



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique énergétique et énergie renouvelable

Par :

Mlle Hamdaoui Rihab

Sur le thème

Comparaison des rendements de production d'hydrogène dans les méthodes de l'électrolyse, de pyrolyse et de gazéification

Soutenu publiquement le 9 juin 2024 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr BAGHDADLI Tewfik
Pr CHABANE SARI Nasr Eddine
Mr CHIALI Anisse
Mr AMARA Sofiane

MCA
Professeur
MCA
Professeur

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
ESSA Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadrant
Co-encadrant

Année Universitaire : 2023 ~ 2024

Résumé :

L'hydrogène est un gaz essentiel pour la transition énergétique, offrant une solution propre et renouvelable pour divers besoins énergétiques. Dans ce travail, nous comparons les rendements de l'hydrogène produit par électrolyse, pyrolyse et gazéification. Des expériences ont été menées pour chaque méthode, avec une analyse des résultats réalisée à l'aide de l'intelligence artificielle et d'Opencv en Python. Les résultats indiquent que la gazéification fournit le rendement le plus élevé, bien que ce rendement varie en fonction de la matière première utilisée. Chaque méthode présente des avantages spécifiques, mais la gazéification se révèle être la plus efficace pour la production d'hydrogène dans les conditions étudiées.

Mots clés : électrolyse , pyrolyse , gazéification , rendement

الملخص

يُعد الهيدروجين غازًا أساسيًا للانتقال الطاقوي، حيث يوفر حلاً نظيفًا ومتجددًا لمختلف الاحتياجات الطاقوية. في هذا العمل، نقارن بين كفاءة إنتاج الهيدروجين باستخدام التحليل الكهربائي، التحلل الحراري والتغويز. تم إجراء تجارب لكل بلغة البرمجة بايثون. تشير النتائج إلى أن التغويز يوفر OpenCV طريقة، مع تحليل النتائج باستخدام الذكاء الاصطناعي و أعلى كفاءة، على الرغم من أن هذه الكفاءة تختلف حسب المادة الأولية المستخدمة. كل طريقة لها مزاياها الخاصة، لكن التغويز أثبت أنه الأكثر فعالية لإنتاج الهيدروجين في الظروف المدروسة

الكلمات المفتاحية: التحليل الكهربائي، التحلل الحراري، التغويز، الكفاءة

Summary:

Hydrogen is an essential gas for the energy transition, offering a clean and renewable solution for various energy needs. In this work, we compare the yields of hydrogen produced by electrolysis, pyrolysis, and gasification. Experiments were conducted for each method, with results analyzed using artificial intelligence and OpenCV in Python. The results indicate that gasification provides the highest yield, although this yield varies depending on the feedstock used. Each method has specific advantages, but gasification proves to be the most efficient for hydrogen production under the studied conditions.

Keywords: electrolysis , pyrolysis , gasification , efficiency

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu qui m'a guidé dans la bonne voie de la science et de la Connaissance

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement mon encadrant, Mr. ANISSE Chiali pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien constant tout au long de ce travail. Ses orientations précieuses et ses remarques pertinentes ont été d'une grande aide pour mener à bien cette étude.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à mon Co-encadrant, Mr. AMARA Sofiane, pour son accompagnement et ses conseils éclairés. Son expertise et ses suggestions constructives ont grandement enrichi ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury, Pr. CHABANE SARI Nasr Eddine, et Dr. BAGHDADLI Tewfik, pour leur temps, leurs suggestions constructives et leur bienveillance. Leur expertise a été d'une grande valeur pour la finalisation de ce mémoire.

Je suis également reconnaissante envers mes collègues et camarades de promotion pour les échanges enrichissants et le soutien mutuel qui ont été essentiels durant cette période. Vos encouragements et votre camaraderie ont été d'un grand réconfort.

Je n'oublie pas de remercier ma famille et mes amis pour leur soutien moral et leur patience tout au long de cette aventure. Leur compréhension et leurs encouragements ont été d'une importance capitale pour surmonter les moments de doute et de fatigue.

Merci à tous pour votre précieuse contribution à ce travail.

DEDICACES

Avec tout mon amour, j'offre le fruit de mon succès à celui qui a embelli mon nom des plus beaux titres, qui m'a soutenu sans limites et m'a donné sans contrepartie, à celui qui m'a appris que la vie est une lutte et que ses armes sont la science et la connaissance. Mon premier soutien dans mon parcours, mon pilier, ma force et mon refuge après Dieu, ma fierté et mon honneur.

(Mon père)

À celle pour qui Dieu a mis le paradis sous ses pieds, qui m'a accueilli dans son cœur avant sa main et qui a facilité les épreuves par ses prières, à ce cœur tendre, à la bougie qui a éclairé mes nuits sombres, la source de ma force et de mon succès, mon paradis.

(Ma mère)

À ceux qui m'ont soutenu avec amour dans mes moments de faiblesse, qui ont écarté les obstacles de mon chemin, qui ont semé en moi la confiance et la détermination, à mon pilier solide.

(Mes frères)

Pour son soutien moral et leurs conseils précieux,

(Mes grands-parents)

À l'âme de mes grands-parents paternel, mon oncle Chiab Bouhafis et leur épouse ma tante Khadidja, pour leur amour qu'ils ont partagé avec nous. Leur présence reste gravée de mon cœur à jamais.

À mon encadrant pour tous ses efforts et ses conseils pour la réussite de ce travail.

À toute ma famille, en particulier mon oncle Berzzoug.H et mon cousin Saidi Ibrahim pour leur aide et leur soutien dans la réalisation de mes expériences scientifiques.

À tous mes collègues et camarades de promotion.

Je vous dédie à tous ce modeste travail et le fruit de mes efforts.

Mlle Hamdaoui Rihab .

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE.....	2
Chapitre I : ETAT DE L'ART.....	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 PRODUCTION D'HYDROGENE	5
I.2.1 Electrolyse.....	6
➤ Principe de l'électrolyse de l'eau.....	6
➤ Les technologies de l'électrolyseur.....	6
- Electrolyseur alcalins.....	6
- Electrolyseur PEM.....	6
- Electrolyseurs à haute température.....	7
I.2.2 Pyrolyse.....	8
➤ Types de pyrolyse.....	9
- La pyrolyse lente.....	9
- La pyrolyse rapide (flash).....	9
I.2.3 La gazéification.....	9
➤ Le principe de gazéification du charbon pour production d'hydrogène.....	10
➤ Les étapes au cours de la gazéification.....	10
➤ Les type des gazéificateurs.....	11
I.3 STOKAGE DE L'HYDROGENE	12
I.3.1 Stockage sous forme comprimé.....	12
I.3.2 Stockage sous terrain.....	12
I.3.3 Stockage sous forme liquide (cryogénique).....	12
I.4 L'UTILISATION D'HYDROGENE.....	13
I.5 Conclusion.....	13
Chapitre II : EXPERIENCES DE L'ELECTROLYSE, PYROLYSE ET DE GAZEIFICATION	
.....	14
II.1 INTRODUCTION	15
II.2 DESCRIPTION EXPERIMENTALE	15

Table des Matières

II.2.1 L'électrolyse d'eau	15
➤ Matériaux utilisés	15
➤ Protocole expérimentale	16
II.2.2 Gazéification	21
➤ Matériaux utilisés	21
➤ Protocole expérimentale	23
II.2.3 La pyrolyse	24
➤ Matériaux utilisés	24
➤ Protocole expérimentale	25
II.3 ANALYSE DES DONNEES DE PRODUCTION D'HYDROGENE EN UTILISANT L'INTELIGENCE ARTIFICIELLE	26
II.3.1 Bibliothèque Panda	26
➤ Méthode de calcul	26
II.3.2 PARTIE OPEN CV	28
➤ Introduction à Open CV en Python	28
➤ Historique d'Open CV	28
➤ Applications en Physique	28
➤ Application en Énergies Vertes	29
➤ Les Plus Récentes Applications d'Open CV (depuis 2021 à ce jour)	29
- Vision par Ordinateur et IA	29
- Automatisation Industrielle	29
- Santé et Médecine	29
- Voitures Autonomes	29
II.3.3 PARTIE IA / HYDROGENE VERT	29
II.4 CONCLUSION	30

Table des Matières

Chapitre III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	31
III.1 INTRODUCTION	32
III.2 PRODUCTION D'HYDROGENE PAR L'ELECTROLYSE D'EAU	32
III.2.1 Méthode de quantification d'hydrogène	32
III.2.2 Résultat et commentaire	34
III.3 PRODUCTION D'HYDROGENE PAR PYROLYSE ET GAZEIFICATION	39
III.3.1 Méthode de mesurage d'hydrogène	39
III.3.2 Résultat et commentaire	40
III.4 COMPARAISON DE RENDEMENT D'HYDROGENE PRODUIT PAR LES METHODES DE L'ELECTROLYSE D'EAU, PYROLYSE ET GAZEIFICATION	43
III.5 CONCLUSION	44
III.6 PRESPECTIVES	45
 Conclusion générale	 48
 BIBLIOGRAPHIQUES.....	 50
 Annexe	 53

Table des Figures

Figure I.1 : Principe de l'électrolyse [8]	5
Figure I. 2 : Principe de l'électrolyse alcaline [4]	6
Figure I.3 : Principe de l'électrolyse PEM [10]	7
Figure I.4 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte [10]	8
Figure I.5 : Les produits produite par la pyrolyse de biomasse et leurs applications [14]	8
Figure I.6 : schéma explicative pour les étapes au cours de la gazéification	11
Figure I.7 : les types des gazéifieurs [19]	11
Figure II.1 : image représentative de l'électrolyseur	17
Figure II.2 : Connexion de l'électrolyseur au réservoir par un tuyau transparent	17
Figure II.3 : Interconnexion du système avec la source d'électricité	18
Figure II.4 : interconnexion entre la boîte et couverture par des écrous	22
Figure II.5 : les bâtonnets d'oliviers	23
Figure II.6 : image explicative du système utilisé pour la gazéification et de flamme résultante.....	24
Figure II.7 : connexion entre les deux boîtes	25
Figure II.8 : image explicative de l'expérience de pyrolyse et sa flamme résultante	26
Figure III.1 : montage expérimentale de la méthode d'électrolyse d'eau.....	32
Figure III.2 : courbe de variation de KOH en fonction de courant (A) et de potentiel (V)	34
Figure III.3 : courbe 3D de variation de bicarbonate en fonction de courant (A) et de potentiel(V)	34
Figure III.4 : nombre des gouttes en fonction de masse en (g) de KOH et de bicarbonate de sodium	36

Table des Figures

Figure III.5 : variation de volume des gouttes produite en fonction de masse (g) de KOH et Bicarbonate	36
Figure III.6 : pourcentages d'hydrogène et d'oxygène produit à partir des gouttes d'eau produit par l'électrolyse dans des différents masses de KOH	37
Figure III.7 : représentation des pourcentages de présence d'hydrogène et d'oxygène dans des gouttes d'eau produit dans l'électrolyse dans des différents masses de Bicarbonate.....	38
Figure III.8 : montage expérimentale pour la production d'hydrogène par gazéification	39
Figure III.9: le montage expérimental de la méthode de pyrolyse pour la production d'hydrogène	40
Figure III.10 : présence d'hydrogène et d'autre gaz dans la pyrolyse	41
Figure III.11 : pourcentage d'hydrogène et d'autre gaz dans la gazéification	42
Figure III.12 : comparaison de rendement d'hydrogène produit par les trois méthodes de production (électrolyse, pyrolyse, gazéification)	43

Table des Tableaux

Tableau I.1 : Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène [2]	5
Tableau II.1.a : Tableau des variations de potentiel et de courant pour le KOH	20
Tableau II.1.b : Tableau des variations de potentiel et de courant pour le bicarbonate de sodium	21
Tableau III.1 : Variation de nombre et de volume des gouttes d'eau en fonction de masse de KOH	33
Tableau III.2 Variation de nombre et de volume des gouttes d'eau en fonction de masse de Bicarbonate	33
Tableau III.3 : Comparaison des principaux modes de production d'hydrogène	45

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'hydrogène est largement reconnu comme une source d'énergie propre et prometteuse, capable de jouer un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale. Face aux préoccupations croissantes liées aux changements climatiques et à la dépendance aux combustibles fossiles, la recherche de sources d'énergie alternatives et durables est devenue une priorité. Grâce à sa capacité à être produit à partir de diverses ressources et à ses émissions nulles lorsqu'il est utilisé dans des piles à combustible, l'hydrogène représente une solution potentielle pour réduire l'empreinte carbone.

L'objectif principal de cette recherche est de comparer trois méthodes distinctes de production d'hydrogène : l'électrolyse de l'eau, la pyrolyse et la gazéification. Cette étude vise à identifier la méthode la plus efficace en termes de rendement et de praticabilité, en évaluant les avantages et les limitations de chacune. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à chaque méthode et de proposer des améliorations potentielles pour optimiser la production d'hydrogène.

La recherche a été menée en utilisant des montages expérimentaux spécifiques pour chaque méthode de production d'hydrogène. L'électrolyse de l'eau a été réalisée en utilisant des solutions de KOH et de bicarbonate de sodium, tandis que la pyrolyse et la gazéification ont été mises en œuvre avec des configurations adaptées. L'intelligence artificielle et des outils de traitement de données, tels qu'Opencv en Python, ont été utilisés pour analyser les résultats expérimentaux et générer des représentations graphiques précises.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique complète sur l'hydrogène, couvrant son historique, sa production, son stockage et ses applications. L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une compréhension approfondie des aspects fondamentaux et techniques de production d'hydrogène, en mettant l'accent sur les méthodes de production les plus couramment utilisées, ainsi que sur les technologies de stockage et les diverses applications de cet élément essentiel.

Dans le deuxième chapitre nous avons réalisé des montages expérimentaux pour trois méthodes de production d'hydrogène : électrolyse, pyrolyse, et gazéification, au sein de l'URMER. Des tests de vérification ont été entrepris à la fin de chaque réalisation pour confirmer la présence d'hydrogène. À chaque étape, l'intelligence artificielle a été utilisée pour analyser et projeter les résultats expérimentaux sous forme de représentations graphiques.

Le troisième chapitre présenté et discuté les résultats obtenus pour chaque méthode, avec une comparaison des rendements et de l'efficacité de chaque technique. Les avantages et les limites de chaque méthode sont analysés en profondeur.

Cette thèse est structurée de manière à fournir une vue d'ensemble complète des différentes méthodes de production d'hydrogène, avec des chapitres dédiés aux résultats expérimentaux détaillés, aux études de cas et aux applications pratiques, ainsi qu'aux développements technologiques et aux innovations potentielles.

Chapitre I

ETAT DE L'ART

Chapitre I : ETAT DE L'ART

I.1 INTRODUCTION :

En 1763 l'hydrogène a été découvert par le scientifique britannique Henry Cavendish pour découvrir la réaction du zinc et de l'acide chlorhydrique. L'hydrogène (H) occupe la première place dans le tableau périodique. Il est sélectionné comme l'un des éléments chimiques universels les plus simples et le plus adapté à tous les gaz et les éléments. L'hydrogène est composé d'un proton et d'un électron et son protium le plus stable, il est aussi léger que l'air plus que 14 fois. On le trouve comme un élément essentiel dans l'eau et les hydrocarbures qui sont industrielle. Il représente 75% de la masse de la matière des étoiles et des galaxies. La production d'hydrogène est nécessaire pour la chaleur ou pour l'électricité. [1]

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10 800 kJ/Nm ³ 119 930 kJ/kg (gaz naturel 50 020 kJ/kg) 3.00 kWh/Nm ³ 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12 770 kJ/Nm ³ 141 860 kJ/kg 3.55 kWh/Nm ³ 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1.34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273K	0.08988 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Densité liquide à 20.3K	70.79 kg/m ³
Chaleur spécifique (C _p)	14 266 J/kg K (293K)
Chaleur spécifique (C _v)	10 300 J/kg K
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/(mK)
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante du gaz	4 124.5 J/kg K
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20.268K
Température critique	33.30K
Température d'auto inflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2 318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75 (gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (gaz naturel 6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation (μJ)	20 (gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³ de gaz)	2.02 (gaz naturel 7.03)
Suppression de détonation (mélange stoechiométrie)	14.7 bar (gaz naturel 16.8 bar)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stoechiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

Tableau I.1 : Les données de base physico-chimiques de l'hydrogène [2]

Chapitre I : ETAT DE L'ART

I.2 PRODUCTION D'HYDROGENE :

L'hydrogène est généralement produit par des divers combustibles fossiles. Sa production mondiale par an est estimée à 55 millions de tonnes. On obtient de l'hydrogène grâce à plusieurs fossiles tels que le gaz naturel (49 %), le pétrole (29 %), le charbon (18 %), et seulement 4 % de la production d'hydrogène est due à la décomposition de l'eau par électrolyse [3]. Le choix des méthodes de la production d'hydrogène dépend de la disponibilité de la matière de base ou par un ensemble d'opération qui nous permettra de produire l'hydrogène avec une manière écologiquement satisfaisante et économiquement, comme l'électrolyse de l'eau, les méthodes thermochimique et biologique. [1]

I.2.1 Electrolyse :

Le 2 mai 1800 William Nicholson (1753-1815) et Sir Anthony Carlisle (1768-1840) deux chimistes britanniques ont réalisé La première électrolyse [4] avec l'utilisation de la pile de volta [5]. Alors l'électrolyse est un procédé qui décompose l'eau en oxygène et hydrogène sous l'effet d'un courant électrique (une réaction électrochimique). [6]

➤ Principe de l'électrolyse de l'eau :

Dans un électrolyseur selon la **Figure I.1**, on relie un générateur électrique avec la cathode et l'anode, après on injecte l'eau liquide à la fin on obtient de l'oxygène et de l'hydrogène sous forme d'un gaz [7].

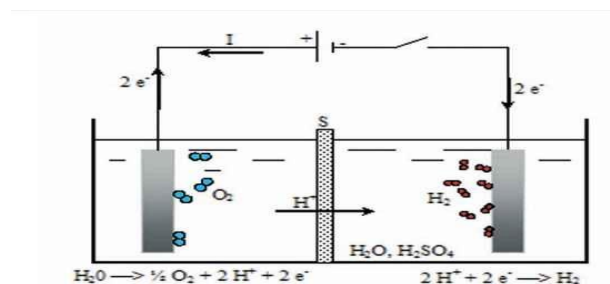


Figure I.1 : Principe de l'électrolyse [8]

Chapitre I : ETAT DE L'ART

➤ Les technologies de l'électrolyseur :

- Electrolyseur alcalins :

Dans un électrolyseur alcalin (figure I.2) on utilise une solution aqueuse qui est l'hydroxyde de potassium (KOH) comme un électrolyte. Les ions hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+) assure la conduction ionique. [4]

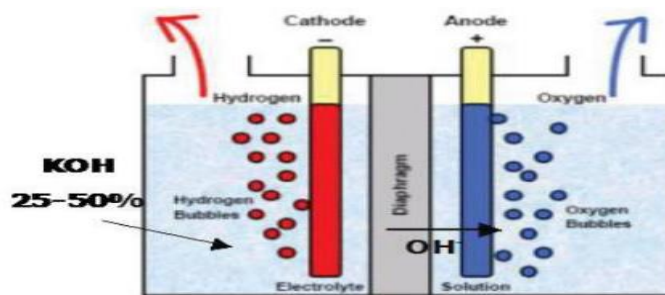
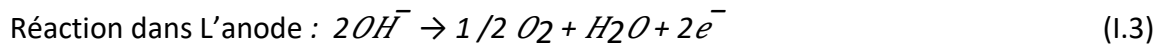
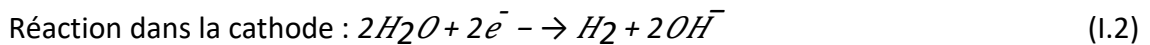
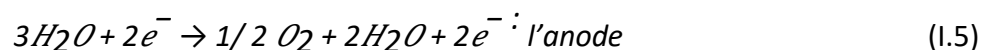


Figure I. 2 : Principe de l'électrolyse alcaline [4]

- Electrolyseur PEM :

Le principe d'électrolyseur PEM « Proton Exchange Membrane » fonctionne de la même manière que celui d'une pile à combustible selon la figure I.3. L'électrolyseur PEM caractérise par un électrolyte solide, ce dernier est constitué d'une membrane polymère. Cette technologie d'électrolyseur assure la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode c'est ce qui permet de séparer les gaz résultants (H_2 et O_2), selon les réactions suivantes [9] :



Chapitre I : ETAT DE L'ART

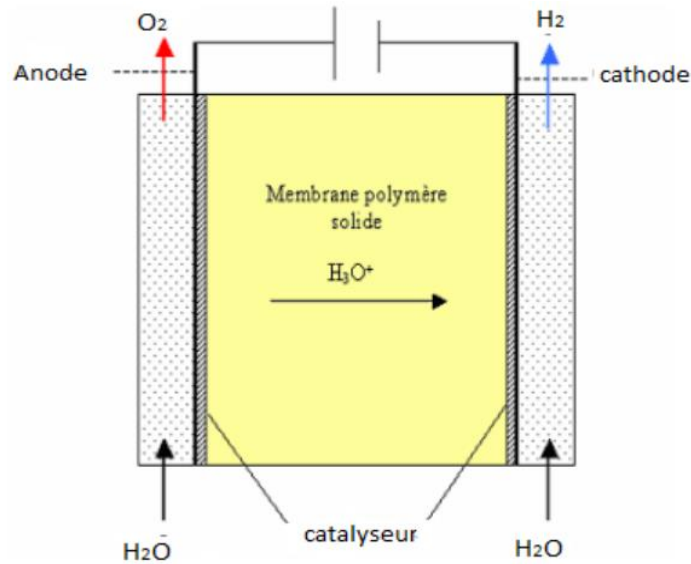
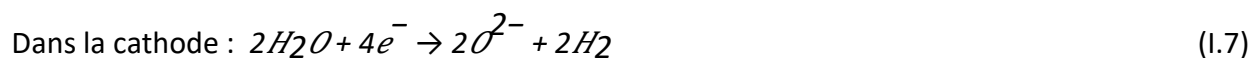


Figure I.3 : Principe de l'électrolyse PEM [10]

- Electrolyseurs à haute température :

L'électrolyse à haute température (Figure I.4) compte sur la décomposition des molécules d'eau sous forme de vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend de la nature de l'électrolyte. Elle assure aussi une conduction soit protonique soit d'ions superoxydes O^{2-} . Selon le type d'électrolyte on a des réactions qui sont mis en jeu au niveau des électrodes. [11]

Conduction d'ions superoxydes :



Conduction protonique :



Chapitre I : ETAT DE L'ART

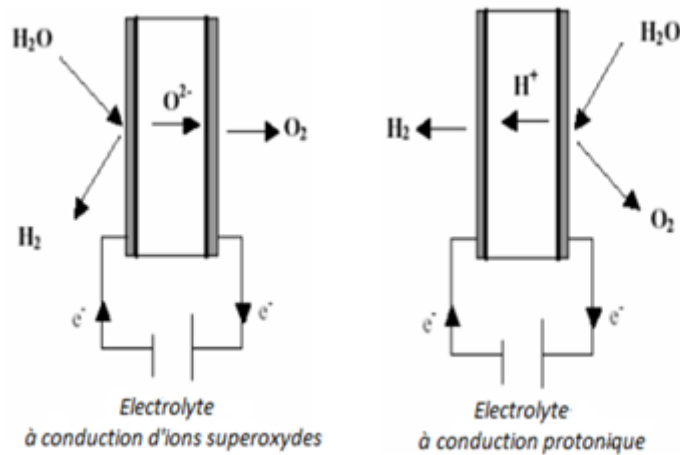


Figure I.4 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte [10]

I.2.2 Pyrolyse :

En 1976 le Dr Christian Roy au cours de ses études de doctorat à l'Université de Sherbrooke à découvrir le principe de la décomposition thermique (pyrolyse) sous vide. Il a conclu que l'application de la pyrolyse dans les déchets industriels solides donne des produits commerciaux d'une valeur importante. [12] La pyrolyse de pyro (feu) et lyse (coupure) est un processus primaire de décomposition thermique de biomasse ce qui est fait par l'action de la chaleur, ce processus fonctionne en l'absence d'oxygène. La pyrolyse nous donne des gaz permanents (H_2 , CO , CO_2 , H_2O et CH_4), un solide (le charbon) et un liquide condensable (huile et goudron). [13]

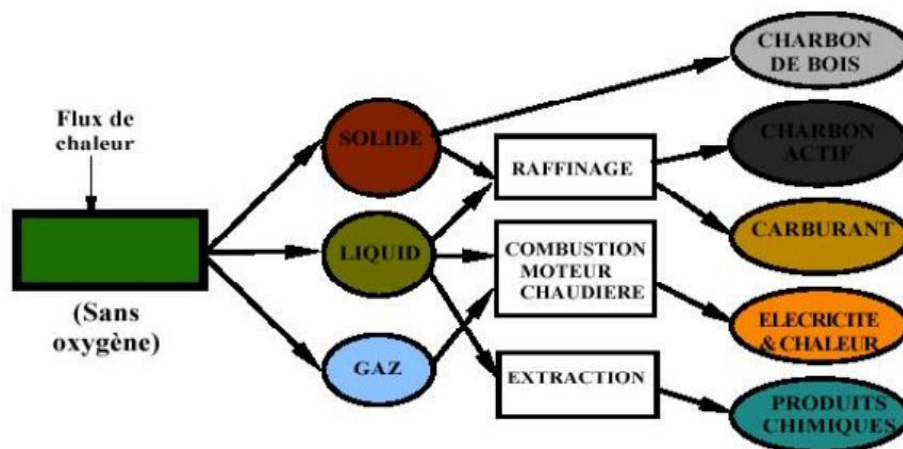


Figure I.5 : Les produits produite par la pyrolyse de biomasse et leurs applications [14]

Chapitre I : ETAT DE L'ART

➤ Types de pyrolyse :

- La pyrolyse lente :

La pyrolyse lente est utilisée pour la production du charbon de bois qui est utilisé dans l'usage domestique comme le chauffage, barbecue...ex, et dans l'industriel comme le charbon actif, la chimie...et, elle produit aussi une quantité très importante un gaz incondensable comme le CO₂, et une petite quantité le CO, H₂ et les hydrocarbures. La pyrolyse lente est fonctionnée avec une température faible qui est entre 250 et 600 °C [8], et avec un temps de séjour important ce qui est estimé à environ de 60 min. [15]

- La pyrolyse rapide (flash) :

La pyrolyse flash fonctionne dans des hautes températures qui ont supérieure à 500°C et avec une grande vitesse pour chauffée les particules qui atteindre des dizaines à des milliards des °C/s, dans un temp très court qui est estimé à 10 min. Par ce type de pyrolyse on obtient de liquide qui est l'huile de pyrolyse, et on obtient aussi une grande quantité par rapport au charbon un gaz de synthèse (CO, CO₂, méthane CH₄ et de l'hydrogène H₂). [13] On s'intéresse uniquement à L'hydrogène H₂ dans ce travail.

I.2.3 La gazéification :

A fin du XVII^{ème} siècle la gazéification a été inventée en Angleterre et en France pour développer le gaz de ville à partir du charbon lors de révolution industrielle.

- 1921 : Imbert a inventé le gazogène à charbon de bois de type lit fixe co-courant [16]
- 1930 : le développement du réseau d'alimentation du gaz naturelle pour réduire l'impact de ce système de transformation d'énergie

Chapitre I : ETAT DE L'ART

- Deux ans plus tard : l'adaptation de la gazéification a un véhicule
- 1990 : en chine 150 gazogènes en fonctionnement [16]

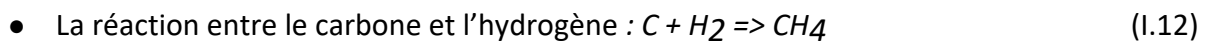
La gazéification c'est un processus qui nous permettra de transformer un combustible solide en gaz. [17] par cette méthode on a une production d'hydrogène, d'électricité et du Carbon liquide. [13]

➤ Le principe de gazéification du charbon pour production d'hydrogène :

Dans une température de 1000°C et une haute pression on mélange le charbon avec l'eau et l'air pour obtenir un gaz qui est composer de CO et de H₂ (l'hydrogène) d'après la réaction suivante : [13]



La gazéification contienne d'autre réactions importantes qui sont : [11]



➤ Les étapes au cours de la gazéification :

La gazéification se compose généralement de trois phases :

- La première phase c'est la phase de séchage qui est intégrée ou pas intégrée au réacteur de la gazéification
- La deuxième phase c'est la phase de pyrolyse qui nous permettra de produire de (H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O), le goudron et le charbon (Carbon fix) se fait sous l'action de la chaleur

Chapitre I : ETAT DE L'ART

- La troisième phase c'est La phase de gazéification et la phase de combustion qui sont liée entre eux, elle convertie le Carbone en un gaz combustible riche en H₂ et de CO (gaz de synthèse). [18]

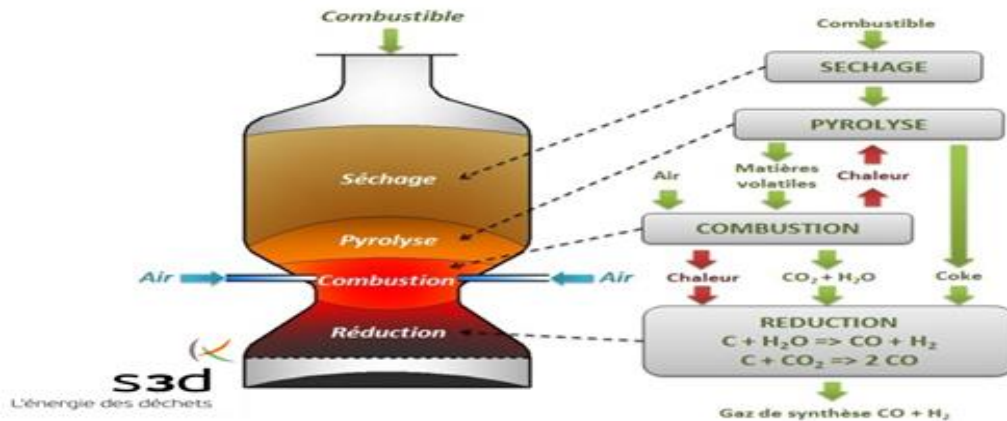


Figure I.6 : schéma explicative pour les étapes au cours de la gazéification

➤ Les type des gazéifieurs :

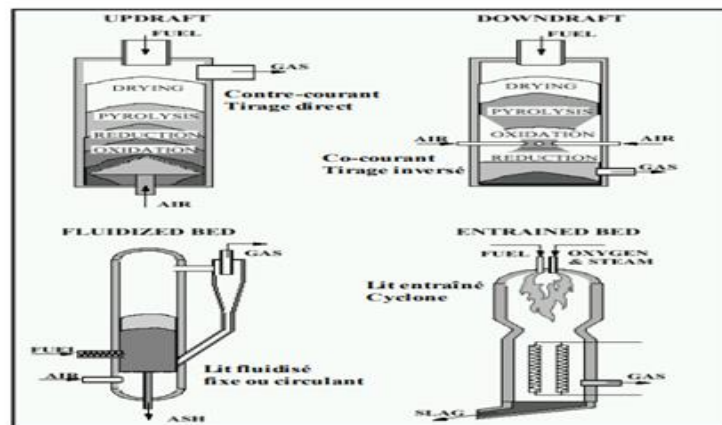


Figure I.7 : les types des gazéifieurs [19]

- Dans ces types : Lit fix co-courant (downdraft) et lit fix contre-courant (updraft) le combustible se déplace verticalement. Ils sont adaptés au bois, et ils ont une faible capacité

Chapitre I : ETAT DE L'ART

- La vitesse des réactions dans Lit fluidisé (dense) et lit fluidiser (circulant) par rapport au lit fix elle est très importante et on a des différents mécanismes de séchage dans une même

Zone du réacteur (pyrolyse, oxydation homogène et hétérogène). Ce type nous permettra de produire le syngas [16].

I.3 STOCKAGE D'HYDROGENE :

Il existe plusieurs types de stockage d'hydrogène. Parmi ces types ont à :

I.3.1 Stockage sous forme comprimé :

Le stockage sous forme comprimé est le plus utilisé actuellement sa pression est de 200-350 à 700 bars on stocke l'hydrogène dans des réservoirs de 10.000 m³ ou bien dans des bouteilles de 10L. ce type de stockage existe dans des service station qui sont : station de Chicago, Munich, Détroit ou Hambourg. [13]

I.3.2 Stockage sous terrain :

De même façon que le gaz naturel on stocke le H₂ sous terrain sous forme comprimée (cavernes salées, aquifères). Ce type de stockage est déjà utilisé en Allemagne et en France.

I.3.3 Stockage sous forme liquide (cryogénique) :

D'une température de -253° on peut stockée l'hydrogène sous forme liquide. Le réservoir de ce type de stockage est en acier, il contient une double paroi, entre ces deux parois on a un vide ou un air liquide, ou sont séparé par d'autre isolants. Sa densité énergétique peut atteindre le 22 MJ/kg. [13]

On a d'autre types de stockage d'hydrogène qui sont :

- Le stockage sous forme de NaBH₄
- Charbon actif

Chapitre I : ETAT DE L'ART

- Hydrures métalliques
- Le stockage des nanofibres en carbone.

I.4 L'UTILISATION D'HYDROGENE :

L'hydrogène est utilisé dans divers domaines parmi eux :

- Les domaines industriels comme l'industrie des métaux (soudage, découpage et projection thermique)
- Pétrole et dérivés (fioul et l'essence)
- L'électronique (la pile à combustible) qui est un système de production d'électricité qui utilise le système inverse de l'électrolyse. [13]

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait une introduction concernant l'histoire, la définition, la composition et le but de la production de l'hydrogène. Concernant sa production on a étudié seulement trois méthodes qui sont l'électrolyse d'eau, la pyrolyse et la gazéification.

Pour chaque méthode on a étudié son histoire, sa définition et son principe de fonctionnement et ses types. A la fin on a cité quelques types de stockage d'hydrogène et quelques types de son utilisation.

Chapitre II

EXPERIENCES DE

L'ELECTROLYSE, PYROLYSE ET

GAZEIFICATION

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

II.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous décrivons les méthodologies utilisées pour mener les expériences d'électrolyse, de pyrolyse et de gazéification. Ces trois méthodes visent à explorer différentes techniques de transformation chimique et physique de la matière, chacune ayant des applications spécifiques dans les domaines de l'énergie et de la chimie.

II.2 DESCRIPTION EXPERIMENTALE :

II.2.1 L'électrolyse d'eau :

L'électrolyse est une procédure étonnante, il utilise l'énergie électrique pour catalyser des réactions chimiques. Dans notre recherche nous avons réalisé un modèle d'électrolyse d'eau.

➤ **Matériaux utilisés :**

- **Deux bocal en verre :**

On a choisi des bocaux en verre pour la raison de résistivité de chaleur et pour la transparence pour voir facilement ce qui se passe à l'intérieur de bocaux pendant l'opération d'électrolyse, les boqel est de forme cylindrique d'un volume de $V_1 = 1696,64 \text{ cm}^3$ pour le premier boqel (électrolyseur) et de $V_2 = 788,96 \text{ cm}^3$ pour le deuxième boqel (réservoir). On a travaillé par c'est volume car on a déjà utilisé des bocaux d'un volume plus que ces volumes mais [l'opération n'a pas marché].

- **Deux fils en cuivre :**

On a utilisé des fils en cuivre car le cuivre est une matière importante pour le transport d'énergie électrique.

- **Deux fils grossiers en acier inoxydable :**

Les deux fils joux un rôle de l'anode (électrode positive) et le cathode (électrode négative).

- **Séparateur :**

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

On a utilisé un séparateur sous forme un cercle de rayon de 5,2cm entre l'anode et la cathode pour les protéger et pour éviter le court-circuit électrique.

- Une source de courant/tension :

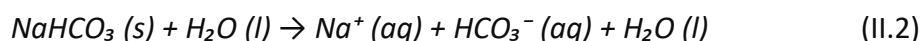
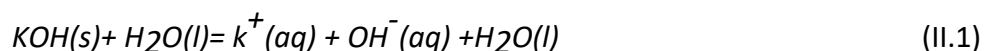
On a utilisé une source de courant/tension pour alimenter la réaction d'une manière continue ($V=30V$ et $I=3A$).

- Tuyau transparent :

On a choisi un tuyau transparent d'un diamètre moins de 6mm pour transporter le gaz produit.

- La solution aqueuse :

Cette solution contient de l'eau distiller qui n'est pas un conducteur électrique avec un produit chimique dans notre cas on a choisi deux produits qui sont le KOH et le Bicarbonate avec ces réactions chimiques suivantes :



➤ Protocole expérimentale :

Pour réaliser l'expérience on a suivi les étapes suivantes :

- On a relié les fils en cuivre avec l'anode et la cathode pour faire passer de l'électricité et après on a séparé entre eux par un séparateur et on a mis tout ça dans les bacs de volume V_1 (électrolyseur) comme le montre la figure II.1

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification



Figure II.1 : image représentative de l'électrolyseur

- On a relié l'électrolyseur avec le deuxième boqel(réservoir) par le tuyau transparent comme il est indiqué sur la figure II.2



Figure II.2 : Connexion de l'électrolyseur au réservoir par un tuyau transparent

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

- On a connecté le système avec la source de courant/tension comme le montre la figure II.3



Figure II.3 : Interconnexion du système avec la source d'électricité

- Nous avons rempli le réservoir avec un volume d'eau distillée de 0,169 L, et l'électrolyseur avec un volume d'eau distillée de 0,326 L. Nous avons ajouté à l'eau distillée de l'électrolyseur une masse de 1 g de KOH. Ensuite, nous avons lancé l'expérience et noté le potentiel et le courant initial de l'opération. Après 5 minutes, nous avons observé le potentiel et le courant final de l'opération, comme indiqué dans le tableau II.1.a. Nous avons ajouté une autre masse de 1 g de KOH à la première, et répété les mêmes étapes que précédemment. Nous avons continué cette opération jusqu'à atteindre une masse totale de 10 g de KOH.

Nous avons répété les mêmes étapes et la même opération pour le bicarbonate de sodium, comme montré dans le tableau II.1.b.

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

Masses (g)	Potentiel (Volts)	Courant (Ampères)
1	$V_i=13$	$I_i= 2,4$
	$V_f= 13$	$I_f= 2,7$
2	$V_i= 4$	$I_i= 2,2$
	$V_f= 4$	$I_f= 2,2$
3	$V_i= 3$	$I_i= 2,4$
	$V_f= 3$	$I_f= 2,4$
4	$V_i= 3$	$I_i= 2,4$
	$V_f=3$	$I_f=2,4$
5	$V_i= 3$	$I_i= 2,4$
	$V_f= 3$	$I_f= 2,4$
6	$V_i= 3$	$I_i= 2,4$
	$V_f= 3$	$I_f= 2,4$
7	$V_i= 3$	$I_i= 2,4$
	$V_f= 3$	$I_f= 2,4$
8	$V_i= 3$	$I_i= 2,4$
	$V_f= 3$	$I_f= 2,4$

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

9	$V_i = 3$	$I_i = 2,4$
	$V_f = 3$	$I_f = 2,4$
10	$V_i = 3$	$I_i = 2,4$
	$V_f = 3$	$I_f = 2,4$

Tableau II.1.a: Tableau des variations de potentiel et de courant pour le KOH

Masses (g)	Potentiel (Volts)	Courant (Ampères)
1	$V_i = 3$	$I_i = 1,2$
	$V_f = 2$	$I_f = 1,1$
2	$V_i = 4$	$I_i = 1,2$
	$V_f = 3$	$I_f = 1,1$
3	$V_i = 6$	$I_i = 1,1$
	$V_f = 6$	$I_f = 1,1$
4	$V_i = 6$	$I_i = 1,1$
	$V_f = 6$	$I_f = 1,1$
5	$V_i = 5$	$I_i = 1,1$
	$V_f = 5$	$I_f = 1,1$

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

	6	$V_i = 5$	$I_i = 1,1$
		$V_f = 5$	$I_f = 1,1$
	7	$V_i = 5$	$I_i = 1,1$
		$V_f = 5$	$I_f = 1,1$
	8	$V_i = 5$	$I_i = 1,1$
		$V_f = 5$	$I_f = 1,1$
	9	$V_i = 5$	$I_i = 1,1$
		$V_f = 5$	$I_f = 1,1$
	10	$V_i = 5$	$I_i = 1,1$
		$V_f = 5$	$I_f = 1,1$

Tableau II.1.b: Tableau des variations de potentiel et de courant pour le bicarbonate de sodium

II.2.2 Gazéification :

➤ **Matériaux utilisés :**

- **Deux boites de peinture :**

On a choisi une boite de peinture d'un volume de $v_1 = 2,7$ L et une autre boite d'un volume de $v_2 = 0,5$ L en métal car elles ont une bonne résistance à la chaleur

- **Un tuyau en fer :**

On a utilisé un tuyau de 6mm et d'hauteur de $h = 12$ cm pour transporter le gaz résultant.

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

- Des écrous :

On a choisi des écrous de type m6 pour relier entre la boîte de volume v2 et le tuyau avec

une couverture de la boîte de volume v2 comme le montra la figure II.4.



Figure II.4 : interconnexion entre la boîte et couverture par des écrous

- Un déchet biomasse :

On a choisi comme un déchet de biomasse mais vous pouvez choisir une autre biomasse les bâtonnets d'oliviers.

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification



Figure II.5 : les bâtonnets d'oliviers

- **Une source de chaleur :**

On a utilisé une résistance comme une source de chaleur.

- **Thermomètre à thermocouple :**

Pour mesurer la température de la flamme résultante.

➤ **Protocole expérimentale :**

- On met une masse de $m=222\text{g}$ des bâtonnets d'oliviers dans la boîte de volume v_1 et on couvrir par couverture comme j'ai démontré sur la figure II. 4, et on a posé la manipe sur la résistance.
- On a lancer l'expérience et après 10 minute la flamme c'est t'allumer.
- On a mesuré la température de la flamme par le thermocouple il a affiché une température de plus que 500°C .

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification



Figure II.6 : image explicative du système utilisé pour la gazéification et de flamme résultante

II.2.3 La pyrolyse :

➤ **Matériaux utilisés :**

- **Deux boites de lait de bébé :**

On a utilisé deux boites de lait de bébé d'un volume $v = 400$ ml.

- **Un scotch d'aluminium :**

On a choisi ce type de scotch pour éviter la fuite de gaz.

- **Les sciures du bois :**

On a utilisé les sciures du bois comme un déchet.

- **L'alcool :**

Pour allumer les coupant du bois.

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

➤ **Protocole expérimentale :**

- On a fait des trous de 5mm en bas de la première boîte de lait et des trous de 10mm en haut de la deuxième boîte en a même mis des petits trous en fond de cette boîte.
- On a relié les deux boîtes par le scotch d'aluminium comme il est indiqué sur la figure II.7



Figure II.7 : connexion entre les deux boîtes

- On a mis une masse de $m = 100$ g des sciures du bois dans la boîte et en ajoute un volume de $v = 5$ ml d'alcool
- On allume le mélange pour que n'obtient à la fin une flamme d'une température supérieure à 300°C

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification



Figure II.8 : image explicative de l'expérience de pyrolyse et sa flamme résultante

II.3 ANALYSE DES DONNEES DE PRODUCTION D'HYDROGENE EN UTILISANT L'INTILIGENCE ARTIFICIELLE :

II.3.1 Bibliothèque Panda :

➤ **Méthode de calcul :**

Ce code crée un graphique 3D où chaque point représente une combinaison de quantité de KOH, bicarbonate avec le courant et potentiel. Les points sont colorés en fonction de leur cluster, et les centres de cluster sont marqués en rouge. Vous pouvez ajuster le nombre de clusters selon la structure de vos données. Pour commencer, nous allons utiliser Python avec les bibliothèques Matplotlib et NumPy pour créer les graphiques en 3D et traiter les données. Pour intelligence artificielle, nous allons intégrer la bibliothèque Scikit-learn pour effectuer une analyse de clustering afin de visualiser les relations entre les données. Voici comment vous pouvez procéder:

- **Installation des bibliothèques nécessaires :** matplotlib numpy scikit-learn

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

- **Préparation des données** : Chargez vos données à partir d'un fichier CSV ou Excel, ou créez-les directement dans votre script. Par exemple, supposons que vous ayez des listes pour chaque paramètre.
- **Analyse de clustering** : Utilisez l'algorithme de clustering K-Means pour regrouper vos données en clusters.
- **Visualisation en 3D** : Utilisez Matplotlib pour créer le graphique en 3D avec les clusters colorés

II.3.2 PARTIE Opencv :

➤ Introduction à Open CV en Python :

Open CV (Open Source Computer Vision Library) est une bibliothèque open source largement utilisée pour le traitement d'images et la vision par ordinateur. Cette bibliothèque offre une gamme étendue d'outils et de fonctionnalités pour manipuler des images, détecter des objets, effectuer des opérations de suivi, et bien plus encore. Dans ce texte, nous explorerons l'historique d'Open CV, ses applications en physique, ses utilisations dans le domaine des énergies vertes, ainsi que ses applications les plus récentes.

➤ Historique d'Open CV :

Open CV a été développé par Intel en 1999 dans le but de fournir une plateforme robuste pour le traitement d'images en temps réel. Initialement écrit en C et C++, Open CV est devenu une bibliothèque très populaire grâce à sa polyvalence et sa performance. En 2009, Open CV a été porté vers Python, élargissant ainsi sa base d'utilisateurs et facilitant le développement d'applications de vision par ordinateur en Python [19,20].

➤ Applications en Physique :

En physique, Open CV est utilisé pour diverses applications, notamment dans l'analyse d'images provenant de microscopes électroniques, la détection de particules subatomiques, l'analyse de spectres lumineux, la mesure de déformations et de contraintes sur des matériaux, et la modélisation de phénomènes optiques complexes. Par exemple, des chercheurs utilisent Open CV pour suivre le mouvement de particules dans des fluides, ce qui contribue à la compréhension des processus de diffusion et de convection [21].

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

➤ Application en Énergies Vertes :

Dans le domaine des énergies vertes, Open CV est utilisé pour la surveillance et l'analyse d'installations solaires et éoliennes. Les caméras et capteurs équipés d'Open CV sont utilisés pour surveiller les performances des panneaux solaires, détecter les pannes ou les défauts, optimiser le suivi solaire, et analyser les conditions météorologiques pour une meilleure gestion de l'énergie.

➤ Les Plus Récentes Applications d'Open CV (depuis 2021 à ce jour) :

Depuis 2021, Open CV a connu des avancées significatives et de nouvelles applications émergentes dans divers domaines :

- **Vision par Ordinateur et IA** : Open CV est largement utilisé dans le développement de modèles de vision par ordinateur et d'intelligence artificielle, notamment pour la reconnaissance d'objets, la détection de visages, la segmentation d'images, et la réalité augmentée.
- **Automatisation Industrielle** : Dans l'industrie, Open CV est utilisé pour l'automatisation des processus de fabrication, le contrôle qualité basé sur l'imagerie, et la robotique industrielle pour la manipulation d'objets.
- **Santé et Médecine** : Open CV trouve des applications dans le domaine médical, notamment pour l'analyse d'imagerie médicale, la détection de maladies à partir d'images, et le suivi de mouvements pour la rééducation.
- **Voitures Autonomes** : L'industrie automobile utilise Open CV pour le développement de systèmes avancés d'aide à la conduite, de détection d'obstacles, et de vision à 360 degrés pour les véhicules autonomes.

En conclusion, Open CV est une bibliothèque puissante et polyvalente qui continue d'évoluer pour répondre aux besoins croissants en traitement d'images, en vision par ordinateur et en intelligence artificielle dans de nombreux domaines, ce qui en fait un outil essentiel pour les chercheurs, les ingénieurs et les développeurs du monde entier.

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

II.3.3 PARTIE IA / HYDROGENE VERT :

L'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) dans les énergies vertes, et plus particulièrement dans le développement de l'hydrogène vert, représente une avancée majeure dans la transition vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement. L'IA offre un large éventail d'outils et de techniques qui peuvent être exploités pour optimiser la production, la distribution et l'utilisation de l'hydrogène vert, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et actions contre le changement climatique.

L'un des principaux domaines où l'IA trouve son utilité dans les énergies vertes est la gestion intelligente des réseaux électriques. Avec l'intégration croissante des énergies renouvelables intermittentes telles que l'énergie solaire et éolienne, il devient essentiel de pouvoir prédire et gérer la demande et la production d'électricité de manière efficace. L'IA permet de développer des modèles prédictifs précis qui prennent en compte les variations météorologiques, les schémas de consommation et les fluctuations de la production d'énergie renouvelable, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles et de minimiser les pertes.

Dans le contexte spécifique de l'hydrogène vert, l'IA offre des opportunités importantes pour améliorer l'efficacité des processus de production, de stockage et de distribution. Par exemple, les techniques d'apprentissage automatique peuvent être utilisées pour optimiser les paramètres de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, en ajustant automatiquement les niveaux de courant, de tension et de température pour maximiser le rendement énergétique et réduire les coûts.

De plus, l'IA peut jouer un rôle crucial dans le développement de systèmes de stockage avancés pour l'hydrogène vert. Les algorithmes d'optimisation basés sur l'IA peuvent être utilisés pour concevoir des systèmes de stockage intelligents qui prennent en compte les variations de la demande et de la production, les contraintes logistiques et les coûts associés. Cela permet d'assurer une disponibilité continue de l'hydrogène vert lorsque cela est nécessaire, ce qui renforce sa viabilité en tant que source d'énergie alternative.

Par ailleurs, l'IA peut également être exploitée pour améliorer l'efficacité des processus de distribution et d'utilisation de l'hydrogène vert. Les systèmes d'IA peuvent être intégrés aux réseaux de distribution pour optimiser les itinéraires de livraison, minimiser les pertes et réduire les temps d'attente. De même, des applications d'IA embarquées dans les véhicules et les équipements utilisant de l'hydrogène vert peuvent contribuer à une gestion plus intelligente de la consommation et à une meilleure efficacité énergétique.

En conclusion, l'utilisation de l'intelligence artificielle dans les énergies vertes, notamment dans le domaine de l'hydrogène vert, ouvre la voie à des avancées significatives en matière d'efficacité

Chapitre II : Expériences de l'électrolyse, pyrolyse et gazéification

énergétique, protection de l'environnement et diminution de gaz à effet de serre. En combinant les capacités de l'IA avec les innovations technologiques dans le secteur des énergies renouvelables, nous pouvons accélérer la transition vers un avenir énergétique plus propre et plus durable.

L'intelligence artificielle (IA) joue également un rôle crucial dans l'analyse et l'optimisation des processus de production d'hydrogène, y compris les techniques telles que la pyrolyse, gazéification et d'autres méthodes de production innovantes. Ces méthodes sont essentielles pour développer des solutions durables et efficaces de production d'hydrogène, et l'IA peut grandement contribuer à leur amélioration.

L'une des principales applications de l'IA dans l'analyse du rendement des processus de production d'hydrogène est la modélisation et la simulation avancée. Les techniques d'apprentissage automatique et d'optimisation peuvent être utilisées pour développer des modèles prédictifs précis qui simulent le comportement des réacteurs de pyrolyse et gazéification ou d'autres installations de production d'hydrogène. Ces modèles tiennent compte de multiples paramètres tels que la température, la pression, les débits de réactifs, les catalyseurs, etc., pour prédire le rendement et l'efficacité du processus.

En utilisant ces modèles, les chercheurs et les ingénieurs peuvent explorer différentes configurations et conditions opérationnelles pour maximiser le rendement et minimiser les pertes énergétiques. Par exemple, l'IA peut identifier les conditions optimales de température et de pression pour la pyrolyse ou suggérer des améliorations dans la conception des réacteurs pour une meilleure distribution des réactifs et une réaction plus efficace.

II.4 CONCLUSION :

En conclusion, ce chapitre a exposé les méthodologies employées pour les expériences d'électrolyse, de pyrolyse et de gazéification. Chaque technique a montré son potentiel pour transformer la matière en énergie de manière efficace et durable. L'hydrogène dans l'électrolyse est produit par l'eau, dans la pyrolyse la biomasse se convertit en gaz et biochar, et les déchets solides se transfèrent en gaz de synthèse par la gazéification. Ces méthodes, enrichies par l'analyse de données et l'intelligence artificielle, offrent des solutions prometteuses pour un avenir énergétique plus propre.

Chapitre III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.1 INTRODUCTION :

On a réalisé les montages des trois méthodes de production d'hydrogène – électrolyse – pyrolyse – gazéification au niveau de l'URMER.

Des tests de vérification furent entrepris à la fin de chaque réalisation pour vérifier la présence de l'hydrogène.

A chaque réalisation l'intelligence artificielle fut utilisée pour analyser et projeter les résultats expérimentaux (Représentation graphiques).

III.2 PRODUCTION D'HYDROGENE PAR L'ELECTROLYSE D'EAU :

III.2.1 Méthode de quantification d'hydrogène :



Figure III.1 : montage expérimentale de la méthode d'électrolyse d'eau

Dans le processus d'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène, le gaz résultant a été observé sous la forme de gouttes sphériques d'eau. [27] Initialement, le volume d'une de ces gouttes était de $v_{goutte}=0,05$ ml, tandis qu'après une minute, ce volume avait augmenté $v_{goutte}=1,21$ ml.

En utilisant ces données, nous avons calculé le nombre et le volume des gouttes produites par le KOH et le bicarbonate de sodium sur une période de cinq minutes. Les résultats obtenus variaient en fonction des différentes masses utilisées comme indiqué dans le tableau II.1 et le tableau III.2.

En fin on a utilisé une programmation en python pour calculer la quantité d'hydrogène et d'oxygène à partir du nombre de gouttes d'eau produites dans l'électrolyseur par des différentes masses de KOH et de Bicarbonate.

Chapitre III : Résultats et Discussions

Masses(g)	Nombre de gouttes	Volume de goutte (ml)
1	n = 0	v = 0
2	n = 422	v = 21,1
3	n = 625	v = 31,25
4	n = 789	v = 39,45
5	n = 810	v = 40,5
6	n = 857	v = 42,85
7	n = 909	v = 45,45
8	n = 967	v = 48,35
9	n = 1000	v = 50
10	n = 1034	v = 51,7

Tableau III.1 : Variation de nombre et de volume des gouttes d'eau en fonction de masse de KOH

Dosages (g)	Nombre de gouttes	Volume de goutte (ml)
1	n = 0	v = 0
2	n = 23	v = 1,15
3	n = 232	v = 11,6
4	n = 375	v = 18,75
5	n = 379	v = 18,95
6	n = 461	v = 23,05
7	n = 483	v = 24,15
8	n = 545	v = 27,25
9	n = 666	v = 33,3
10	n = 714	v = 35,7

Tableau III.2 : Variation de nombre et de volume des gouttes d'eau en fonction de masse de Bicarbonate

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.2.2 Résultats et commentaires :

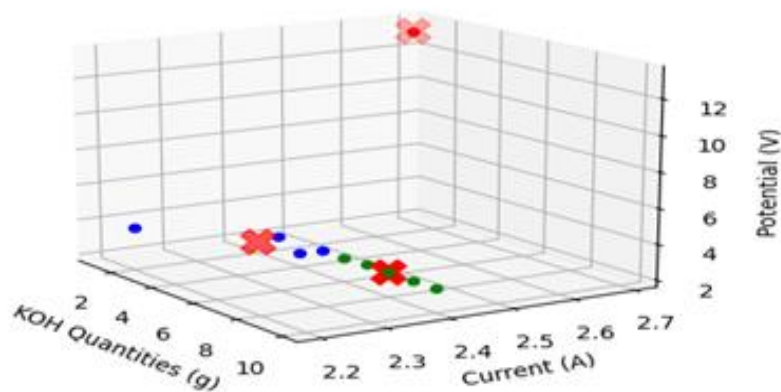


Figure III.2 : Courbe de variation de KOH en fonction de courant (A) et de potentiel (V)

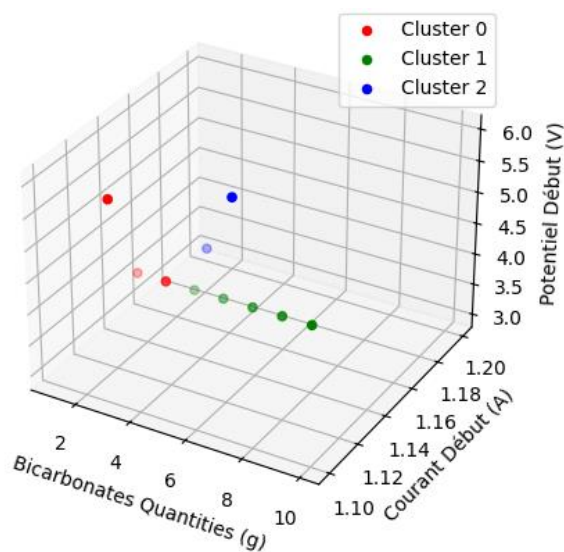


Figure III.3 : Courbe 3D de variation de bicarbonate en fonction de courant (A) et de potentiel (V)

Chapitre III : Résultats et Discussions

La Figure III.2 présente un graphique 3D (trois dimension) qui montre la relation entre la quantité de KOH (hydroxyde de potassium) et le courant électrique, le potentiel électrique.

L'axe des abscisses, représente le courant électrique en ampères (A), et sur l'axe des ordonnées, on a le potentiel électrique en volts (V), et l'axe vertical, représente la quantité de KOH en grammes (g).

Le graphique montre que la quantité de KOH augmente proportionnellement au courant électrique et au potentiel électrique dans la solution ; car ceux-ci attirent les ions KOH vers les électrodes, entraînant ainsi une augmentation de leur concentration.

On remarque aussi que la quantité maximale de KOH dissoute dépend de sa concentration initiale. Plus cette dernière est élevée, plus la quantité maximale de KOH pouvant être dissoute est importante également.

Les différentes couleurs qui sont sur la surface représentent les différents niveaux de concentrations de KOH, allant des zones rouges (concentrations élevées) aux zones bleues (concentrations plus faibles).

Ce graphique est pratique pour déterminer la quantité nécessaire de KOH dans des diverses applications, telle que l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène, ainsi que pour étudier la solubilité du KOH dans l'eau en tenant compte de variable comme la température.

Le graphe de la Figure III.3 sous forme 3D représente la relation entre la quantité de bicarbonate, le courant électrique et le potentiel électrique dans une expérience d'électrolyse utilisant des électrodes en acier inoxydable.

Les axes du graphe sont définis comme suit : l'axe X indique le "Potentiel Début (V)", soit la tension appliquée au début de l'expérience ; l'axe Y montre les "Quantités de Bicarbonates (g)", qui est la quantité de bicarbonate introduite en grammes ; et l'axe Z représente le "Courant Début (A)", c'est le courant électrique appliqué au début de l'expérience.

Les points de données sont regroupés en trois clusters distincts, identifiés par des couleurs différentes : Cluster 0 (bleu), Cluster 1 (violet) et Cluster 2 (vert).

Le graphe de la figure II.3 montre que la densité du bicarbonate augmenter avec la quantité de bicarbonate introduite, suggérant une augmentation de la concentration en ions bicarbonate. De plus, une tendance générale à l'augmentation du courant électrique avec l'augmentation de la quantité de bicarbonate et du potentiel électrique est observée, indiquant que l'augmentation de ces variables favorise le passage du courant électrique dans la solution.

Cluster 0 regroupe des données avec un courant relativement faible, même pour des valeurs élevées de bicarbonate et de potentiel, indiquant une efficacité moindre de la réaction d'électrolyse. Cluster 1 regroupe des données avec un courant plus élevé pour des valeurs élevées de bicarbonate et de potentiel, indiquant une plus grande efficacité ; et Cluster 2 regroupe des données avec un courant intermédiaire.

Chapitre III : Résultats et Discussions

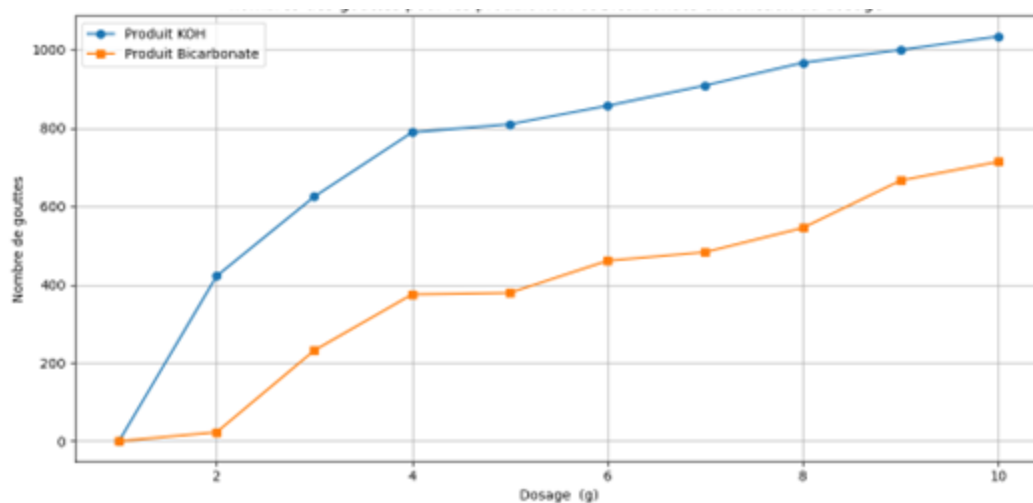


Figure III.4 : Nombre des gouttes en fonction des masses en (g) de KOH et de bicarbonate de sodium

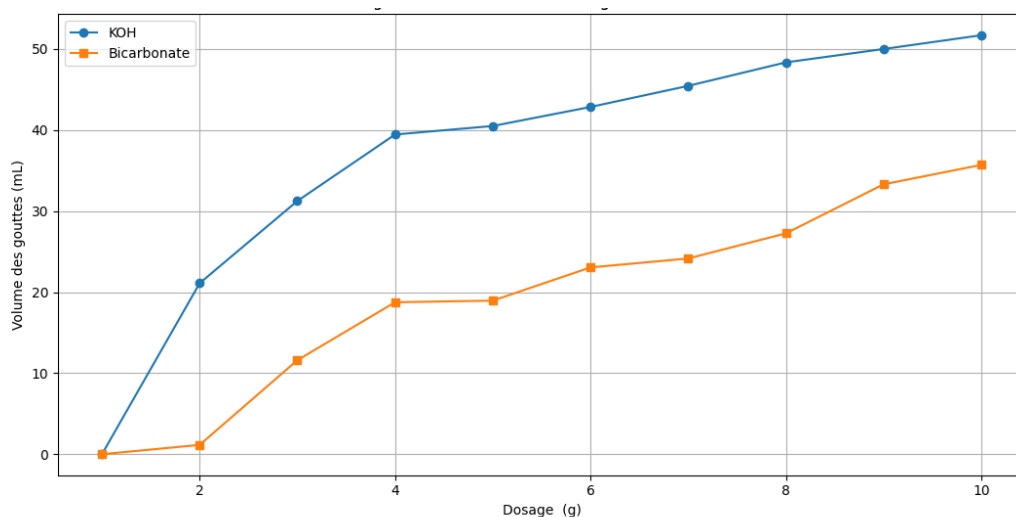


Figure III.5 : Variation de volume des gouttes produite en fonction des masses (g) de KOH et Bicarbonate

La Figure III.4 montre le nombre de goutte d'eau en fonction des masses en gramme de KOH et de Bicarbonate de sodium (NaHCO_3) dans l'électrolyse d'eau [24,25].

L'axe des x représente la masse de KOH et de Bicarbonate, en grammes. La masse est la quantité de produit ajoutée dans l'eau distille. Et L'axe des y représente le nombre de gouttes produite dans l'électrolyse.

On a deux courbes une courbe bleu qui représente le nombre de gouttes pour le dosage de KOH. On remarque que le nombre de gouttes augmente proportionnellement avec la masse de KOH ajoute au l'eau distille. Cela signifie que plus on ajoute de KOH, plus la production de nombre de gouttes augmente. Et une courbe orange montre le nombre de gouttes pour la masse de

Chapitre III : Résultats et Discussions

Bicarbonate de sodium. On peut voir que le nombre des gouttes dans la masse de Bicarbonate augmente également.

Néanmoins, la pente de la courbe orange plus faible que celle de la courbe bleue. Cela veut dire qu'il faut plus de masse de Bicarbonate de sodium que la masse de KOH pour produire le même nombre de gouttes.

On peut dire d'après les deux courbes que le KOH (hydroxyde de potassium) est un agent plus efficace que le Bicarbonate de sodium pour produire un nombre de goutte nécessaire dans l'électrolyse.

La Figure III.5 représente la variation de volume de gouttes en fonction de masse (g) de KOH et de Bicarbonate dans l'électrolyse.

La courbe bleue représente le volume de gouttes en fonction de masse (g) de KOH, et la courbe orange représente le volume de gouttes par rapport à la masse en gramme de Bicarbonate.

On peut voir que le volume de goutte augmente d'une façon plus importante dans la masse de KOH que pour la masse de Bicarbonate. Cela veut dire que la masse KOH plus efficace pour l'augmentation de volume de gouttes par rapport à la masse de Bicarbonate. On peut observer également que dans un moment donné la courbe bleue et la courbe orange se croisent. Cela veut dire que à partir d'une certaine masse de KOH, le volume de gouttes est plus important avec le KOH et le Bicarbonate

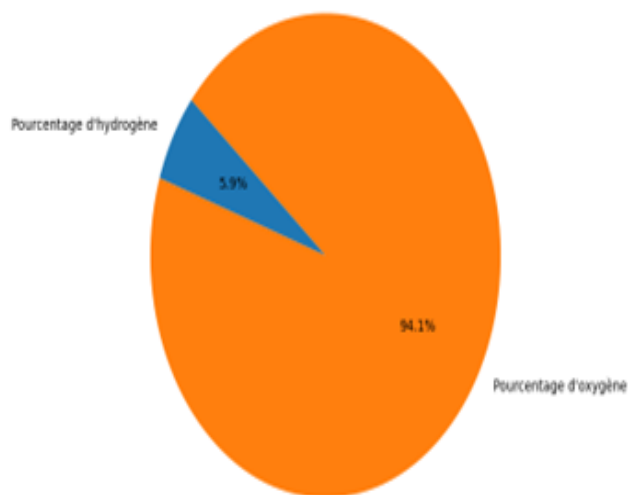


Figure III.6 : pourcentages d'hydrogène et d'oxygène produit à partir des gouttes d'eau produit par l'électrolyse dans des différents masses de KOH

Chapitre III : Résultats et Discussions

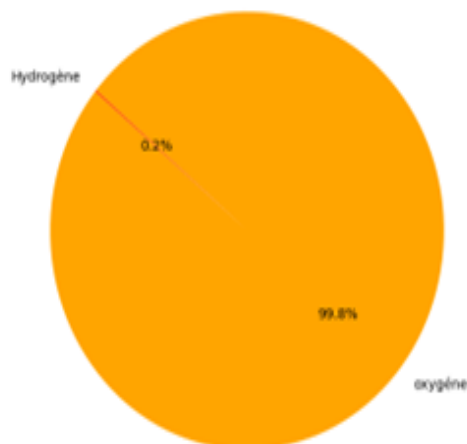


Figure III.7 : représentation des pourcentages de présence d'hydrogène et d'oxygène dans des gouttes d'eau produit dans l'électrolyse dans des différents masses de Bicarbonate

La Figure III.6 représente un graphique sous forme secteur qui présente le pourcentage de l'hydrogène et l'oxygène produit à partir des gouttes d'eau produit par l'électrolyse dans des différents masses de KOH. Le graphique est divisé en deux sagement chacun représentant un pourcentage.

Le premier segment qui est en bleu occupe un pourcentage de 5,9% d'hydrogène. Cela veut dire que les gouttes dans les différentes masses de KOH contiennent un 5,9% d'hydrogène. Et le deuxième segment qui est en orange représente 94,1% d'oxygène produit dans les gouttes résultante à partir des différentes masses de KOH.

Le graphique de la Figure III.6 indique clairement que l'oxygène est présente de quantité plus importante que l'hydrogène dans d'électrolyse dans une masse de KOH différent qui ont été analysées.

Le graphique à secteur de la Figure III.7 représente le pourcentage de présence de l'hydrogène et de l'oxygène dans de l'électrolyse dans des divers masse de Bicarbonate.

Le premier secteur représente le pourcentage d'hydrogène qui occupe une très petite portion du graphique, représente seulement 0,2% d'hydrogène produit dans les gouttes d'eau de l'électrolyse dans des masses différent de Bicarbonate. Contrairement au deuxième secteur qui

Chapitre III : Résultats et Discussions

Présente la quasi-totale du graphique d'un pourcentage d'oxygène de 99,8% produit par l'électrolyse dans des gouttes d'eau de la masse de Bicarbonate différent.

L'oxygène est présent environ 500 fois plus que l'hydrogène. Cela indique que l'oxygène est l'élément dominant dans les gouttes d'eau produit par l'électrolyse dans des masses de Bicarbonate différent.

Donc on peut dire que la production d'hydrogène à partir de l'électrolyse avec des masses différent de KOH est plus élevée que celle du Bicarbonate.

III.3 PRODUCTION D'HYDROGENE PAR PYROLYSE ET GAZEIFICATION :

III.3.1 Méthode de mesurage d'hydrogène :



Figure III.8 : montage expérimentale pour la production d'hydrogène par gazéification

Chapitre III : Résultats et Discussions



Figure III.9: le montage expérimental de la méthode de pyrolyse pour la production d'hydrogène

Dans les méthodes de pyrolyse et de gazéification, le gaz résultant a été observé sous la forme d'une flamme.

Nous avons analysé les flammes montrées dans les Figures III.8 et III.9 à l'aide de l'intelligence artificielle, en utilisant la bibliothèque Opencv en Python pour détecter la présence d'hydrogène. Cette détection repose sur la couleur bleue observée dans chaque flamme.

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.3.2 Résultats et commentaires :

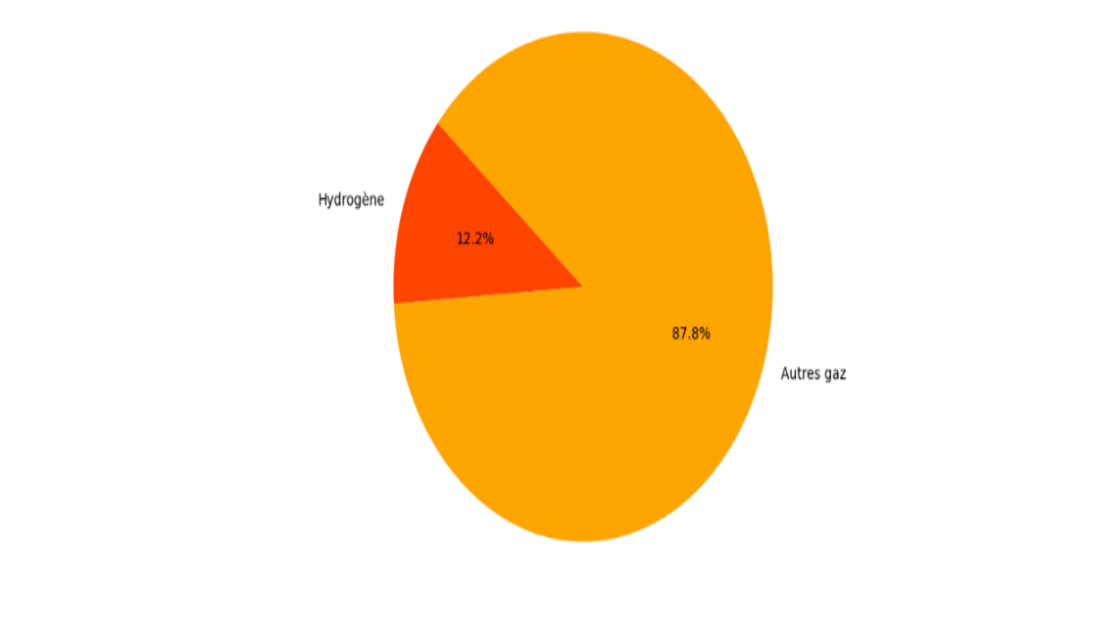


Figure III.10 : présence d'hydrogène et d'autre gaz dans la pyrolyse

Le graphique de la Figure III.10 sous forme secteur représente la répartition des différents gaz présents dans une flamme de pyrolyse.

Le graphique est divisé en deux sections. La première section montre la présence d'hydrogène dans la flamme de pyrolyse, représente environ 12,2% de la composition totale. Cela s'explique de la désagrégation des liaisons chimiques dans le matériau exposé à la pyrolyse, ce qui est libère des molécules d'hydrogène.

La deuxième section représente 87,8% des autres gaz dans la flamme de pyrolyse. Ils comprennent principalement le monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄).

Les proportions exactes des gaz présents de la flamme de pyrolyse peuvent varier selon les matériaux et les conditions utilisées dans la pyrolyse.

En résumé, le graphique souligne la domination de l'hydrogène dans la flamme de pyrolyse, suivi d'une variété des autres gaz.

Chapitre III : Résultats et Discussions

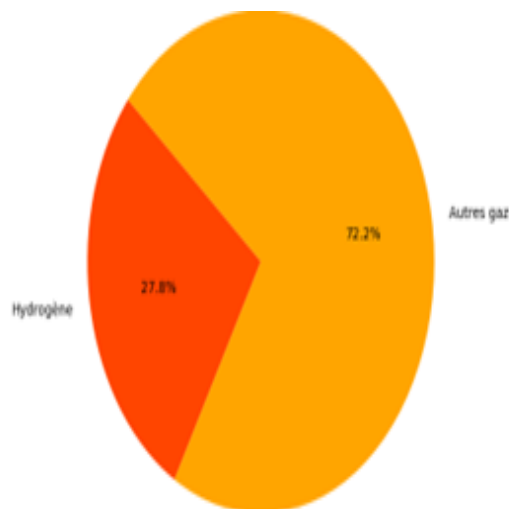


Figure III.11 : pourcentage d'hydrogène et d'autre gaz dans la gazéification

La Figure III.11 représente un graphique sous forme de secteur, montrant la présence d'hydrogène et d'autres gaz de synthèse dans la flamme de gazéification.

Le graphique est constitué de deux secteurs. Le premier secteur représente 27,8% d'hydrogène dans la flamme de gazéification, qui produit par la réaction chimique entre le combustible et l'agent gazéifiant.

Le deuxième secteur présente 72,2% des autres gaz qui sont monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄).

Le graphique montre que l'hydrogène est le gaz le plus important dans la flamme de gazéification. La composition de la flamme peut varier en fonction du type de combustible et de l'agent gazéifiant utilisés [25, 26].

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.4 COMPARAISON DE RENDEMENT D'HYDROGENE PRODUIT PAR LES METHODES DE L'ELECTROLYSE D'EAU, PYROLYSE ET GAZEIFICATION :

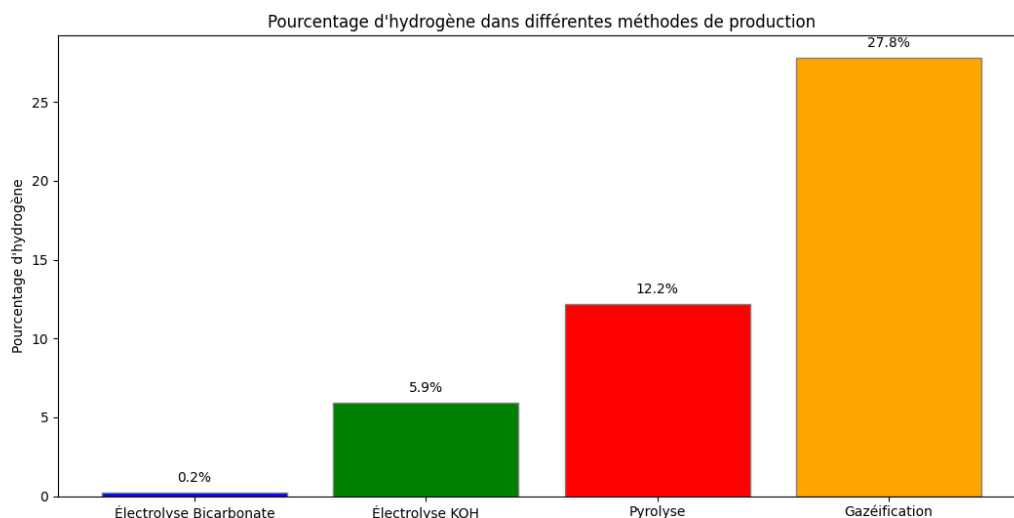


Figure III.12 : comparaison de rendement d'hydrogène produit par les trois méthodes de production (électrolyse, pyrolyse, gazéification)

Le graphique de Figure III.12 sous forme des barres 2D (deux dimension) compare le rendement d'hydrogène obtenu par les trois méthodes de production, telle que l'électrolyse d'eau dans ces deux cas (le cas de KOH et le cas de bicarbonate), la pyrolyse et la gazéification.

Il contient deux axes. Le premier axe qu'est l'axe des x représente les différentes méthode de production d'hydrogène, et le deuxième axe c'est l'axe des y représente le pourcentage ou le rendement de production d'hydrogène par les trois méthodes.

Chaque couleur dans les barres représente une méthode de production. La hauteur de chaque barre représente le pourcentage (le rendement) d'hydrogène produit par les trois méthodes [27].

Dans le processus d'électrolyse, l'utilisation de KOH produit un rendement en hydrogène de 5,9 %, surpassant légèrement celui obtenu avec de l'eau distillée et bicarbonate, où le taux de production d'hydrogène est de 0,2 %. Cette supériorité du KOH par rapport au bicarbonate dans la production d'hydrogène est également soulignée dans l'article d'Arif Karabuga et al. [28].

Le rendement de la pyrolyse atteint 12,2 %, surpassant celui de l'électrolyse dans les deux cas. En revanche, la gazéification affiche un rendement de production d'hydrogène de 27,8 %.

Ainsi, nos recherches concluent que la gazéification est la méthode de production d'hydrogène la plus efficace parmi les deux autres méthodes (pyrolyse et électrolyse dans les deux cas), comme le démontre le tableau III.3 présenté par Les Notes Scientifiques de l'office en 2021 [29]. La pyrolyse se classe en deuxième position en termes d'efficacité, suivie par les deux méthodes

Chapitre III : Résultats et Discussions

D'électrolyse. Par conséquent, l'électrolyse dans ces deux cas se révèle moins efficace dans la production d'hydrogène.

Technologie	Vaporeformage	Oxydation partielle	Gazéification	Électrolyse	Pyrolyse (dont plasma)	Thermolyse	Dissociation thermochimique
Matière première utilisée	Méthane, dérivés pétroliers...	Dérivés pétroliers...	Charbon	Eau + électricité	Méthane	Biomasse	Eau + électricité (ou autre forme d'énergie)
Part et volume / production mondiale	48 % 33,6 millions t.	28 % 19,6 millions t.	23 % 16 millions t.	<1 % <700.000 t.	Quasi-nul	Quasi-nul	Quasi-nul
Couleur*	Gris (bleu si CCS)	Gris (bleu si CCS)	Noir (bleu si CCS)	Vert si ENR Jaune si nucléaire	Turquoise	Vert (à confirmer)	Pas de couleur
Coût estimé (base Europe)	1600€/t (+500 à 2000€ si CCS)	1660€/t (+500 à 2000€ si CCS)	1000€/t (+1000 à 3000€ si CCS)	4000 à 6000€/t (moins cher : l'alcalin, plus cher : le SOEC, entre les deux : le PEM) 2000 à 3000€/t à terme	1660€/t 350 à 850 €/t à terme	2000 à 6000€/t selon la taille des unités	Très incertain car phase R&D (>300€/t)
Maturité	+++	+++	+++	+	-	-	---
Rendement	72 à 82 %	53 à 67 %	50 à 70 %	70 % (jusque 85 % pour le SOEC)	50 %**	70 %	Faible
Emissions de tonnes de CO ₂ par tonne d'hydrogène produite, en ACV (calcul LCOE)	9 à 13 (inférieur à 5 si CCS)	13 à 18 (inférieur à 5 si CCS)	20 (mines à ciel ouvert) 24 (mines souterraines) (moindre si CCS)	Dépend de l'origine de l'électricité utilisée, faible si ENR ou nucléaire (21 selon mix américain et 3 selon mix français)	Dépend de l'origine de l'électricité utilisée (4 selon mix américain et nul ou négatif si ENR)	Faible, nul ou négatif (-15 dans le cas où le biochar produit retourne à la terre)	Dépend de l'origine de l'énergie utilisée, faible si ENR ou nucléaire
Exemples d'acteurs français	Air Liquide, Ifpen	Air Liquide, Total, Ifpen	Ifpen (via Axens)	McPhy, Elogen (ex-ArevaH ₂ Gen), CEA, Genvia, Sylfen, EDF, Air Liquide, Engie	-	Haffner Energy et sa technologie Hynoca, Trifyl	-
Exemples d'acteurs étrangers	Air Products, Linde, Praxair, Airgas, Messer, Amec Foster Wheeler, Technip FMC	Air Products, Shell, Mitsubishi, Conoco Philips, Exxon, Chevron, BP	Shenhua / Guodian, Datong, Sinopec, Baofeng, Air Products, Conoco Philips	Siemens, Thyssenkrupp, Cockerill, Asahi Kasei, Nel, ITM, Sunfire, Schlumberger, Cummins (Hydrogenics)	Monolith Materials	Air Products	-

Tableau III.3 : comparaison des principaux modes de production d'hydrogène

III.5 CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a présenté une étude comparative des trois méthodes de production d'hydrogène. Telle que l'électrolyse de l'eau, la pyrolyse et la gazéification. Chacune de ces techniques présente des avantages et des inconvénients qu'il convient de souligner.

En ce qui concerne l'électrolyse de l'eau, c'est un processus plutôt simple à mettre en place. Son efficacité est notable lorsqu'on utilise du KOH, avec un rendement de production d'hydrogène de 5,9%. En revanche, l'utilisation de bicarbonate de sodium offre un rendement plus faible, seulement 0,2% d'hydrogène produit. De plus, ce processus nécessite une consommation électrique significative.

La pyrolyse présente un rendement plus élevé dans la production d'hydrogène que l'électrolyse, atteignant 12,2%. Elle permet la valorisation des matériaux organiques. Toutefois, la pyrolyse est

Chapitre III : Résultats et Discussions

un processus plus difficile à contrôler que l'électrolyse, entraînant la génération de divers sous-produits gazeux nécessitant un traitement.

Le rendement le plus élevé en termes de production d'hydrogène parmi les trois méthodes est obtenu par la méthode de gazéification, avec un rendement de 27,8%. Cette méthode permet la valorisation énergétique du combustible. Cependant, elle nécessite l'utilisation d'un agent gazéifiant et des conditions opératoires rigoureuses.

En se basant sur ces résultats, la gazéification semble être la méthode la plus efficace pour la production d'hydrogène. Toutefois, le choix de la matière première utilisée dans les trois méthodes joue un rôle crucial dans le rendement d'hydrogène obtenu pour chaque méthode.

III.5 PERSPECTIVES :

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la mise en place de montages expérimentaux pour explorer trois approches distinctes de production d'hydrogène : l'électrolyse, la pyrolyse et la gazéification, menées au sein de l'URMER. On a réalisé des tests de vérification pour confirmer la présence d'hydrogène dans chaque méthode, on a analysé les résultats grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle et l'opencv en python pour produire des représentations graphiques.

Dans la méthode d'électrolyse de l'eau, nous avons examiné la génération d'hydrogène sous forme de gouttes sphériques d'eau. En variant les de KOH et de bicarbonate de sodium, nous avons constaté une augmentation du nombre et du volume de ces gouttes. Les résultats ont montré que le KOH est plus efficace que le bicarbonate de sodium pour la production d'hydrogène.

Les résultats ont été analysés graphiquement, mettant en lumière la relation entre la quantité de KOH et de bicarbonate avec le courant électrique et le potentiel électrique. Ces représentations en trois dimensions (3D) ont démontré une augmentation non linéaire de la quantité de KOH et de bicarbonate en fonction du courant et du potentiel électriques, soulignant ainsi l'importance de la concentration initiale de KOH et de bicarbonate dans le processus d'électrolyse.

Lorsque nous avons comparé les pourcentages d'hydrogène et d'oxygène produits dans différentes solutions, nous avons constaté que le KOH produisait un pourcentage d'hydrogène plus élevé que le bicarbonate de sodium dans le processus d'électrolyse.

Pour les méthodes de pyrolyse et de gazéification, nous avons analysé les flammes résultantes à l'aide de l'intelligence artificielle et opencv en python. Les résultats ont montré une présence notable d'hydrogène dans les deux méthodes, bien que la gazéification ait produit un pourcentage d'hydrogène plus élevé que la pyrolyse.

Pour résumer, nous avons examiné les performances respectives en termes de production d'hydrogène des trois méthodes. La gazéification s'est avérée être la plus efficace, suivie de près par la pyrolyse, tandis que l'électrolyse, en particulier avec l'utilisation de KOH, a montré des rendements moins satisfaisants. Nous avons également tenté d'améliorer notre système et notre rendement en intégrant un panneau solaire pour produire de l'hydrogène vert à partir d'une source d'énergie renouvelable. Malheureusement, nous n'avons pas pu trouver un panneau

Chapitre III : Résultats et Discussions

solaire adapté à la puissance requise pour notre montage d'électrolyse, que ce soit à l'URMER ou dans le laboratoire d'énergétique du département.

Cette étude met en évidence la diversité des performances entre les différentes méthodes de production d'hydrogène, soulignant ainsi l'importance du choix de la méthode et de la matière de matériaux utiliser en fonction des besoins spécifiques et des conditions opératoires.

Nous suggérons les pistes suivantes pour de futures recherches :

- Explorer différentes solutions aqueuses lors de l'électrolyse de l'eau.
- Exploiter une variété de biomasses et de matières organiques dans les processus de pyrolyse et de gazéification.
- Mettre en place un montage expérimental d'électrolyse de l'eau fonctionnant entièrement à partir d'une source d'énergie verte.
- Concevoir un montage expérimental pouvant être connecté directement à un chromatographe pour des analyses en temps réel.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Cette étude a permis d'explorer et de comparer trois méthodes de production d'hydrogène : l'électrolyse de l'eau, la pyrolyse et la gazéification.

Chaque méthode présente des caractéristiques distinctes en termes d'efficacité, de complexité et d'applications potentielles.

L'électrolyse, bien que simple à mettre en œuvre, montre une efficacité variable selon les électrolytes utilisés et la matière des électrodes utiliser, avec le KOH se révélant plus performant que le bicarbonate de sodium.

La pyrolyse offre un rendement supérieur à celui de l'électrolyse, valorisant les matériaux organiques, mais reste plus complexe à contrôler.

La gazéification, quant à elle, s'est avérée être la méthode la plus efficace pour la production d'hydrogène dans notre cas expérimental et selon le genre de la matière utiliser, malgré des conditions opératoires rigoureuses.

L'utilisation de l'intelligence artificielle et des techniques de traitement d'images ont apporté une analyse précise et innovante des résultats expérimentaux, renforçant ainsi la pertinence des conclusions.

En somme, cette étude met en lumière l'importance de choisir la méthode de production d'hydrogène en fonction des besoins spécifiques et des conditions disponibles, tout en soulignant les perspectives d'amélioration continue grâce aux avancées technologiques et aux innovations futures.

BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographiques

- [1] : Soheyb Fadel. Etude des procédés de traitement des déchets par plasma pour la production de l'Hydrogène, mémoire de master. Université Abou-Bakr Belkadi – Tlemcen.2021.
- [2] : Bouziane khadidja. ETUDE D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE DE PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU, mémoire de master. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.2011.
- [3] : F. Gallucci, M. Van Sintannaland, J. A. M. Kuipers, "Theoretical comparison of packed bed and fluidized bed membrane reactors for methane reforming", mémoire de master, Int. J. Hydrogen Energy 35 7142-7150. 2010 .
- [4] : Moumén Bekkouche ,Mohammed khemais ,Doudi Tah. Etude de la Nature d'Eau d'El Oued sur l'Electrolyse,article scientifique .Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued. 2017/2018.
- [5] : Rihani et al., « LES NOUVELLES METHODES DE PRODUCTION DE L'HYDROGENE ». thèse de doctorat. UNIVERSITE FRERES MENTOURI - CONSTANTINE 1.2020
- [6]: Souad KENDOULI. Etude d'électro catalyseurs en carbone semi-graphitisé pour la décomposition électrochimique de l'eau,article scientifique. UNIVERSITE FRERES MENTOURI - CONSTANTINE 1. 2020.
- [7] : Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, article scientifique .mémento de l'hydrogène fiche 3.2.1, afh2, 2004.
- [8]: Millet, « par électrolyse de l'eau sur membrane acide ».2006.
- [9] : J. Labbe, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école des mines de Paris spécialité énergétique, 2006
- [10] : M. Viseur, Etude de faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie, mémoire de Master, Université libre de Bruxelles, 2007-2008.
- [11] : M. Sahli, Etude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible, mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [12]: Méchara Athmane ,Bouaguel Soumia. ÉTUDE DE LA PYROLYSE DE L'ÉTHANE EN PRÉSENCE DE MONOXYDE D'AZOTE, mémoire de master .UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI (OUM EL BOUAGHI). 2011/2012.
- [13]: FARADJI née KHERBOUCHE Djamilia. Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse, diplôme de doctorat .Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen. 2011.
- [14]: Carrier, M., et al., Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 90(1): P. 18 26
- [15]: BENLADGHEM Khadem Khouloud ,OTMANE CHERIF Hanane. Performance du réseau de la collecte des déchets ménagers cas de transformation du plastique en carburants par pyrolyse, mémoire de master .Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen. 2018/2019.

- [16]: Claudia CADILE. MODÉLISATION DEM ET APPROCHE EXPÉRIMENTALE DE LA DYNAMIQUE D'UN SYSTÈME RÉACTIF EN LIT FLUIDISÉ DENSE : APPLICATION À LA GAZÉIFICATION DE LA BIOMASSE, diplôme de doctorat . École doctorale : "Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique".2014.
- [17]: Sami ZELLAGUI. Pyrolyse et combustion de solides pulvérisés sous forts gradients thermiques. Caractérisation de la dévolatilisation, des matières particulaires générées et modélisation. Université de HAUTE-ALSACE. 2016.
- [18] : P Fede, G Moula, A Ingram, T Dumas, and O Simonin. 3d numerical simulation and pept experimental investigation of pressurized gas-solid fluidized bed hydrodyna mic. In ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, P 1833–1842. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [19]: Xavier DEGLISE. Cogénération biomasse dans l'industrie et sur les réseaux de chaleur, mémoire de master. Nancy université.2007.P15
- [20] : Astel, A. M., & Piskula, P. (2023). Application of Pattern Recognition and Computer Vision Tools to Improve the Morphological Analysis of Microplastic Items in Biological Samples. *Toxics*, 11(9), 779.
- [21] : Wiinikka, H., Sepman, A., Ögren, Y., Lindblom, B., & Nordin, L. O. (2019). Combustion evaluation of renewable fuels for iron-ore pellet induration. *Energy & fuels*, 33(8), 7819-7829.
- [22] : Fan, J., Du, M., Liu, L., Li, G., Wang, D., & Liu, S. (2023). Macerals particle characteristics analysis of tar-rich coal in northern Shaanxi based on image segmentation models via the U-Net variants and image feature extraction. *Fuel*, 341, 127757.
- [23] : Massarelli, C., Campanale, C., & Uricchio, V. F. (2021). A handy open-source application based on computer vision and machine learning algorithms to count and classify microplastics. *Water*, 13(15), 2104.
- [24] : Zheng, L., & Yapa, P. D. (2000). Buoyant velocity of spherical and nonspherical bubbles/droplets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), 852-854.
- [25] : Busuioc, S., Frezzotti, A., & Gibelli, L. (2023). A weighted particle scheme for Enskog-Vlasov equation to simulate spherical nano-droplets/bubbles. *Journal of Computational Physics*, 475, 111873.
- [26] : Bermudez-Graterol, J. M., Nickaeen, M., & Skoda, R. (2021). Numerical simulation of spherical bubble collapse by a uniform bubble pressure approximation and detailed description of heat and mass transfer with phase transition. *Applied Mathematical Modelling*, 96, 80-110.
- [27] : Balla, M., Tripathi, M. K., & Sahu, K. C. (2020). A numerical study of a hollow water droplet falling in air. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 34, 133-144.

[28] : Karabuga Arif, Melik Ziya Yakut, Zafer Utlu. Article .Energy and exergy analysis of waste heat and solar energy assisted for hydrogen production system: A case study, International Journal of Hydrogen Energy , P10 . 2024

[29] : Benhabri Mehdi . Les Notes Scientifiques de l'Office , P10 . avril 2021

ANNEXE

ANNEXE 1

(Programme de détection d'hydrogène dans une flamme avec l'utilisation d'un vidéo)

```
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Charger la vidéo
video_capture = cv2.VideoCapture("video/nom de video.mp4")
# Définir les bornes de couleur pour l'hydrogène et les autres gaz (à adapter selon votre vidéo)
lower_hydrogen = np.array([0, 100, 100])
upper_hydrogen = np.array([30, 255, 255])
lower_other = np.array([0, 0, 0])
upper_other = np.array([30, 255, 255])
# Initialiser des compteurs pour les pixels de gaz détectés
hydrogen_pixel_count = 0
other_pixel_count = 0
# Parcourir chaque frame de la vidéo
while True:
    ret, frame = video_capture.read()
    if not ret:
        break
    # Convertir l'image en espace couleur HSV
    hsv_frame = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    # Créer un masque pour l'hydrogène
    hydrogen_mask = cv2.inRange(hsv_frame, lower_hydrogen, upper_hydrogen)
    # Créer un masque pour les autres gaz
    other_mask = cv2.inRange(hsv_frame, lower_other, upper_other)
```



```

# Compter le nombre de pixels pour chaque gaz dans les masques
hydrogen_pixel_count += np.sum(hydrogen_mask == 255)
other_pixel_count += np.sum(other_mask == 255)

# Afficher les résultats dans un graphe uniquement si des données sont disponibles
labels = ['Hydrogène', 'Autres gaz']
sizes = [hydrogen_pixel_count, other_pixel_count]
colors = ['#FF4500', '#FFA500']

plt.figure(figsize=(6, 6))
plt.pie(sizes, labels=labels, colors=colors, autopct='%1.1f%%', startangle=140)
plt.axis('equal')
plt.title('Présence d\'hydrogène et autres gaz dans la flamme')
plt.show()

# Libérer la capture vidéo
video_capture.release()

```

ANNEXE 2

(Programme de calcul de pourcentage de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de nombre des gouttes d'eaux produit dans le KOH et ainsi que le Bicarbonate)

```
def calculer_pourcentage_hydrogene_et_oxygene :  
    # Constantes pour le calcul des proportions  
    masse_molaire_koh = 56.11 # g/mol  
    masse_molaire_h2o = 18.015 # g/mol  
    masse_molaire_h2 = 2.016 # g/mol  
    masse_molaire_o2 = 31.998 # g/mol  
  
    # Conversion du nombre de gouttes en grammes de masse KOH  
    masse_koh = nombre_gouttes_masses_KOH * 0.05 # Supposons que chaque goutte pèse  
    environ 0.05 g  
  
    # Calcul des quantités de H2O, H2 et O2  
    quantite_h2o = masse_koh / masse_molaire_koh * 2 * masse_molaire_h2o  
    quantite_h2 = quantite_h2o / 2 * masse_molaire_h2  
    quantite_o2 = quantite_h2o / 2 * masse_molaire_o2  
  
    # Calcul des pourcentages d'hydrogène et d'oxygène  
    pourcentage_h2 = (quantite_h2 / (quantite_h2 + quantite_o2)) * 100  
    pourcentage_o2 = (quantite_o2 / (quantite_h2 + quantite_o2)) * 100  
    return pourcentage_h2, pourcentage_o2  
  
# Liste des nombres de gouttes à tester  
nombres_gouttes = [422, 625, 789, 810, 857, 909, 967, 1000, 1034]  
  
# Initialiser des listes pour stocker les pourcentages d'hydrogène et d'oxygène  
pourcentage_h2_liste = []  
pourcentage_o2_liste = []  
  
# Calculer les pourcentages pour chaque nombre de gouttes et les stocker dans les listes
```

```

for nombre_gouttes in nombres_gouttes:

    pourcentage_hydrogene, pourcentage_oxygene =
    calculer_pourcentage_hydrogene_et_oxygene(nombre_gouttes)

    pourcentage_h2_liste.append(pourcentage_hydrogene)
    pourcentage_o2_liste.append(pourcentage_oxygene)

# Créer une liste de labels pour les secteurs
labels = ['Pourcentage d\'hydrogène', 'Pourcentage d\'oxygène']

# Créer une liste de données pour les secteurs
donnees = [pourcentage_h2_liste[-1], pourcentage_o2_liste[-1]] # Utilisez les dernières valeurs
de la liste

# Tracer le graphique en secteurs
plt.pie(donnees, labels=labels, autopct='%1.1f%%', startangle=140)

plt.axis('equal') # Assurez-vous que le graphique soit circulaire

plt.title('Répartition des pourcentages d\'hydrogène et d\'oxygène\npour ' +
str(nombres_gouttes[-1]) + ' gouttes de masse KOH')

plt.show()

```