**

Hydrogène vert :

Il est fabriqué par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité renouvelable (d'origine hydraulique, éolienne, ou autre). Il est donc appelé «hydrogène propre». Il peut aussi être produit à partir de biogaz provenant de déchets d'élevage, agricoles et municipaux. Ce procédé ne redonne que de l'oxygène à l'atmosphère. Cependant, la production de cet hydrogène ne représente qu'environ 1 % de la production totale d'hydrogène.<sup>[3]</sup>

Hydrogène rose :

Cette production utilise le même procédé que l'hydrogène vert, à la différence que l'électrolyse de l'eau utilise de l'énergie nucléaire.<sup>[5]</sup>

Hydrogène jaune :

La production d'hydrogène jaune utilise le même procédé que l'hydrogène vert, à la différence que l'électrolyse de l'eau utilise de l'énergie solaire ou l'électricité de sources mélangées.<sup>[3]</sup>

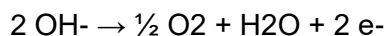


### 8.3. Les trois types d'électrolyse

#### 1. L'électrolyse alcaline :

D'après le site [26], qui explique les différents types d'électrolyses, le procédé d'électrolyse alcaline suit le processus originel de l'électrolyse cependant, c'est une technologie éprouvée, l'eau y est décomposée entre deux électrodes monopolaires baignant dans un électrolyte basique aussi appelée potasse. L'électrolyte est un liquide dont le rôle va être de servir de « milieu » pour que se produise la réaction.

À l'anode réductrice se dégage de l'oxygène, selon la réaction chimique suivante:



À la cathode oxydante se dégage l'hydrogène, selon la réaction chimique suivante:

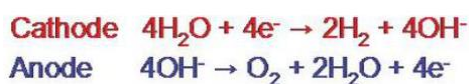
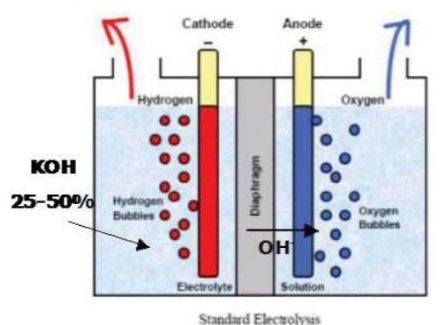
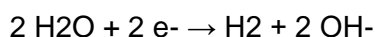


Figure 11 : Schéma représentatif du processus d'électrolyse alcaline

Schéma représentatif du processus d'électrolyse alcaline

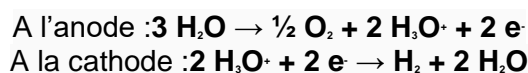
Actuellement, les électrolyseurs à technologie alcaline ont des températures de fonctionnement comprises entre 80 et 90 °C.

La pression de fonctionnement de la plupart des électrolyseurs industriels à technologie alcaline s'échelonne de 1bar jusqu'à environ 30 bars.

Les rendements énergétiques de tels électrolyseurs sont de l'ordre de 75 à 90 %, pour une durée de vie supérieure à 80 000 heures de fonctionnement, pouvant même aller jusqu'à 160 000 heures

#### 2. L'électrolyse PEM:

Ensuite, par rapport à l'électrolyse PEM, la principale caractéristique de ce type d'électrolyseur est son électrolyte solide, qui est constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits ( $\text{H}_2$  et  $\text{O}_2$ ), selon les réactions ci-dessous :



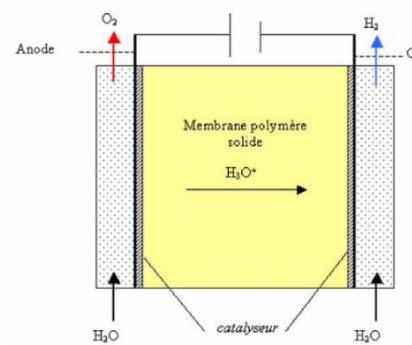


Figure 12 : Schéma représentatif du processus d'électrolyse PEM

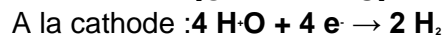
Au niveau des matériaux, l'anode est constitué d'un graphite-PTFE. Il y a ensuite du ruthénium et de l'Iridium qui composent le catalyseur.

Ces électrolyseurs, au même titre que les électrolyseurs précédents, ont des températures minimales de 80°C, mais peuvent aussi fonctionner à 120°C, pour des pressions comprises entre 0.1 et 0.7 MPa. De plus, cette technologie permet d'atteindre un rendement de 90%.

### 3. L'électrolyse à Haute température:

Enfin, la technologie d'électrolyse à Haute Température décompose les molécules d'eau sous forme de vapeur, au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend de la nature de l'électrolyte, elle permet soit une conduction protonique, soit une conduction d'ions superoxydes O<sub>2</sub><sup>-</sup>.

Plus précisément, un électrolyte à conduction protonique donne les réactions suivantes:



Un électrolyte à conduction d'ions superoxydes donne les réactions suivantes:

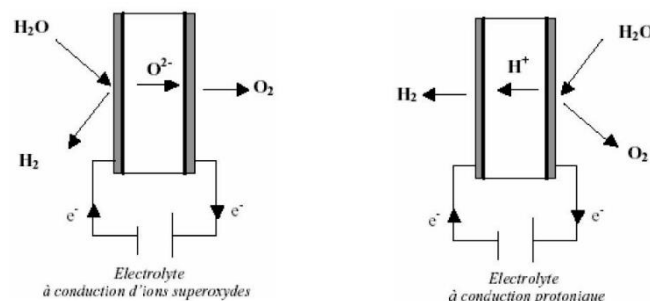
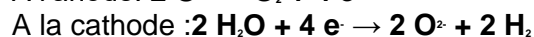
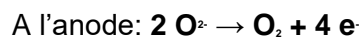


Figure III-8 : principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.

Figure 13 : Schéma représentatif du processus d'électrolyse à Haute température

L'avantage principal de ces types d'électrolyse est que l'énergie de production est apportée par de l'électricité mais aussi par la chaleur produite. Les températures varient de 700 à 1000°C, l'électrolyseur ne fonctionne presque qu'avec la chaleur qui, elle, est beaucoup moins chère que l'électricité. Plus précisément, l'augmentation de température diminue l'ensemble des surtensions d'électrodes afin de diminuer la consommation d'électricité. Vis-à-vis des matériaux, l'anode est généralement constituée de manganites avec comme catalyseur, du nickel de Cermet.

La cathode est de son côté constituée de billes de nickel cofritté voire du Nickel de Cermet. Les catalyseurs correspondants sont eux, à base d'oxyde de cérium. Pour l'électrolyte dans le cas d'une conduction protonique, on utilise les oxydes de cérium et de zircone. Et, pour l'électrolyte dans le cas d'ions superoxydes, on utilise une céramique en zircone.

Ces trois méthodes d'électrolyse ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients mais si l'on veut avoir une production d'énergie peu coûteuse en électricité, les électrolyseurs à Haute températures semblent plus cohérents. Or, c'est une technologie récente et qui doit encore être améliorée afin d'être réellement productive.

## 8.4. Flammes de diffusion et flammes de prémélange

### Flammes de diffusion :

Comme expliqué précédemment la flamme de diffusion est une flamme pour laquelle le combustible et le comburant sont séparés avant la combustion. Elle porte le nom de “flamme de diffusion” car c’est le phénomène de diffusion qui permet la rencontre des réactifs à l’origine séparés. On peut analyser la flamme en la séparant en différentes parties comme on peut voir sur le schéma ci-dessous :

- Le centre où se trouve le gaz combustible
- Une mince couche de gaz où la réaction de combustion prend place
- L’extérieur de la flamme où se dégagent les produits de réaction et le comburant qui se trouve être le dioxygène de l’air en général

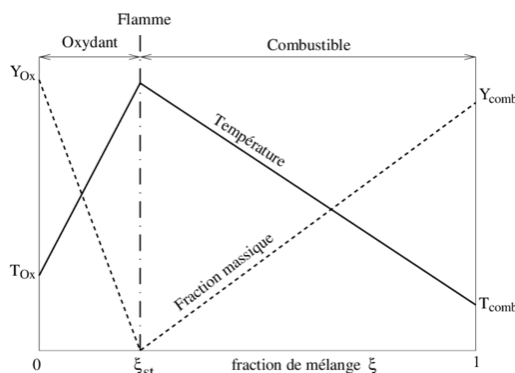


Figure 15 : Graphique de la température et de la fraction massique du comburant en fonction de la fraction du mélange

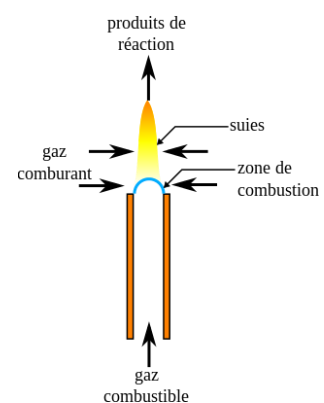


Figure 14 : Schéma d'une structure de flamme de diffusion

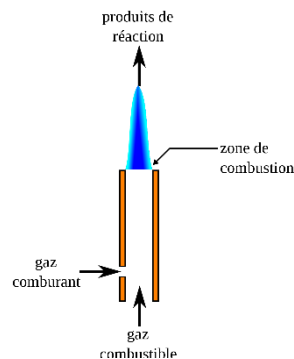
Puisque dans le cas de la flamme de diffusion, le comburant et le combustible ne sont pas mélangés, se sont principalement les phénomènes de radicaux libres et de diffusion de chaleur qui sont à l’origine de la réaction de combustion et donc de propagation de flamme. Tant que le gaz et l’air se mélangent, la combustion persiste.

Cependant, la richesse qui se trouve très élevée au niveau du front de flamme diminue pour atteindre une valeur très faible en sommet de flamme. Cela s'explique par le fait que les gaz combustibles sont en excès à la sortie du tuyau, au niveau du front de flamme, alors qu’au contraire ils sont en très faible proportion en sommet de flamme. Généralement la chaleur entraîne la décomposition des gaz combustibles qui se mélangent alors à l’oxygène de l’air pour être de nouveau séparés par des produits de combustion intermédiaire en sommet de flamme.

La forme de la flamme de diffusion est due aux mouvements de convection qui font monter les gaz chauds par la poussée d’Archimède et par les molécules d’air froid qui descendent par les forces de gravité.

## Flammes de prémélange :

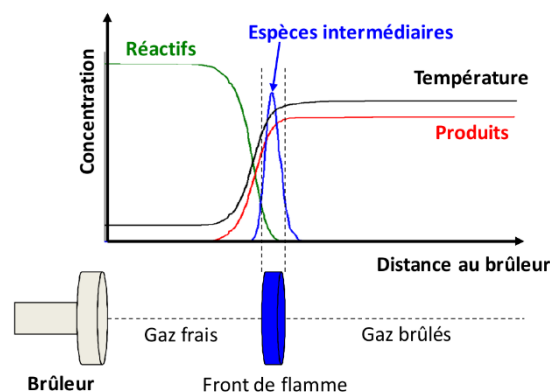
Dans le cas d'une flamme prémélangée comme son nom l'indique le combustible et le comburant sont déjà en contact avant même le phénomène de combustion.



*Figure 16 : Schéma  
d'une structure de  
flamme de prémélange*

La combustion est alors plus efficace donc la flamme est plus chaude ce qui se caractérise par une flamme bleue. La flamme fait office de frontière entre 2 milieux par l'intermédiaire d'une mince couche de gaz. Ces 2 milieux sont :

- Les gaz frais, autrement dit le prémélange
- Les gaz brûlés qui correspondent aux produits de la réaction



*Figure 17 : visualisation des gaz frais et des gaz brûlés*

Il est intéressant d'analyser la stabilité de la flamme dans le cas d'un prémélange. Pour cela il faut comprendre que les gaz frais s'écoulent à une certaine vitesse et que le front de flamme progresse, lui, dans le sens opposé au flux des gaz frais. Un juste milieu entre vitesse d'écoulement des gaz frais et volume des gaz brûlés permet la stabilité de la flamme. En effet, si on a :

- $v_f > v_g$  , soit une vitesse de flux des gaz frais inférieure à la vitesse de front de flamme, alors la flamme se "rapproche" de la source à une vitesse  $(v_f - v_g)$ . Si la vitesse de front de flamme est nettement supérieure, un retour de flamme peut alors se produire.
- $v_f = v_g$  , soit une vitesse de flux frais égale à la vitesse de front de flamme, alors la flamme reste immobile dans le tuyau (en imaginant le cas d'un tuyau infini et parfait). On peut ainsi étudier le front de flamme plus facilement et calculer simplement la

vitesse d'éjection des gaz brûlés puisqu'il ne peut y avoir d'accumulation de gaz dans le tuyau.

- $v_f < v_g$ , soit une vitesse de flux des gaz frais supérieure à la vitesse de front de flamme, alors la flamme se "rapproche" de la sortie. Pour des vitesses  $v_f$  légèrement supérieures, on observe une flamme conique qui reste comme « accrochée » à la sortie. Cette forme est due aux frottements fluides du gaz avec les parois, la vitesse est donc plus rapide au centre qu'au bord. Il y a donc un endroit où la vitesse du fluide est égale à la vitesse de la flamme. Elle reste donc immobile à cet endroit-là et empêche que la flamme soit soufflée. Cependant pour des vitesses de flux de gaz frais nettement supérieures à celle de front de flamme, la flamme sera soufflée.

## 8.5. Le tableau récapitulatif des électrolyseurs

Nom du fournisseur	Nom du modèle de l'électrolyseur	Débit min	Débit moyen	Débit max	Débit converti en km <sup>3</sup> /h	La puissance (P <sub>DC/DC</sub> ) kW	Dimensions (H x L x P)	Poids kg	Puissance consommée	Fonctionnement continu ou alternatif avec stockage	Pertes	Lien site internet	Prix (euros)
Plaf	Gen Gaz	2Nm <sup>3</sup> /h	2,4Nm <sup>3</sup> /h	2Nm <sup>3</sup> /h	1	1	3' 50" 30" 53 cm	30		pas de précision	99,9999%	<a href="https://www.gengaz.com/fr">https://www.gengaz.com/fr</a>	prix à la demande
Truemanco energy	Higante	0,1 L/min	0,55 L/h	1 L/min	0,005688	0,017264	14,5" 30,5" 40 cm	31	1500W	pas de précision	~ 99,99%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande
Cookson	Microdard Aquafame, modèle 800	rien	0,11378Nm <sup>3</sup> /h	rien	0,11376	0,34128	45" 18" 138 cm	33	consolation électrique = 0,8 kW	pas de précision		<a href="https://www.cookson.com">https://www.cookson.com</a>	2450
Morton	HYDROCELL PFD	rien	3L/h	rien	0,003	0,009	11,5" 20,8" 15,3 cm		1,8/23W	pas de précision	96,69%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande
Proton energy	Hydrogen G4800	4800 cm <sup>3</sup> /min	rien	rien	0,046594	0,0136912	79" 97" 107 cm	215	400W	rapport cyclique 100%	99,999%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande
Peak	Precision hydrogen 2002	rien	200 cm <sup>3</sup> /min	rien	0,011376	0,034128			600W -1300W	pas de précision	99,999%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande
MD-HZ series	F-DGS	0,1 L/min	0,35 L/min	0,6 L/min	0,021	0,063	23" 48" 37 cm	17, 18	230-450 W	pas de précision	~ 99,999%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande
EneDuo	MARS	150 mL/min	600 mL/min	1200 mL/min	0,034	0,102	24,5" 46" 50 cm	25-28	pas précise	pas de précision	99,99999%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande
LAN SWISSGAS	HD PRO series	120 cm <sup>3</sup> /min	550 cm <sup>3</sup> /min	1500 cm <sup>3</sup> /min	4,371	13,113	27" 44" 41 cm	26-60	320-750 W	pas de précision	~ 99,9999%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande
Nitrogenair Innovations Filtration	ROCK VM series	rien	1000cm <sup>3</sup> /min	rien	68,292	204	Rack standard 4U 40 cm de profondeur	15-22	pas précise	continu 50% <sup>24</sup>	~ 99,9999%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande
Winchester Chron Technologie GmbH	WHS	rien	350 mL/min	rien	0,21	0,63	27" 36,5" 38,5 cm	11	150W	pas de précision	99,9999%	<a href="https://www.directindustry.fr">https://www.directindustry.fr</a>	prix à la demande





## 8.7. Fichiers et résultats de l'expérience

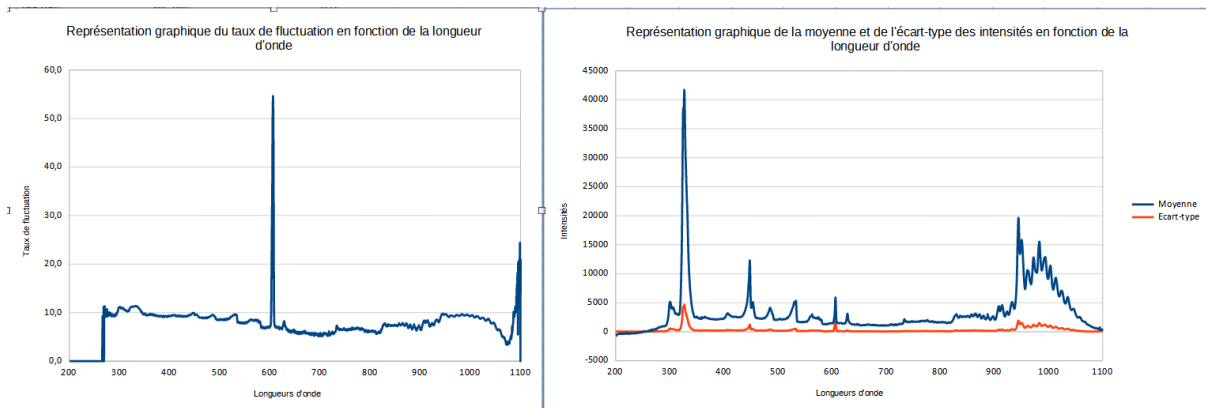
```
Data from alpha_50___MAYP110801_15-57-25-256.txt N

Date: Wed May 11 15:57:25 CEST 2022
User: guiberc
Spectrometer: MAYP11080
Trigger mode: 0
Integration Time (sec): 8.000000E-2
Scans to average: 1
Electric dark correction enabled: true
Nonlinearity correction enabled: false
Boxcar width: 0
XAxis mode: Wavelengths
Number of Pixels in Spectrum: 2068
>>>>Begin Spectral Data<<<<
200.288 372.5
200.763 -719.5
201.238 -723.5
201.713 -722.5
202.187 -531.5
202.662 -543.5
203.137 -516.5
203.611 -466.5
204.086 -443.5
204.56 -409.5
205.035 -409.5
205.51 -448.5
205.984 -454.5
206.458 -421.5
206.933 -408.5
207.407 -444.5
207.882 -354.5
208.356 -383.5
208.83 -397.5
209.305 -421.5
209.779 -473.5
210.253 -413.5
210.727 -408.5
211.201 -351.5
211.675 -412.5
212.15 -434.5
212.624 -444.5
213.098 -411.5
213.572 -373.5
214.046 -413.5
214.52 -435.5
214.994 -410.5
215.468 -382.5
215.941 -368.5
216.415 -389.5
216.889 -392.5
217.363 -403.5
217.837 -392.5
218.31 -305.5
218.784 -390.5
```

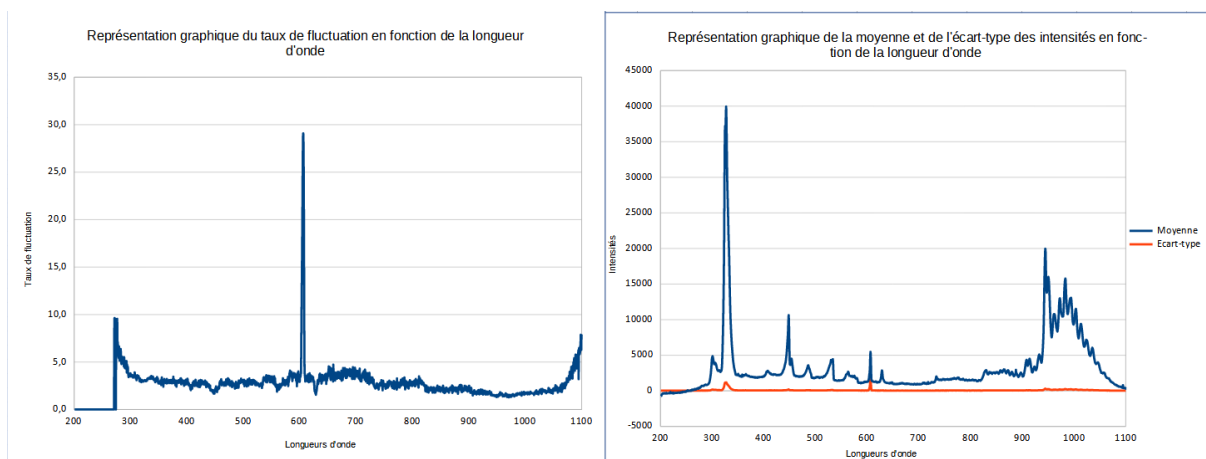
2-Fichier texte regroupant les mesures de l'expérience alpha 50.

Calculs des intensités des longueurs d'onde Longueurs d'ondes	Moyenne des intensités	Ecart-type des intensités
200,763	-746,383	19,394
201,238	-743,883	19,929
201,713	-747,143	20,971
202,187	-564,943	21,564
202,662	-565,323	20,424
203,137	-538,203	24,266
203,611	-477,123	23,145
204,086	-457,483	26,660
204,560	-434,563	21,546
205,035	-450,563	20,633
205,510	-461,983	25,420
205,984	-462,583	21,907
206,458	-465,103	20,817
206,933	-417,443	22,730
207,407	-445,883	23,409
207,882	-398,883	21,571
208,356	-405,243	18,645
208,830	-413,843	21,118
209,305	-428,263	24,591
209,779	-463,863	20,230
210,253	-443,703	20,261
210,727	-428,763	20,820
211,201	-372,903	21,635
211,675	-437,003	20,493
212,150	-464,643	20,181
212,624	-431,343	28,867
213,098	-439,123	20,473
213,572	-419,623	20,915
214,046	-445,783	22,619
214,520	-442,543	20,069
214,994	-433,063	22,449
215,468	-398,663	20,150
215,941	-403,903	24,307
216,415	-419,503	20,544
216,889	-413,983	22,788
217,363	-425,763	20,125
217,837	-435,323	20,217
218,310	-347,523	22,028
218,784	-400,583	26,751

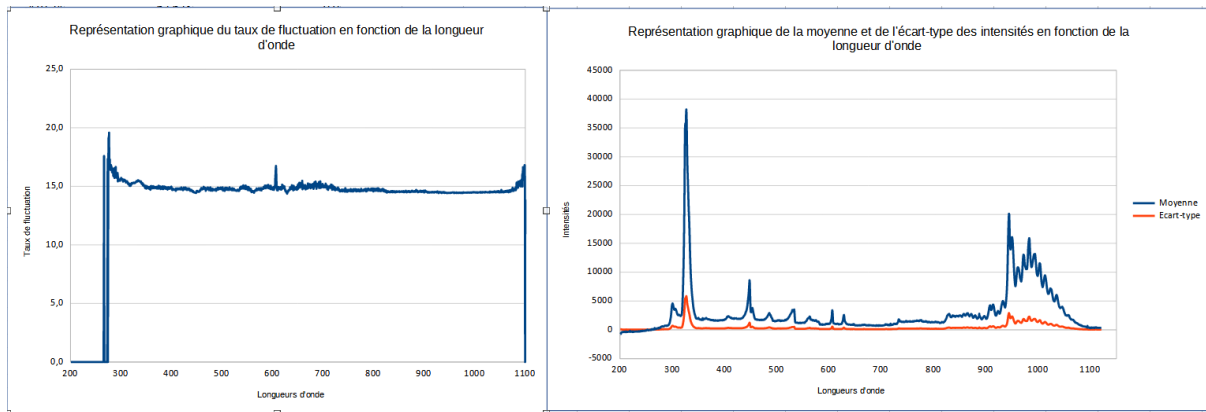
### 3-Fichier résultat regroupant les moyennes et les écart-types pour alpha 50



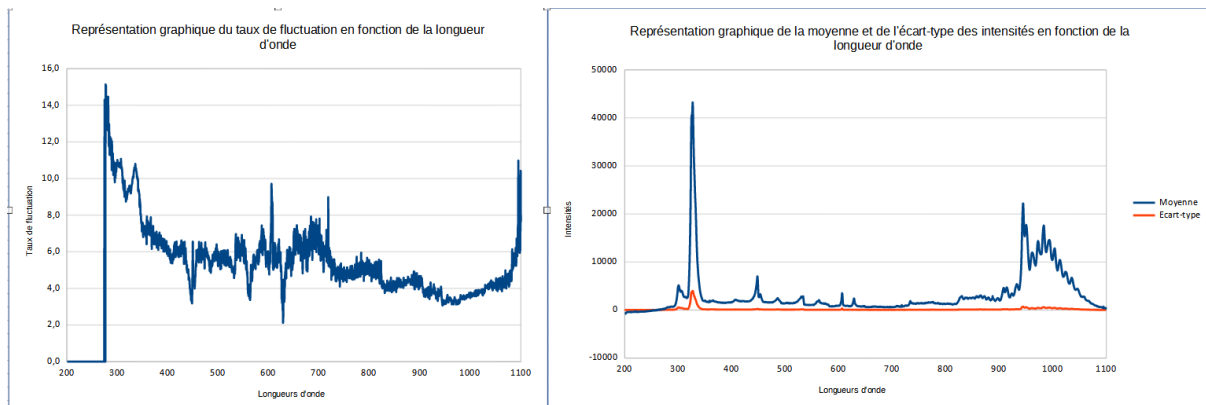
4.1-Graphes de l'expérience alpha 0



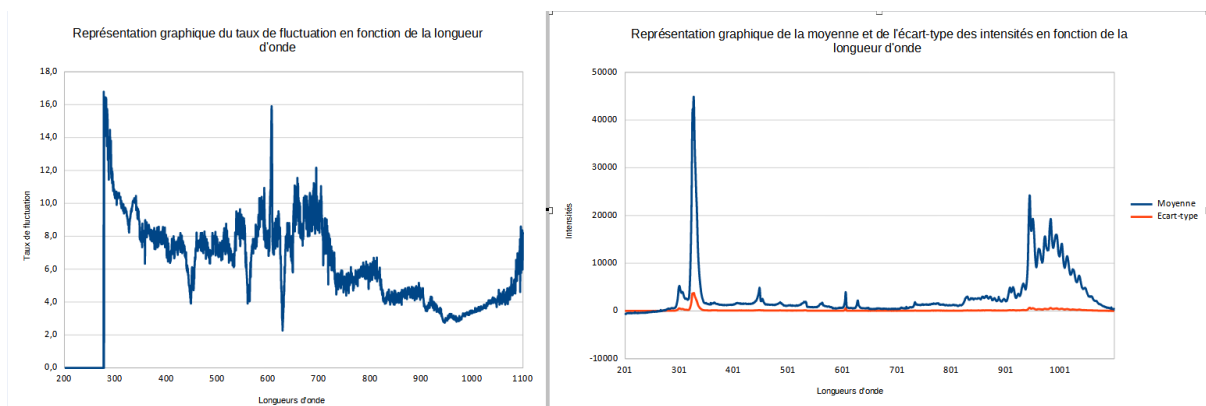
4.2-Graphes de l'expérience alpha 10



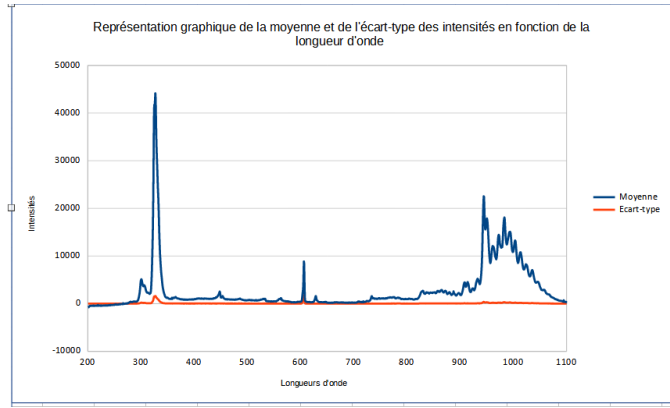
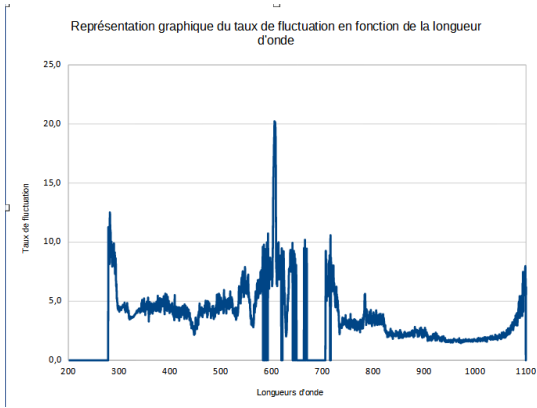
4.3-Graphes de l'expérience alpha 20



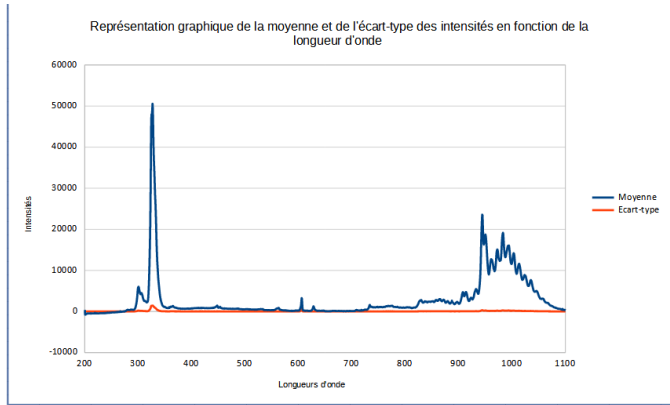
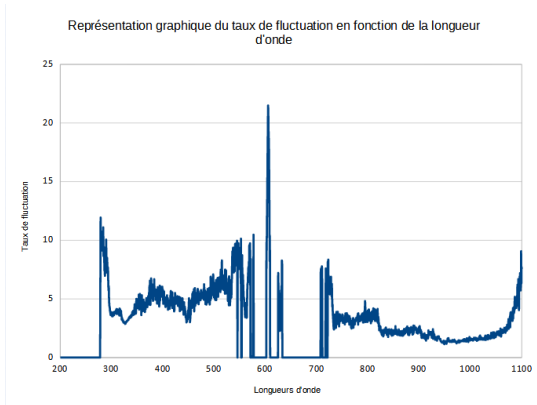
4.4-Graphes de l'expérience alpha 30



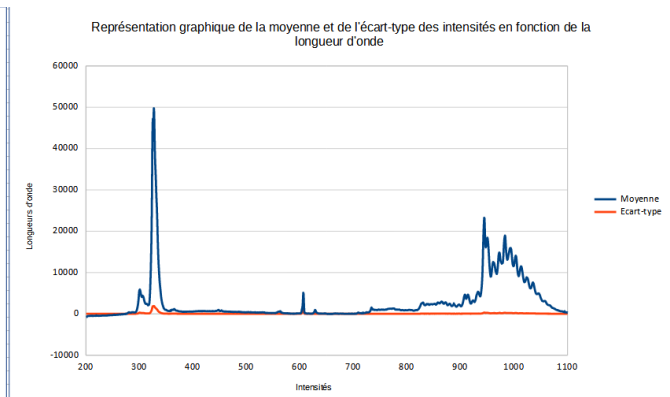
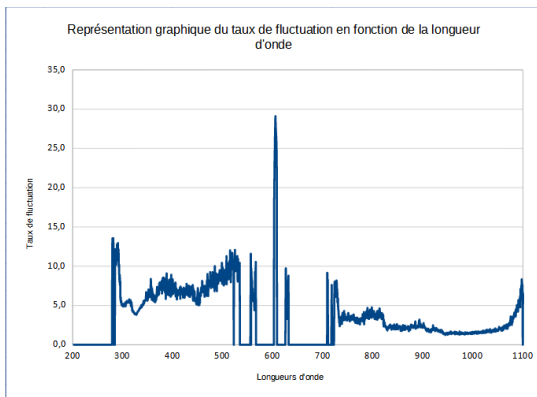
4.5-Graphes de l'expérience alpha 40



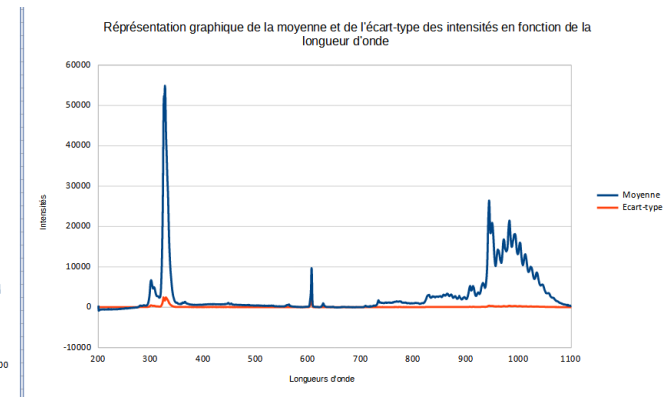
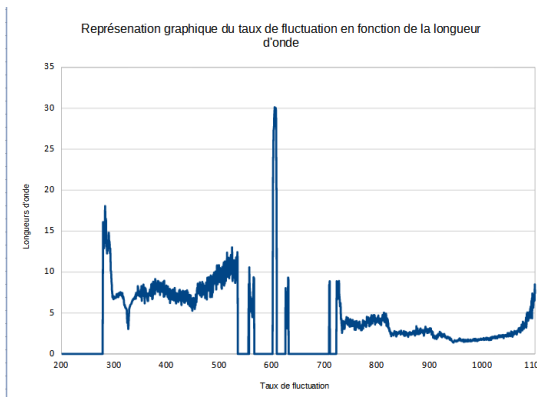
4.6-Graphes de l'expérience alpha 50



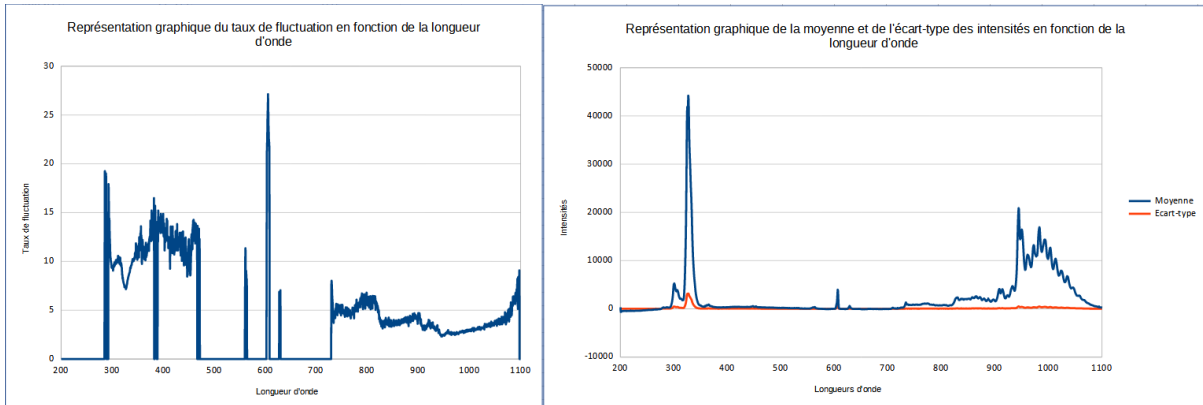
4.7-Graphes de l'expérience alpha 60



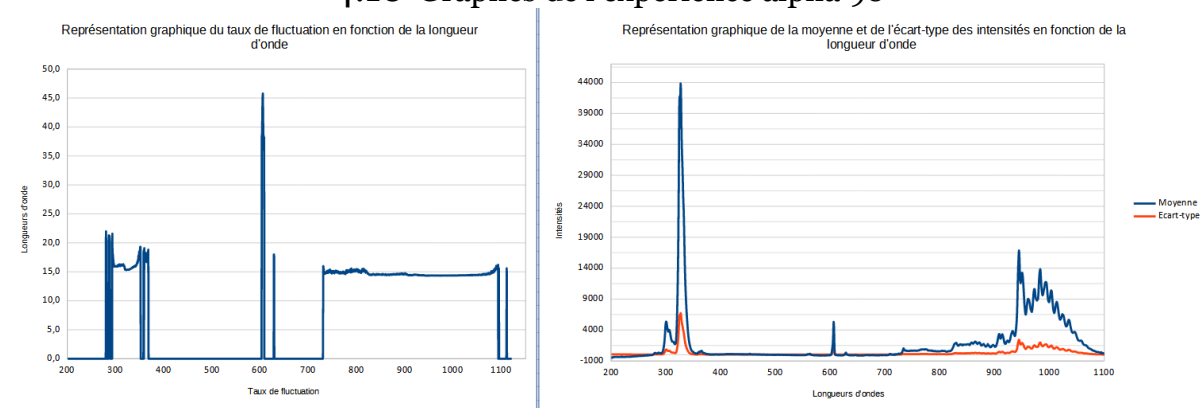
4.8-Graphes de l'expérience alpha 70



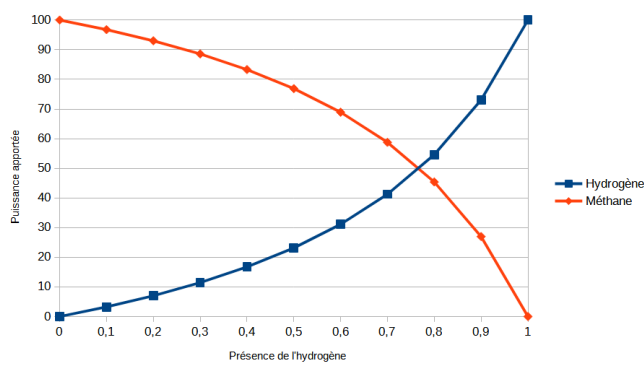
### 4.9-Graphes de l'expérience alpha 80



### 4.10-Graphes de l'expérience alpha 90



### 4.11-Graphes de l'expérience alpha 100



5-Graphique représentant les puissances apportées par l'hydrogène et le méthane selon la présence de l'hydrogène dans une flamme