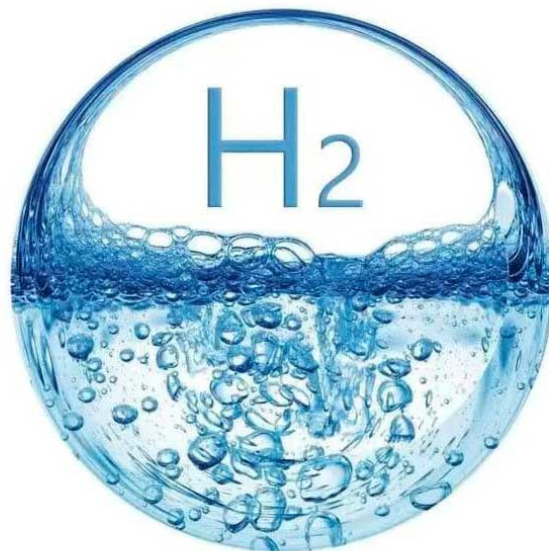


Étude et conception d'un banc à hydrogène



Étudiants :

Rémi CLÉMENCIN
Domitille GENOT
Guillemette HÉCART
Brice JIBEAUX
Corentin PECQUET
Léonie RYST

Enseignant-responsable du projet :

Abdellah HADJADJ

Date de remise du rapport: 13/06/2020

Référence du projet: STPI/P6/2020 - 29

Intitulé du projet: Étude et conception d'un banc à hydrogène

Type de projet: Théorique

Objectifs du projet:

- Étude des différents types de production d'hydrogène
- Concevoir un banc à hydrogène
- Étude d'une flamme à hydrogène
- Étude des grandeurs relatives à l'expérience : intensité, température, temps

Mots clefs du projet:

- Électrolyse
- Banc à hydrogène
- Flamme laminaire

Institut National des Sciences Appliquées de Rouen
Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur
685 Avenue de l'Université BP 08 - 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray
Tél : +33 2 32 95 66 21 - Fax : +33 2 32 95 66 31

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier notre enseignant-responsable **Mr Abdellah HADJADJ** pour nous avoir guidés, conseillés et ainsi permis une bonne réorientation de notre projet en raison de la pandémie du COVID 19 qui a bousculé le planning et l'objectif initial du projet. Nous tenons également à remercier **Mme Martine TALBAUT** pour nous avoir prêté la notice de son banc à hydrogène et expliqué son fonctionnement.

Nous remercions également **Mr Jérôme Yon** en tant que coordinateur des projets de physique du module P6 pour nous avoir éclairés sur des questions que nous nous posions sur la combustion de l'hydrogène.

Table des matières

Remerciements	3
Notations et acronymes	5
Introduction	7
Organisation du travail	8
I. Différents procédés de production de dihydrogène	9
I.1. Reformage	9
I.1.i. Vaporeformage ou le reformage à la vapeur	9
I.1.ii. Oxydation partielle	9
I.1.iii. Reformage autotherme (ATR):	10
I.2. Gazéification	11
I.2.i. Processus	11
I.2.ii. Avantages et inconvénients de la Gazéification	12
I.2.iii. Evolution du rapport des sociétés vis à vis de la gazéification	13
I.3. Electrolyse de l'eau	13
I.3.i. Principe	13
I.3.ii. Différentes méthodes d'électrolyse de l'eau	15
II. Etude de la conception d'un banc à hydrogène	18
II.1. Proposition d'un banc à hydrogène	18
II.1.i. Principe et fonctionnement de notre banc	18
II.1.ii. Devis, dimensionnement et matériaux	21
II.2. Calculs théoriques	23
II.2.i. Calcul de la température au brûleur	23
II.2.ii. Calcul du temps de l'électrolyse	25
II.2.iii. Calcul de l'intensité au générateur	25
II.2.iv. Calcul de la puissance de l'électrolyse	27
III. Difficultés rencontrées et analyses critiques du projet	29
III.1. Difficultés	29
III.2. Limitations	29
III.3. Optimisation	30
Conclusion	31
Annexes	32
Annexe A : Étapes et procédés de gazéification	33
Annexe B : Influence de la température sur le volume de production d'hydrogène	35
Annexe C : Calcul de la conductivité ionique du sulfate de sodium dans l'eau	36
Annexe D : Devis du banc à hydrogène	37
Annexe E: Influence de l'intensité sur les paramètres du système	41
Annexe F: Tension à appliquer aux bornes du générateur	44
Bibliographie	45

Notations et acronymes

Constante

Constante de Faraday : F

Valeur

96485 $C \cdot mol^{-1}$

Constante des gaz parfaits : R

8.314 $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$

Pression atmosphérique : P_{atm}

101325 Pa

Grandeur

Symbole

Unité

Intensité

I

A

Temps

Δt

s

Pression

P

Pa

Température

T

K

Volume

V

m^3

Masse volumique

ρ

$kg \cdot m^{-3}$

Masse molaire

M

$kg \cdot mol^{-1}$

Reynolds

Re

adimensionnel

Vitesse caractéristique débitante

v

$m \cdot s^{-1}$

Section de la tuyère

S

m^2

Viscosité cinématique

ν

$m^2 \cdot s^{-1}$

Viscosité dynamique

μ

$Pa \cdot s$

Diamètre de la buse

d

m

Longueur

L

m

Débit volumique

Q_v

$m^3 \cdot s^{-1}$

Enthalpie de combustion

$\Delta_c H^o$

$J \cdot mol^{-1}$

Avancement de réaction

ξ

mol

Quantité de matière (initiale)

n (n_0)

mol

Quantité de charges

Q

C

Tension	ΔE	V/ESH
Potentiel à l'anode (cathode)	Ea^0 (Ec^0)	V/ESH
Concentration de l'espèce i	C_i	$mol.m^{-3}$
Conductivité	θ	$S.m^{-1}$
Conductivité molaire ionique de l'espèce i	λ_i	$S.m^2.mol^{-1}$
Nombre d'électrons	$Z(e^-)$	adimensionnel

Introduction

L'atome d'hydrogène est hors du commun. Les scientifiques ont longtemps été fascinés par ses propriétés particulières, notamment par le dihydrogène, gaz parfait qu'il forme lorsque ses atomes s'apparient.

Pourtant, sa découverte au début du 16^{ème} siècle par l'alchimiste suisse PARACELSE ne révolutionne pas son époque. Il faut attendre le 18^{ème} siècle pour que l'utilisation concrète de ce gaz dévoile un potentiel énergétique jusqu'alors inégalé. Ce serait LAVOISIER, en 1783, qui serait à l'origine de l'appellation « hydrogène » en raison de sa capacité à générer la molécule d'eau [2]. Vecteur de propulsion aérienne, il permet aux frères MONTGOLFIER de s'envoler, puis sera plus tard utilisé pour les missions spatiales pour alimenter des moteurs-fusées ou, par exemple, les trois piles à combustible du module de service de la mission Apollo 13.

Cependant, la tragédie de l'explosion du dirigeable Hindenburg en 1937 effraie l'opinion publique: l'atome d'hydrogène est très volatile, sa position dans la classification de MENDELEÏEV en témoigne. De ce fait, il s'enflamme très facilement au contact de l'atmosphère. Il est donc difficilement stockable à cause de fuites possibles, surtout que son volume nécessite de le stocker sous pression. De plus, cet « air inflammable » est à la fois incolore et inodore, ce qui accentue davantage la réticence des gouvernements à l'utiliser à l'époque.

Aujourd'hui, dans le contexte de l'épuisement des ressources fossiles et de la recherche de production d'énergie verte, l'hydrogène retrouve une place importante. Il est principalement produit par vaporeformage du méthane (49% de la production mondiale de dihydrogène en 2015 [3]), mais aussi grâce à l'oxydation partielle du pétrole et à la gazéification. L'électrolyse de l'eau ne représente que 4% de la production mondiale d'hydrogène en 2015, pourtant, ce procédé est de loin le plus abordable, le plus accessible et le plus écologique. La France en particulier s'est emparée de cette technologie et a signé en 2019 un accord avec le Canada pour assembler à Bordeaux des piles à combustibles géantes de plus de 1 Mégawatt afin de stocker l'électricité renouvelable [4].

Dans ce contexte de crise écologique, trouver des solutions durables et respectueuses de l'environnement est le nouvel enjeu de l'ingénierie. Ce projet de physique semestriel nous sensibilise par rapport à la production d'un combustible performant et propre à partir d'hydrogène. Ainsi le coeur de notre étude repose sur l'élaboration d'une flamme hydrogène. Cette flamme est obtenue à partir d'un banc à hydrogène. Ce rapport illustre donc l'élaboration théorique d'un banc à hydrogène alimenté par électrolyse. Une étude bibliographique ainsi que des calculs appuient nos choix de réalisation.

Ce rapport s'ouvrira sur l'étude spécifique de trois procédés à l'origine de la production d'hydrogène: le reformage, la gazéification ainsi que l'électrolyse. Une seconde partie sera consacrée à la conception de notre banc à hydrogène ainsi qu'aux calculs théoriques associés. Nous analyserons ces résultats et feront une analyse critique de leur signification.

Organisation du travail

Le travail a été réparti équitablement entre les élèves. L'étude bibliographique de la première partie a été traitée en binôme, et chaque groupe travaillait sur une sous partie. Pour la conception et l'étude du banc, le groupe entier a imaginé celui-ci et les éventuels problèmes. Des groupes d'étudiants se sont spécialisés dans les calculs, les schémas et le devis du banc. Cependant, un bilan hebdomadaire et une mise en commun des résultats ont permis de faire émerger des nouvelles idées et de vérifier celles proposées. La totalité de ce travail régulier a été centralisé sur un cloud. Enfin une relecture individuelle et globale a été apportée par chaque étudiant.

I. Différents procédés de production de dihydrogène

I.1.Reformage

Le reformage consiste à casser les molécules d'hydrocarbures grâce à la chaleur pour en libérer le dihydrogène. Aujourd'hui, nous pouvons résumer le reformage en trois grandes méthodes, le vaporeformage, l'oxydation partielle et le reformage autothermique [5] [8].

I.1.i.Vaporeformage ou le reformage à la vapeur

C'est le procédé industriel le plus courant (car le plus économique) pour la production d'hydrogène. Cette technique se base sur la réaction catalytique faite avec la vapeur d'eau. Elle transforme les hydrocarbures en des gaz de synthèse riches en H_2 , un mélange de H_2O, CO_2, H_2, CO et d'hydrocarbures. La réaction générale de vaporeformage, une fois la charge désulfurée est la suivante :



Cette réaction est suivie de réactions secondaires formant du CH_4 , du CO_2 , du C (qui ne sont pas mentionnées ici). La réaction principale est endothermique et a besoin d'un apport de chaleur externe. Elle peut s'effectuer ou non avec un catalyseur, mais son utilisation permet de réduire les températures et d'augmenter la cinétique des réactions. De plus, sa faible température de fonctionnement se trouvant entre 700 et 1 100 °C est avantageuse par rapport aux autres procédés.

On estime à 1,5 €/kg, (manière la plus économique de produire de l'hydrogène), mais cela reste trois fois plus cher que du gaz naturel hors taxe carbone. Ce procédé est destiné à disparaître dans le futur pour cause de pollution carbonée, pour chaque kg d'hydrogène produit, 10kg de CO_2 sont dégagés.

I.1.ii. Oxydation partielle

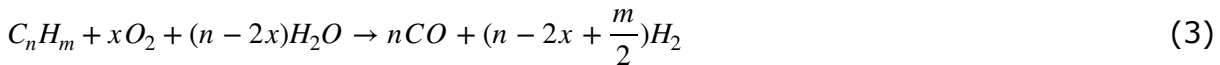
Cette technique transforme par combustion un mélange d'hydrocarbures et d'air en gaz de synthèse riches en H_2 . Mais elle doit être opérée en défaut d'oxygène (sous-stoechiométrique) par rapport à la stœchiométrie de la réaction pour ne pas induire une combustion complète.



Par ailleurs, dans une dernière étape, à température très élevée, des réactions secondaires se produisent comme l'hydrocraquage (et bien d'autres mais non mentionnées ici). La réaction principale est exothermique, et la plupart du temps se fait sans catalyseur. Sa température de fonctionnement se trouve quant à elle entre 1 200 et 1 500°C couplée à une pression entre 20 et 90 bars. Elle a pour avantages de minimiser l'émission de méthane et d'être plus résistante au soufre que les autres procédés.

I.1.iii.Reformage autotherme (ATR):

Cette technique est le résultat subtil de la combinaison des deux procédés cités ci-dessus dans un même réacteur, elle fournit de la chaleur grâce à l'oxydation partielle à l'oxygène pur et accroît la production d'hydrogène avec une zone catalytique de vaporeformage.



Celle-ci fait donc preuve d'une neutralité thermique et se produit à une pression moindre que l'oxydation partielle. Toutefois avec la chaleur apportée, pour garder une température élevée, il faut qu'il y ait un taux suffisant d'oxygène pour permettre son maintien. De ce fait il faut donc apporter de l'oxygène pur, deux possibilités pour cela, soit en acheter directement (très coûteux) soit l'extraire de l'air (ce qui n'est pas possible pour le moment). De plus, ce procédé s'effectue avec un catalyseur, de sorte qu'il contrôle les mécanismes réactionnels et est très important dans l'équilibre entre les réactions (vu précédemment). Sa température de fonctionnement se trouve entre 900 et 1 100°C couplée à une pression entre 20 et 60 bars.

Ainsi, nous nous sommes concentrés uniquement sur les réactions principales des méthodes de reformage abordées. D'autres étapes comme la purification ou bien la décarbonation sont toutefois indispensables à ces procédés.

Il existe bien d'autres types de reformage, que ce soit le reformage du plasma, le reformage catalytique, ou le reformage redox du méthane ou bien encore le reformage à sec du méthane.

Hydrogène Production et consommation dans le monde

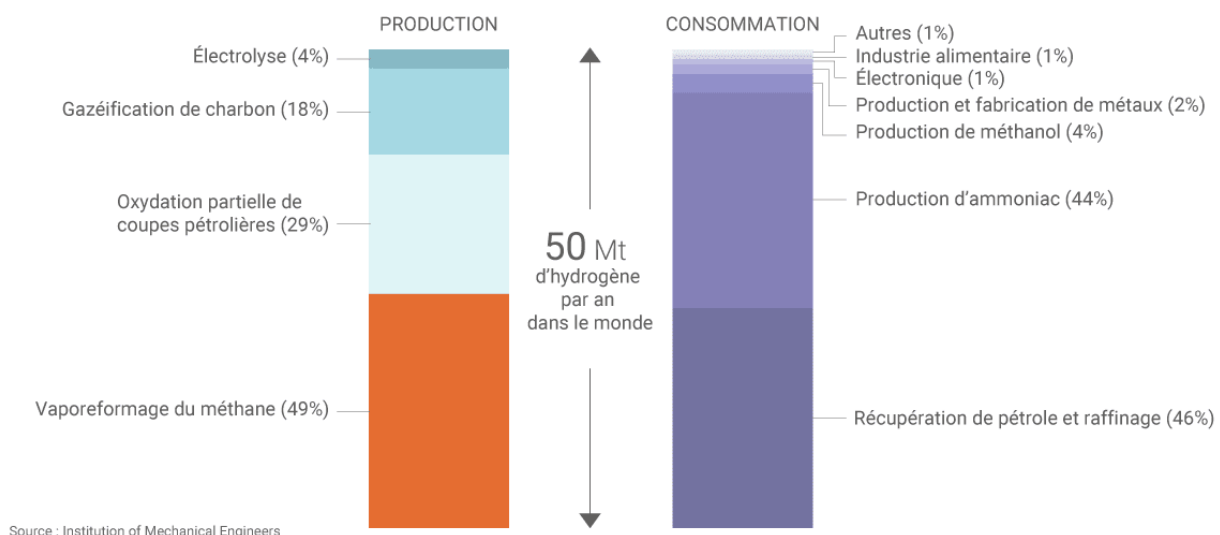


FIGURE 1: PRODUCTION ET CONSOMMATION DE L'HYDROGÈNE DANS LE MONDE

I.2. Gazéification

D'après le site internet *Connaissances des énergies* [12], la gazéification de l'hydrogène permet de décomposer par la chaleur un solide combustible carboné en présence d'un réactif gazeux. Le résultat donne un mélange gazeux combustible appelé gaz de synthèse (ou syngas), principalement constitué de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène à hauteur de 20%.

Le combustible peut être de nature variée : les hydrocarbures, légers ou lourds, sont autant utilisés que le coke de pétrole, le charbon ou encore la biomasse.

I.2.i.Processus

A.Étapes

La figure [33] en annexe A résume le déroulé du mécanisme.

Dans la première étape, on introduit de la biomasse humide dans le réacteur. Il se passe alors l'étape de séchage qui s'effectue entre $100^{\circ}C$ et $160^{\circ}C$ avec évaporation de H_2O . Le tri ou le broyage de la masse sèche est parfois nécessaire pour obtenir un produit homogène.

La seconde étape consiste en une pyrolyse, il s'agit d'une étape anaérobie, privée d'air où de la matière carbonée, la plupart du temps du charbon de bois, est brûlée dans un réacteur à haute température entre 120 et $600^{\circ}C$.

Cette pyrolyse aboutit à la formation de coke qui est un résidu de carbone pur, de gaz de pyrolyse qui est un mélange de gaz oxydants : oxyde de carbone et hydrocarbures. De plus, il se forme des goudrons et des matières volatiles condensables qui proviennent de matière organique tel que les acides acétiques ou les aldéhydes.

Les gaz libérés se reforment pour donner du H_2 et du monoxyde de carbone CO .

Au cours de cette 3ème étape, il y a une oxydation du gaz de pyrolyse permise par un fort apport d'oxygène à une température entre 1200 et $1500^{\circ}C$. Cette étape étant exothermique, elle permet un fort dégagement de chaleur qui est utile aux étapes 1, 2 et 4. On remarque ainsi un processus cyclique en autorégulation qui présente ainsi de nets avantages.

Enfin, l'ultime étape est celle de la réduction partielle où il y a une gazéification du carbone pour produire du syngas. Cette étape anaérobie s'effectue entre 800 et $1200^{\circ}C$. Le coke réduit ainsi la vapeur d'eau en hydrogène et le gaz carbonique en oxyde de carbone

On peut donc envisager à l'issue de ces différentes phases, une ultime étape qui serait celle de l'épuration où les gaz obtenus pourraient être filtrés, nettoyés, refroidis pour enlever toutes traces de cendres volantes et de particules de suie.

B. Les différents procédés

On distingue deux procédés pour mener à bien la gazéification : celui à lit fixe et celui à lit fluidisé.

Deux principaux types de réacteurs sont utilisés pour le procédé à lit fixe, dont le réacteur "concourant" [34] et celui "à contre-courant" [35].

Dans le réacteur 'concourant', le combustible est introduit au sommet et rencontre le fluide (souvent de l'oxygène), qui est injecté à mi-hauteur. Le fluide va donc naturellement diriger la combustion vers le bas, d'où le nom de concourant.

A l'inverse, le fluide du processus à "contre-courant" est injecté à la base du réacteur et remonte dans celui-ci. De ce fait, le goudron qui résulte de la pyrolyse aura moins tendance à s'échapper du réacteur car il est moins volatile que le gaz de synthèse. Par conséquent, les conduits acheminant le syngas vers l'extérieur seront moins encrassés.

Le procédé à lit fluidisé utilise également deux réacteurs distincts :

Dans le réacteur à lit fluidisé statique [36], toutes les étapes ont lieu dans une seule et même zone. L'injection d'air à la base du réacteur soulève les grains de biomasse qui sont alors en suspension, favorisant les échanges thermiques et massiques entre le solide et le gaz.

Enfin, dans le réacteur à lit entraîné [37], le solide combustible carboné est finement pulvérisé dans un jet d'oxygène. Ainsi, peu de goudrons et de méthane sont produits à cause des très hautes températures et pressions. En revanche, il est à noter que cela requiert beaucoup d'oxygène.

I.2.ii. Avantages et inconvénients de la Gazéification

L'un des inconvénients de la gazéification est qu'elle nécessite souvent de stocker le gaz, augmentant le risque d'explosion en cas de mauvaise étanchéité des réservoirs. Le transport de ce dernier mobilise un surcoût de carburant et le travail de salariés. De plus, les centrales coûteuses à construire et la maintenance des réacteurs en font une option bien moins intéressante que l'électrolyse qui se révèle être plus économique.

Cependant, il est cohérent de considérer la gazéification comme procédé d'avenir en raison des nombreux avantages qu'elle apporte :

En effet, un kilogramme de biomasse permet de produire entre 1 et 1,3 kWh d'énergie électrique et entre 1,7 à 2,5 kWh d'énergie thermique.

Le bilan carbone de la transformation est moindre : seul le CO_2 emmagasiné par la biomasse pendant la photosynthèse est rejeté pendant la gazéification. D'autre part, elle permet la revalorisation des résidus pétroliers comme le coke de pétrole qui peut être utilisé comme combustible.

Dans un souci écologique et afin de réduire l'empreinte carbone due au transport terrestre ou maritime du gaz, le Club Pyrogazéification a été créé en 2014 [13]. Cette association, qui compte Engie et GRT Gaz parmi ses membres, prévoit d'injecter directement un gaz vert 100% local dans les réseaux gaziers à l'horizon de 2050, permettant aussi d'éviter l'étape délicate du stockage.

D'après une étude de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), la production potentielle de biométhane par pyrogazéification représente entre 64 et 150 TWh, l'équivalent d'un tiers du mix gazier national [14].

I.2.iii. Evolution du rapport des sociétés vis à vis de la gazéification

L'intérêt que porte la France à la gazéification ne cesse de croître. Si certaines usines brûlent de la biomasse végétale comme le démonstrateur Bonnefoy à Villers-sous-Montrond qui utilise la gazéification alimentée en bois B et plaquettes pour produire de l'électricité, d'autres se tournent vers le recyclage du caoutchouc comme le pilote Alpha-Recyclage à Brévan qui pratique la pyrolyse de pneus depuis sa mise en service en 2017.

Par ailleurs, l'ADEME, le CEA et GDF Suez collaborent sur le projet GAYA [15], dans le but de produire de l'électricité par biofuel.

Mais ce sont surtout les pays développés qui maîtrisent cette technologie: outre l'Europe, ce sont les Etats-Unis, l'Afrique du Sud, la Chine et le Japon qui concentrent les installations et le marché potentiel lié à la gazéification. Cependant, il est intéressant de noter que les pays tropicaux émergent rapidement dans le secteur et pourraient rapidement se faire une place sur le marché.

I.3. Electrolyse de l'eau

I.3.i. Principe

Principe général

L'électrolyse est un procédé qui décompose chimiquement certaines substances sous l'effet d'un courant électrique. Elle convertit donc l'énergie électrique en énergie chimique. Cette méthode permet la synthèse ou la séparation de certains composés chimiques. La production d'hydrogène, de chlore ou d'aluminium utilise le principe d'électrolyse.

De manière générale, l'opération se réalise selon le montage suivant: deux électrodes en métal conducteur (ex: graphite, platine...) sont plongées dans une solution conductrice appelée électrolyte. Cette dernière peut être soit une solution aqueuse acide ou basique, soit une membrane en céramique conductrice d'ions.

Ces deux électrodes sont reliées chacune à une borne d'un générateur de courant continu. L'électrode appelée anode est reliée à la borne positive du générateur et possède le potentiel électrique le plus élevé. La cathode quant à elle est reliée à la borne négative et possède un potentiel électrique inférieur.

Ces deux électrodes sont le siège de deux réactions chimiques différentes, une réduction et une oxydation. Elles mettent en jeu le couple appelé oxydant-réducteur, ainsi qu'un transfert d'électrons. On obtient les réactions chimiques suivantes :

- ▶ Au niveau de l'anode se fait l'oxydation : $\text{Réd}_2 = \text{Ox}_2 + n_2 e^-$
- ▶ Au niveau de la cathode se fait la réduction : $\text{Ox}_1 + n_1 e^- = \text{Réd}_1$

L'anode génère des électrons qui sont attirés jusqu'à la cathode. Les cations, ions de charge positive, migrent vers la cathode tandis que les anions de charge négative migrent vers l'anode. L'ensemble du montage est appelé cellule d'électrolyse [18].

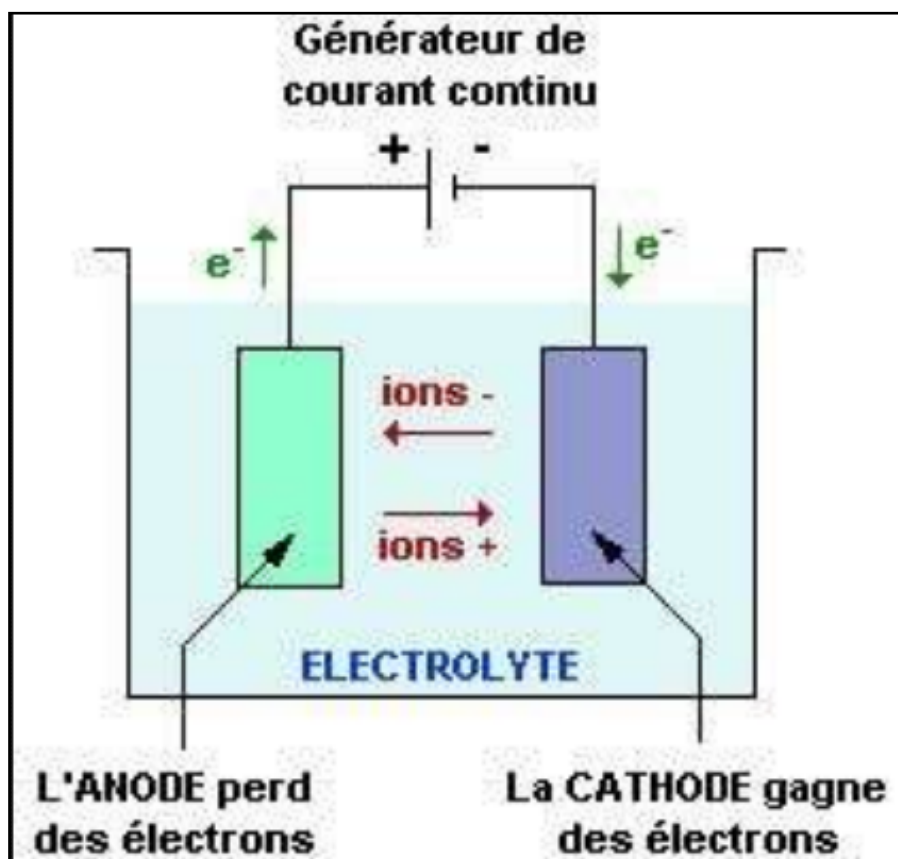


FIGURE 2: CELLULE D'ÉLECTROLYSE

Principe de l'électrolyse de l'eau

Nous nous intéressons en particulier à l'électrolyse de l'eau car elle permet de produire du dihydrogène. Dans l'eau, les couples oxydant/réducteur qui existent sont : H^+/H_2 et H_2O/O_2

Le courant électrique permet la dissociation des molécules d'eau en ions HO^- et H^+ .

- ▶ Les ions H^+ se dirigent vers la cathode où la réaction suivante a lieu :



On observe l'apparition de bulles de gaz au niveau de cette électrode qui est reliée à la borne négative de la source de courant. Lorsqu'on approche une flamme du gaz une petite explosion se produit. Ce test de flamme permet de déduire que le gaz formé est du H_2

- ▶ Au niveau de l'anode la réaction suivante se produit:



L'oxygène est alors formé. En effet, si on approche une allumette incandescente des bulles de ce gaz et que la flamme se rallume cela signifie que du O_2 a été formé.

Le bilan de la réaction d'oxydo-réduction est:



Toutefois, la décomposition de l'eau en dihydrogène et dioxygène dans les conditions normales de température et de pression n'est pas favorisée thermodynamiquement. On ajoute alors un électrolyte, une substance qui facilite la conduction grâce aux ions mobiles. Les électrolytes utilisés sont souvent des acides, des bases ou encore des sels. On utilise souvent du lithium, ou sodium ou l'anion SO_4^{2-} .

I.3.ii. Différentes méthodes d'électrolyse de l'eau

Electrolyse alcaline

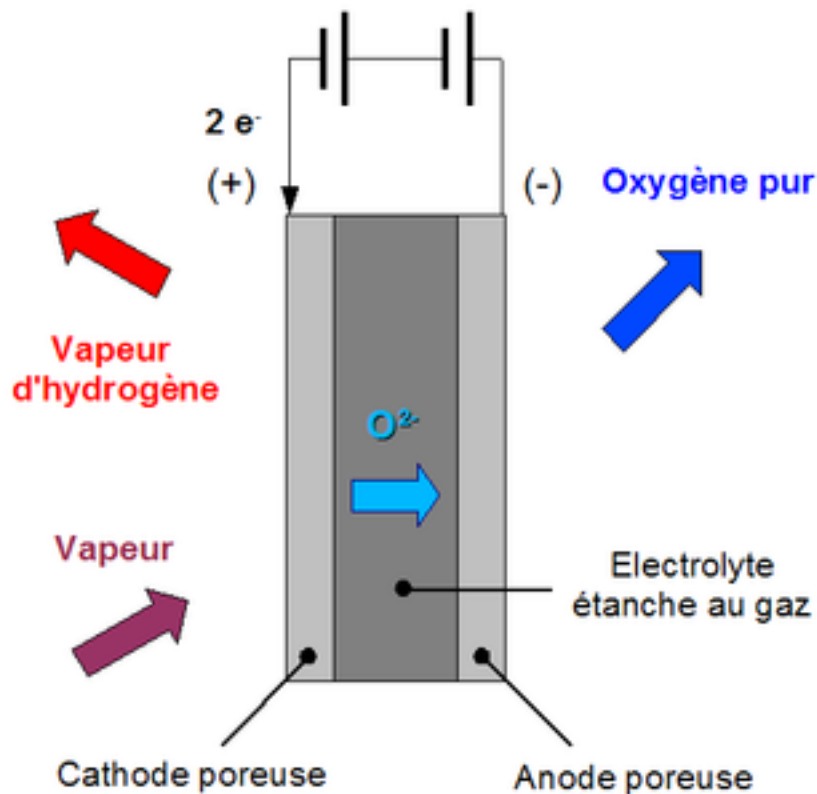
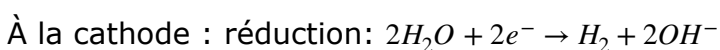
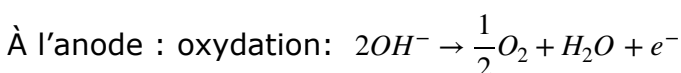


FIGURE 3: SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'ÉLECTROLYSE DE L'ALCALINE

C'est le processus le plus utilisé dans l'industrie. Les électrodes sont plongées dans une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium: c'est un électrolyte bon conducteur et qui permet un meilleur contrôle des impuretés. Les deux électrodes sont séparées par un diaphragme qui a pour fonction de séparer les gaz produits, c'est à dire le dihydrogène et le dioxygène (figure 3). Le principe est le même qu'énoncé précédemment; la réaction chimique est déclenchée par l'activation d'un courant électrique. On retrouve les équations de dissociation suivante:



Bien que cette technologie soit mature, le principal inconvénient semble être le volume imposant de la structure à cause de l'électrolyte liquide et des systèmes de purification de l'eau.

Électrolyse à haute température

L'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EHT) permet de substituer une partie de l'énergie électrique en énergie thermique pour dissocier la molécule d'eau. La température de la réaction conditionne la quantité d'électricité à fournir. Plus la quantité de chaleur fournie augmente, plus la quantité d'énergie électrique à fournir diminue. Cela permet un meilleur rendement par rapport aux autres technologies.

Principe: Elle se réalise à une température entre 700-900°C. La chaleur peut être fournie par énergie solaire en utilisant des cellules photovoltaïques. Elle peut être aussi fournie par une centrale nucléaire. L'énergie thermique est ainsi convertie en énergie chimique grâce à l'électrolyse de l'eau.

Un avantage de cette technique à haute température est que la réaction ne nécessite pas de catalyseur. De plus, la dissociation de l'eau se réalise avec un meilleur rendement énergétique que l'électrolyse à basse température. Par ailleurs le système est compact, fonctionne à hautes pressions et est moins coûteux.

Cette méthode rencontre un inconvénient majeur: l'électrolyse est toujours au stade de recherche en laboratoire. Cependant les résultats sont prometteurs et laissent entrevoir la possibilité de l'appliquer à l'industrie. Une autre problématique est celle de la durabilité de matériaux utilisés, qui s'usent vite face aux conditions de température et de pression.

Électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEM)

Le principe de l'électrolyse PEM diffère de celui de l'électrolyse alcaline par le fait que l'électrolyte est un électrolyte solide, composé d'une membrane conductrice de protons; les électrodes sont déposées de part et d'autre de ce matériau polymère (figure 4).

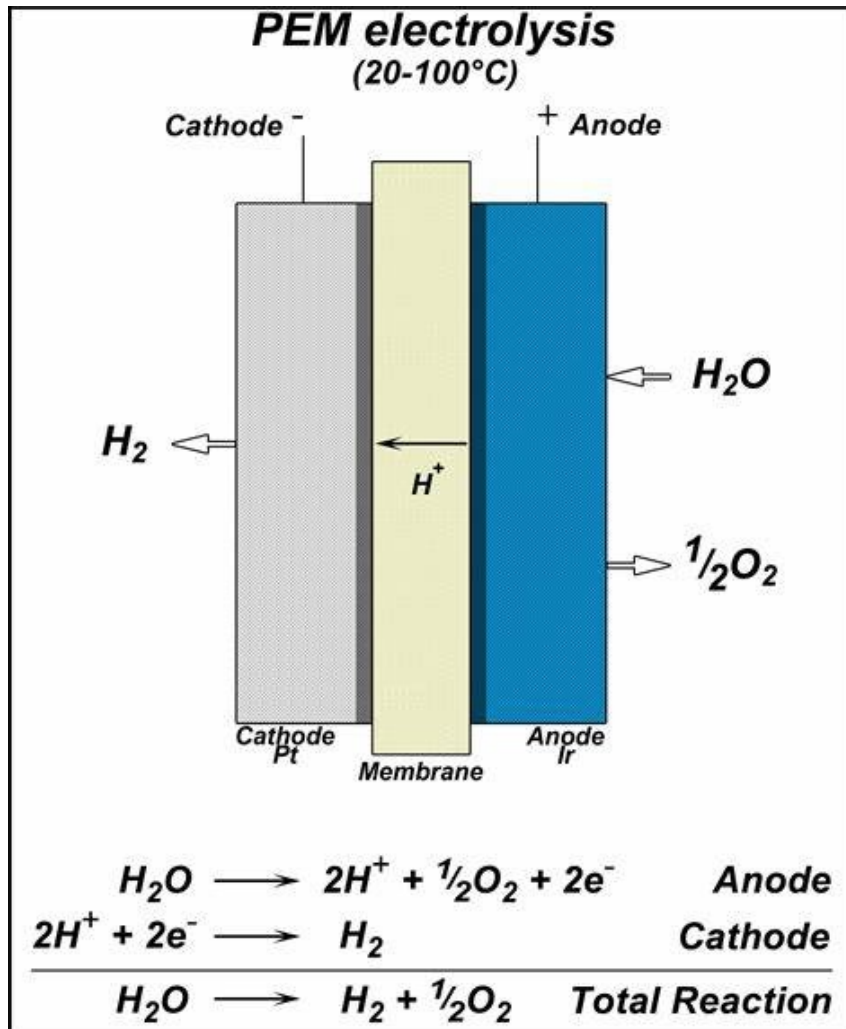


FIGURE 4:ÉLECTROLYSE PEM

On retrouve le principe d'électrolyse: les molécules d'eau sont oxydées en oxygène et en protons, puis des électrons sont libérés dans un circuit conducteur extérieur. Les protons (ions H^+) passent par une membrane conductrice et avec l'aide des électrons du circuit, ils forment du dihydrogène au niveau de la cathode. On reconnaît ainsi l'équation (B) à l'anode et l'équation (A) à la cathode.

Les avantages de cette méthode sont la compacité du système (électrolyte solide), la simplicité à fabriquer la cellule à électrolyse, et les très bonnes performances grâce à la conduction des protons. En revanche, le coût d'une telle technologie est plus onéreux à cause des électro-catalyseurs à base de métaux nobles et du coût de la membrane. Cette technologie est déjà utilisée depuis quelques temps pour des activités sous-marines (usines à oxygène dans des sous-marins nucléaires) et dans le domaine spatial.

Dans le but de synthétiser de l'hydrogène, nous avons décidé de reprendre le principe de l'électrolyse de l'eau. En effet cela nous semble être le processus le moins coûteux, le plus propre et le plus simple à réaliser, mais aussi le moins dangereux car des conditions normales de température et de pression sont nécessaires.

II. Etude de la conception d'un banc à hydrogène

Pour synthétiser de l'hydrogène nous avons mis au point une cellule d'électrolyse. En effet, cette méthode nous permet de travailler à température ambiante et à pression atmosphérique. De plus le matériel nécessaire à la construction d'une cellule d'électrolyse est très peu onéreux (cf: devis du banc annexe D).

II.1. Proposition d'un banc à hydrogène

II.1.i. Principe et fonctionnement de notre banc

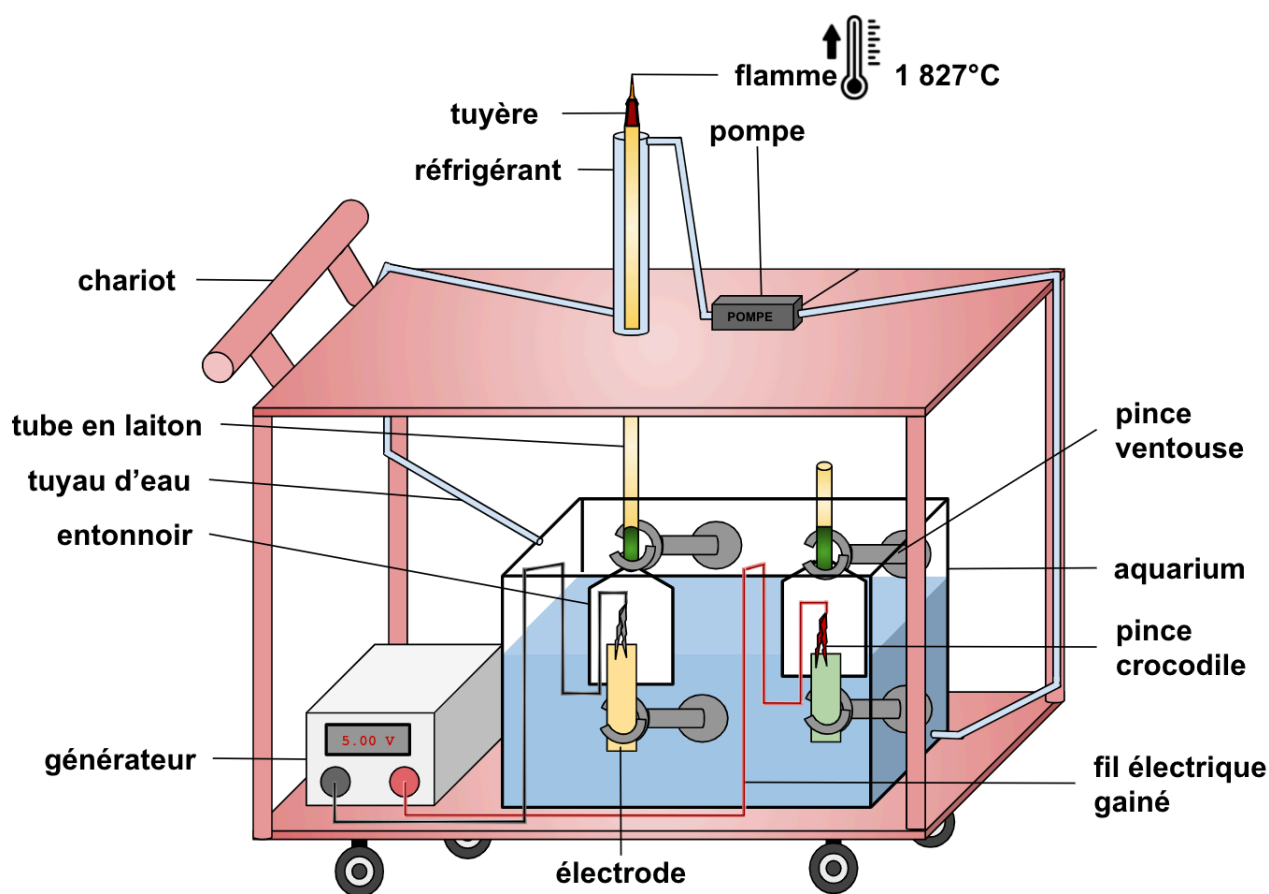


FIGURE 5: NOTRE BANC À HYDROGÈNE

Pour créer notre banc nous avons utilisé un chariot afin que le transport du montage soit aisé et que celui-ci ne soit pas trop encombrant (voir figure 5). Afin de stocker l'eau nécessaire à l'électrolyse, nous avons pris un aquarium de volume 17,5L. On plonge dans l'aquarium deux électrodes de graphite reliées au générateur de courant par des fils électriques étanches. Les électrodes sont attachées à la paroi par des pinces ventouses. Le graphite est idéal car il est insoluble dans l'eau, ne réagit pas avec l'électrolyte choisie et est bon conducteur.

Afin de capturer l'hydrogène produit au-dessus de la cathode et l'oxygène au niveau de l'anode on place au-dessus des deux électrodes des entonnoirs retournés. Ceux-ci sont maintenus par des pinces ventouses collées à la paroi de l'aquarium. L'entonnoir au-dessus de la cathode est relié à un tube en laiton lui-même attaché à une tuyère afin de produire une flamme d'hydrogène. Le brûleur (ensemble tube en laiton et

tuyère) se trouve sur la partie supérieure du chariot. Nous avons l'intention de perforer l'étage du chariot afin de faire passer le tube en laiton.

Le générateur délivre un courant continu d'intensité et tension constante. Le passage de ce courant dans la cellule d'électrolyse permet d'initier le processus d'électrolyse. En effet, un circuit électrique se met en place dans lequel les anions vont de l'anode vers la cathode, les cations vers la cathode.

Grâce aux mouvements des électrons et des ions, les réactions d'oxydation et de réduction peuvent être réalisées. Des bulles de dihydrogène apparaissent à la surface de l'eau au niveau de la cathode. Le gaz est contenu dans l'entonnoir retourné au-dessus de l'électrode. Le dihydrogène est ensuite acheminé par le tube en laiton puis est conduit jusqu'à une tuyère où il va être brûlé afin de créer une flamme. Le dioxygène à l'autre électrode quant à lui est simplement libéré dans l'air car il ne présente aucun danger.

Nous supposons que le dihydrogène commence à brûler une fois que le volume, constitué de celui de l'entonnoir et du tube de laiton, est entièrement rempli (On estime qu'il faudra purger au moins une fois l'ensemble du système pour obtenir seulement du dihydrogène à la sortie de la tuyère). Une fois le volume rempli, on considère l'équilibre établi lorsque la flamme est laminaire: le dihydrogène s'écoule en régime permanent avec un débit constant (car la quantité de dihydrogène produite est la même que celle qui est brûlée). Une flamme est laminaire lorsque son nombre de Reynolds est inférieur à 2000. Cette hypothèse de régime permanent nous a permis par la suite de déterminer l'intensité nécessaire au générateur.

Nous avons décidé pour des raisons de sécurité de ne pas stocker l'hydrogène et d'ensuite le brûler mais de produire et brûler simultanément. En effet le stockage d'une trop grosse quantité d'hydrogène pourrait lors d'un contact avec une source chaude conduire à une explosion.

Influence de la température

L'hydrogène brûle en dégageant une très grande quantité de chaleur. En effet la température de combustion de l'hydrogène est aux alentours de 1800°C (cf II-2-i). C'est pourquoi il est indispensable de trouver un métal qui ne fonde pas à ces températures. Nous avons choisi le laiton car il est assez résistant aux hautes températures, facile d'accès et peu onéreux. La température de fusion du laiton est de 900°C, et on considère que la flamme sera de courte durée et ne pourra chauffer suffisamment pour que le laiton entre en fusion. Cependant, afin de ne pas détériorer notre matériel, nous avons pensé utiliser un système de refroidissement afin de ne pas faire fondre le laiton dans le cas où la flamme serait entretenue plus longtemps. Pour cela, nous utilisons un récipient circulaire posé sur la partie supérieure du chariot dans lequel le tube en laiton est plongé. L'eau froide est puisée dans l'aquarium. Une pompe permet de faire circuler le liquide de refroidissement. Ainsi l'eau chauffée grâce au contact du tube en laiton est rejetée dans l'aquarium.

Ce circuit d'eau fermé est d'autant plus avantageux que l'augmentation de la température de l'eau est un catalyseur pour la réaction d'électrolyse. Une étude de l'université de Carthagène [31], a démontré que l'augmentation de la température du bain à électrolyse favorise la production de dihydrogène. En effet, une température élevée diminue le potentiel requis pour la rupture de la molécule d'eau. Par ailleurs, l'augmentation de la température facilite les collisions moléculaires entre les ions de l'électrolyte et permet ainsi de favoriser la réaction. Nous avons le même constat

d'après nos calculs (voir annexe B): on observe que le volume de H_2 produit évolue linéairement en fonction de la température.

Il est possible que lors de la combustion, un retour de flamme ait lieu. Ce retour de flamme est tout simplement une descente de la flamme dans la tuyère et le tube. Afin de prévenir ce risque, nous avons placé à proximité de la sortie du tube une pelote de fibre de laiton. Ce dispositif bloquera la flamme et brûlera seulement la pelote.

Jonctions des éléments du banc

L'hydrogène est un gaz extrêmement volatile, il est donc nécessaire pour obtenir un rendement optimal de veiller à ce que les jonctions entre les différents éléments de notre montage soient parfaitement hermétiques. Afin d'étanchéifier la liaison entre l'entonnoir et le tube en laiton, nous avons décidé d'utiliser de la colle étanche. Cependant cette colle ne peut pas être utilisée pour la liaison entre le tube en laiton et le brûleur car sa température de service maximum est de 100°C . On décide donc de souder le tube et le brûleur ensemble.

Choix de l'électrolyte

Afin d'améliorer la circulation des ions dans l'eau nous avons ajouté du sulfate de sodium de composition ionique $2Na^+ + SO_4^{2-}$. Ce choix d'électrolyte nous paraît idéal car il n'y a pas de dégagement gazeux dangereux lors de la réaction avec l'eau, contrairement avec celle entre la soude et l'eau. Par ailleurs, c'est un électrolyte efficace s'il a une bonne conductivité ionique. En effet, une bonne conductivité ionique entraîne une augmentation des échanges d'électrons dans l'électrolyte au niveau des électrodes: la réaction d'électrolyse produit plus et le rendement de H_2 est donc meilleur.

D'après les résultats des calculs (annexe C), on obtient une conductivité ionique de $0,1802 \text{ S.m}^{-1}$. Cela paraît suffisant en comparant avec celle de l'eau distillée qui est de $5,5.10^{-6} \text{ S.m}^{-1}$ et de l'eau potable de $0,05 \text{ S.m}^{-1}$ qui ne sont pas conductrices. Cependant les concentrations peuvent être modifiées (en augmentant la masse de sulfate de sodium introduite dans l'eau) lors de l'expérience afin d'améliorer la conductivité ionique et ainsi d'optimiser le rendement de H_2 .

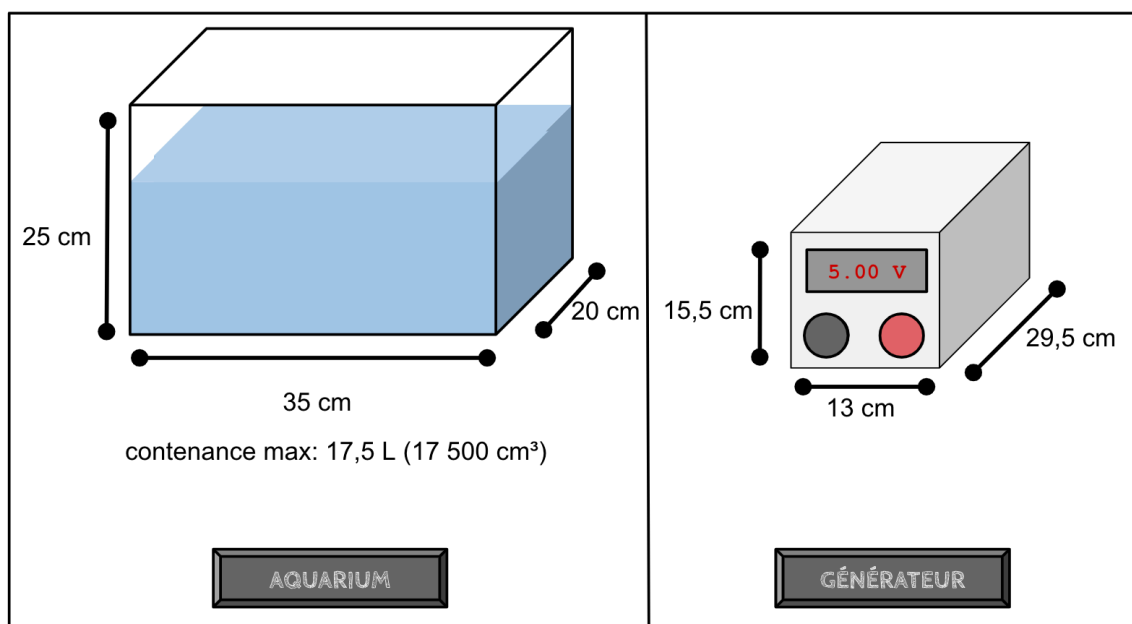
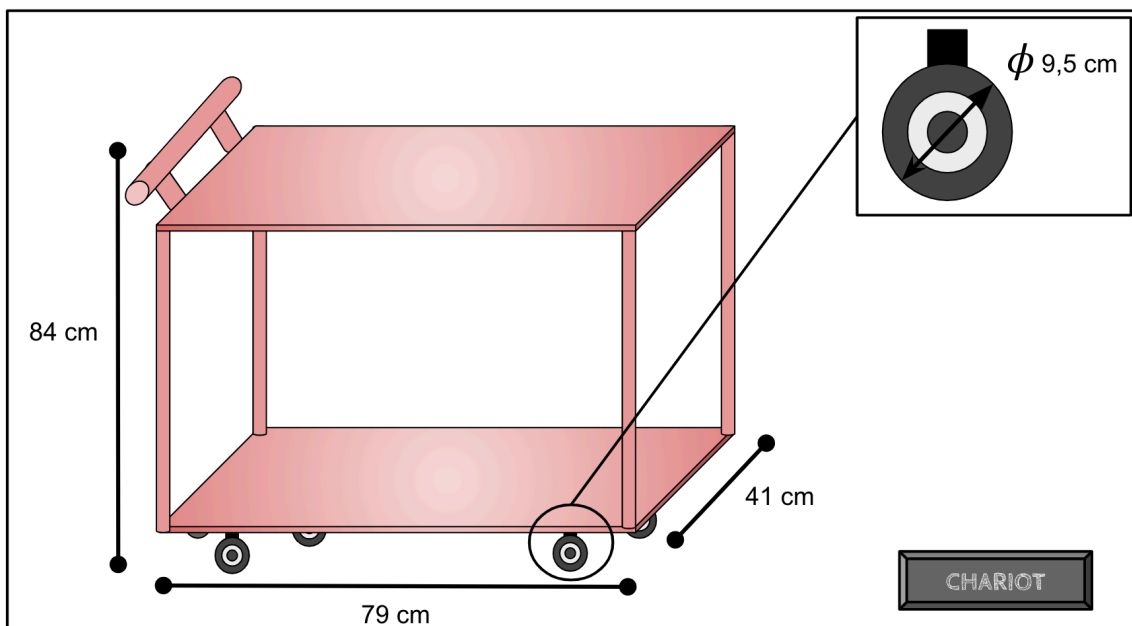
Etanchéité des fils électriques

Pour relier les électrodes au générateur de courant, nous avons dû trouver une solution pour éviter d'endommager les fils avec la solution aqueuse de sulfate de sodium (et pour éviter que l'eau ne rentre en contact avec le circuit électrique). L'option envisagée est de faire passer les fils électriques à l'intérieur de la gaine. Ainsi, seule cette dernière est en contact avec l'eau et préserve les fils électriques de l'eau. On évite un court-circuit. On place ensuite les pinces crocodiles au niveau des extrémités des fils électriques et les relie au niveau des électrodes émergées. Cette technique a pour intérêt d'être peu onéreuse et assure un bon fonctionnement du circuit.

II.1.ii.Devis, dimensionnement et matériaux

Afin de trouver le matériel nécessaire, nous avons cherché sur différents sites internet en prenant en compte le dimensionnement et la matière du matériel. Le prix du matériel n'a pas été un critère de sélection, l'objectif était de trouver tout le matériel nécessaire en dépit du prix élevé de certains. Cependant nous avons respecté un montant général inférieur à 1000€. Le prix total du banc est de 734€. Il est important de noter que le prix total n'est pas fixe, il est tout à fait possible de trouver les différents éléments qui composent ce banc à des prix moins élevés ou de recycler ce que l'on a déjà chez soi. Par ailleurs, le prix du matériel peut être amené à fluctuer au cours du temps, il est donc possible que le prix de ce banc en Mai-Juin 2020 ne soit pas le même que celui de Mai-Juin 2021 (Annexe D).

Les figures suivantes illustrent tout le matériel et les dimensions requis à la réalisation du banc à hydrogène.



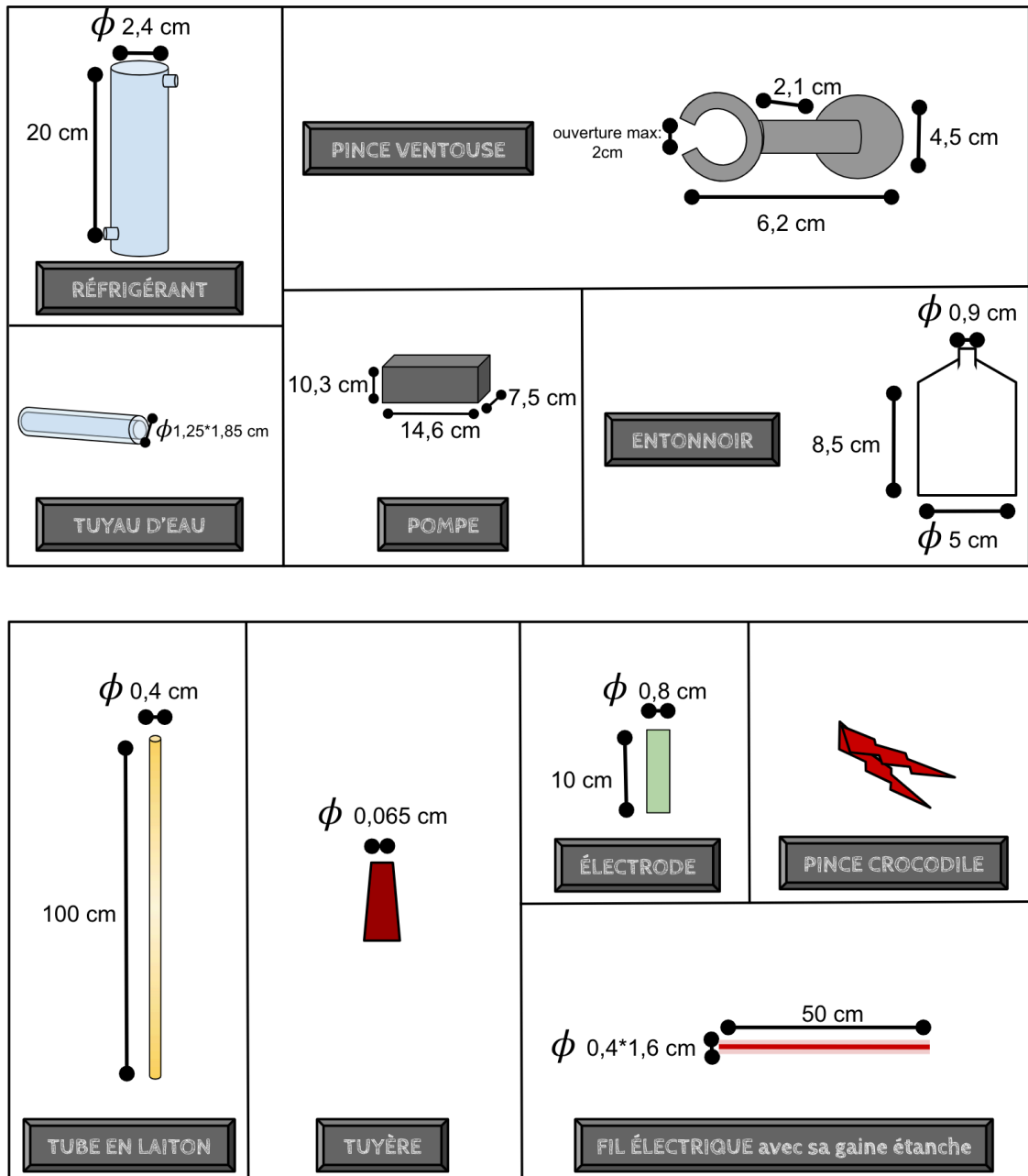


FIGURE 6: DIMENSIONNEMENT DU BANC

II.2.Calculs théoriques

II.2.i.Calcul de la température au brûleur

On souhaite connaître la température au brûleur afin de choisir le matériau adéquat. La réaction au brûleur est une réaction de combustion. On l'établit de la façon suivante :



D'après la loi de Hess, à 298K, on a :

$$\Delta_c H^\circ(298K) = \sum v_i \Delta_f H^\circ(B_i, \text{etat}, 298K) \quad (5)$$

$$\Delta_c H^\circ(298K) = 2\Delta_f H^\circ(H_2O, g, 298K) - 2\Delta_f H^\circ(H_2, g, 298K) - 2\Delta_f H^\circ(O_2, g, 298K) \quad (6)$$

$$\Delta_c H^\circ(298K) = 483,6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

(D'après les tables de thermochimie des enthalpies standard de formation)

Nous avons un résultat négatif avec un avancement positif, par conséquent, nous avons une réaction exothermique avec un sens direct.

Pour trouver la température finale au brûleur, il est nécessaire d'avoir deux hypothèses de calcul, à savoir, une réaction adiabatique car très rapide et des réactifs en quantité stoechiométrique.

On établit le tableau d'avancement suivant :

2H ₂ (g) + O ₂ (g) → 2H ₂ O (g)			diazote
2no	no		4no
2(no-ξ)	no-ξ	2no	4no

On sait que l'air possède 80% de diazote et 20% de dioxygène. Ainsi nous avons quatre fois plus de diazote que de dioxygène. Le diazote est ici un gaz inerte mais important pour le calcul de variation de l'enthalpie du système.

D'autre part, on établit le schéma (voir ci-dessous) qui permet d'obtenir la température par trois étapes intermédiaires :

La première est une réaction monotherme et monobare tandis que la deuxième étape est seulement une réaction monotherme mais avec un changement d'état pour l'eau (vaporisation). Enfin, la dernière étape est une réaction non monotherme où la température du système est modifiée.

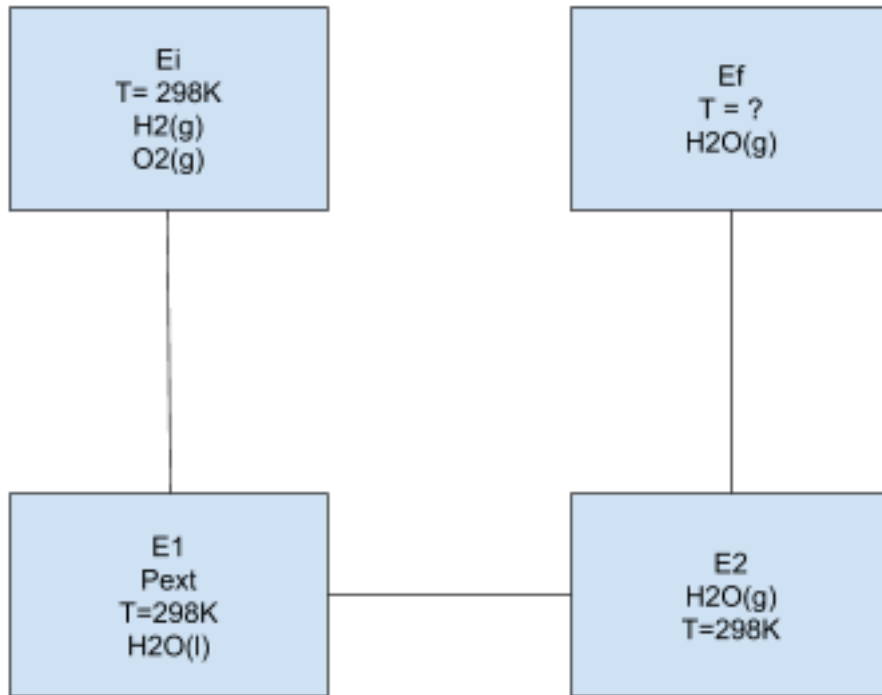


FIGURE 7: ÉTAPES DE RÉACTIONS INTERMÉDIAIRES

On établit la variation d'enthalpie générale :

$$0 = H_1 - H_i + H_2 - H_1 + H_f - H_2 \quad (7)$$

Celle-ci est nulle car la réaction est adiabatique.

On remplace ensuite les différentes variations par leur formule :

$$0 = \xi \Delta_c H^\circ(298K) + 2n_0 \Delta_{vap} H^\circ(H_2O, 298K) + n_0 \int_{298}^{T_f} (171,6 + 38,6 \cdot 10^{-3} T) dT \quad (8)$$

par intégration on obtient le polynôme suivant :

$$0 = -447850,7 + 171,6 T_f + \frac{38,6 \cdot 10^{-3}}{2} T_f^2 \quad (9)$$

Par résolution on obtient deux solutions dont une solution réelle de 1827°C.

La température est donc proche de 2000°C. Il est à noter que cette température trouvée est la température optimale car conséquence de l'hypothèse d'une proportion stoechiométrique.

II.2.ii.Calcul du temps de l'électrolyse

L'objectif ici est de déterminer la formule permettant de connaître la durée de l'électrolyse pour une quantité d'hydrogène souhaitée $n(H_2)$. Pour cela on utilise la loi de Faraday en électrochimie [27] tel que :

$$Q = I\Delta t = FnZ(e^-) \quad (10)$$

$$Q = I\Delta t = 2Fn(H_2) \quad (11)$$

Avec Q la charge électrique, I l'intensité du courant, t la durée de l'électrolyse, F constante de Faraday et $n(H_2)$, la quantité d'hydrogène produite souhaitée. Le facteur 2 est dû au nombre d'électrons échangés à l'électrode pour produire le dihydrogène. Selon la réaction : $2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$

Ainsi on obtient la formule permettant de connaître cette durée à partir de (11) :

$$\Delta t = \frac{2n(H_2)F}{I} \iff n(H_2) = \frac{I\Delta t}{2F} \quad (12)$$

Pour notre banc à hydrogène, on souhaite remplir entièrement le volume disponible V_{tot} qui est de $8.10^{-5} m^3$.

Il est aussi possible d'écrire la formule précédente à partir de la masse volumique ρ tel que :

$$n(H_2) = \frac{\rho V_{tot}}{M(H_2)} \quad (13)$$

Par substitution dans la formule (12), on obtient la formule suivante :

$$\Delta t = \frac{2F\rho V_{tot}}{IM(H_2)} \quad (14)$$

Cette formule sera retenue car elle présente l'avantage de ne plus faire apparaître la quantité d'hydrogène. Physiquement, elle représente le temps nécessaire pour remplir l'ensemble du volume par du dihydrogène. Cette formule peut-être adaptée à n'importe quel banc.

II.2.iii.Calcul de l'intensité au générateur

Une donnée importante à connaître pour produire le dihydrogène est l'intensité I à appliquer aux bornes du générateur. Il est indispensable de maîtriser la flamme au brûleur. Pour ce faire, la flamme doit être laminaire afin d'éviter tout danger corporel et matériel. Une caractéristique propre à tout écoulement est le nombre de Reynolds tel que :

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (15)$$

avec Re , v , d , μ , ρ qui sont respectivement le nombre de Reynolds, la vitesse moyenne de l'écoulement, le diamètre, la viscosité dynamique et la masse volumique.

Pour que la flamme soit laminaire, notre écoulement d'hydrogène doit donc être lui-même laminaire. L'objectif est alors de déterminer une formule permettant de relier intensité et nombre de Reynolds. En effet, l'idée est de connaître l'évolution du

nombre de Reynolds en fonction de l'intensité. On choisira donc une intensité judicieuse pour avoir un nombre de Reynolds respectant la condition d'un écoulement laminaire.

On estime que le temps caractéristique de l'électrolyse, autrement dit la durée de l'électrolyse, est égale au temps de l'écoulement. Ainsi, tout arrêt de l'électrolyse entraînera aussitôt l'arrêt de la combustion. Physiquement, nous ne tenons pas compte du régime transitoire. Seul le régime permanent est retenu.

On notera désormais $V_{tot} = VH_2 = V_1 + V_2$

Par (15) on obtient:

$$v = \frac{Re\mu}{\rho d} \quad (16)$$

La vitesse peut être décrite par le débit volumique. En effet, le débit volumique noté q est donné par la formule :

$$q = \frac{V_{tot}}{\Delta t} \quad (17)$$

Or on a : $q = vS$ où S est la section de passage du fluide

On établit alors que:

$$v = \frac{q}{S} = \frac{V_{tot}}{\Delta t S} \quad (18)$$

Par conséquent on a avec (16) et (13):

$$\frac{V_{tot}}{\Delta t S} = \frac{2FRe\mu V_{tot}}{I\Delta t M(H_2)d} \quad (19)$$

On simplifie :

$$\frac{1}{S} = \frac{2FRe\mu}{IM(H_2)d} \iff Re = \frac{IM(H_2)d}{2S\mu F} \quad (20)$$

On obtient donc une équation permettant de calculer directement le nombre de Reynolds et ainsi vérifier selon l'intensité imposée, si notre écoulement est laminaire ou non.

On constate par analyse dimensionnelle, que la formule est adimensionnelle ce qui est cohérent avec le nombre de Reynolds en effet :

$$\frac{[I][L][M][T]^2[L][mol]}{[mol][L]^2[T][M][I][T]} \text{ par simplification, aucune unité.}$$

M : masse molaire (ici en $kg.mol^{-1}$)

D'après le graphique du Reynolds pour une paire d'électrodes en fonction de l'intensité (en annexe E), on constate que quel que soit l'intensité jusqu'à 150A le nombre de Reynolds est cohérent avec un écoulement laminaire. Le choix de l'intensité ne dépend donc pas du nombre de Reynolds mais sera dépendant majoritairement du générateur à disposition car une intensité de 150A est l'équivalent d'une batterie de voiture et 300A est l'intensité des lignes à haute tension.

Cependant on observe que le temps d'électrolyse (annexe E) pour une seule paire d'électrodes est très important. On cherche donc à minimiser ce temps en utilisant plusieurs paires d'électrodes. Par exemple, utiliser quatre paires d'électrodes revient à multiplier $n(H_2)$ par quatre.

Par (13) on a donc:

$$4n(H_2) = \frac{\rho V_{tot}}{M(H_2)} \Leftrightarrow n(H_2) = \frac{\rho V_{tot}}{4M(H_2)} \quad (21)$$

Avec (14) on a:

$$\Delta t' = \frac{2F\rho V_{tot}}{4IM(H_2)} = \frac{F\rho V_{tot}}{2IM(H_2)} = \frac{\Delta t}{4} \quad (22)$$

Alors (19) devient:

$$\frac{V_{tot}}{\Delta t S} = \frac{Re\mu V_{tot}}{4n(H_2)M(H_2)d} \quad (23)$$

Soit:

$$\frac{V_{tot}}{\Delta t S} = \frac{FRe\mu V_{tot}}{2I\Delta t M(H_2)d} \quad (24)$$

Soit:

$$Re' = \frac{2I\Delta t M(H_2)d}{FS\mu} = 4Re \quad (25)$$

Comme nous l'avons vu précédemment dans l'équation (14), le temps est inversement proportionnel à l'intensité. Nous privilégions donc les fortes intensités pour un temps le plus faible possible. Cependant les générateurs mis à disposition par l'INSA ne peuvent pas atteindre de très grandes intensités telles que 300A. Pour l'expérience, on choisit alors l'intensité maximale permise par le générateur afin de minimiser le temps de production du dihydrogène. D'autre part, nous pouvons utiliser quatre paires d'électrodes afin de réduire le temps d'électrolyse par quatre.

II.2.iv. Calcul de la puissance de l'électrolyse

Le but de notre banc à hydrogène est de maximiser la puissance fournie par l'électrolyse afin de maximiser celle de la flamme. Cependant, il est nécessaire de minimiser la puissance dissipée par effet Joule.

La tension minimale à appliquer aux bornes du générateur avec une solution électrolytique de sulfate de sodium est $U=4,72V$. De ce fait, plus on augmente la tension aux bornes du générateur, plus l'énergie dissipée par effet Joules est importante. La tendance augmente rapidement avec un rendement de l'électrolyse qui diminue de plus de 30% si on applique une tension de 7V. Afin de minimiser la puissance perdue par effet Joule la meilleure option serait d'envisager une tension de 4,72V. En effet, augmenter la puissance de la flamme nous importe peu ici, d'autant plus que cela réduit le rendement de l'électrolyse.

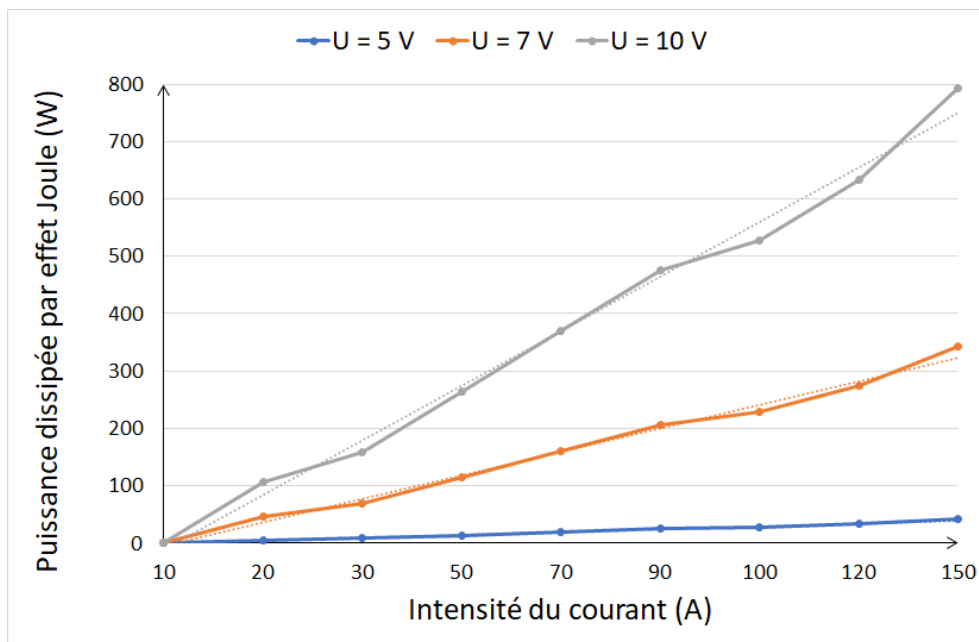


FIGURE 8 : PUISSANCE DISSIPÉE PAR EFFET JOULE EN FONCTION DE L'INTENSITÉ ET DE LA TENSION AUX BORNES DU GÉNÉRATEUR

Le rendement de l'électrolyse se calcule en faisant le quotient de la tension minimale requise par l'électrolyse sur la tension appliquée.

U appliqué (V)	Rendement de l'électrolyse
4,72	1
5	0,944
7	0,674285714285714
10	0,472
13	0,363076923076923

FIGURE 9 :RENDEMENT DE L'ÉLECTROLYSE

III. Difficultés rencontrées et analyses critiques du projet

III.1. Difficultés

Tout au long du semestre nous avons travaillé en groupe afin de réaliser notre banc à hydrogène. A cause de la fermeture de l'INSA et du confinement mi-mars, nous avons dû trouver un moyen de continuer le travail et d'entretenir la communication de groupe. De plus, l'essentiel de notre projet consistait en l'élaboration de notre banc à hydrogène. En raison des circonstances nous avons donc dû aborder notre sujet de projet sous un autre angle, avec une approche plus théorique.

D'autre part nous avons lors de l'élaboration du modèle de notre banc rencontré certaines difficultés. En effet, nous avons dû trouver une solution pour étanchéifier les fils électriques utilisés. De plus, il nous a fallu trouver une solution pour rendre les jonctions entre les différents composants du montage hermétique. L'hydrogène est effectivement un gaz très volatile qui peut s'échapper par de très fines fentes ou fissures. Nous avons donc dû trouver un moyen d'acheminer le gaz jusqu'au brûleur en évitant le plus possible les pertes dans le but d'obtenir le meilleur rendement possible. Ensuite, il a été question de trouver un système de refroidissement afin d'éviter que le laiton relié au brûleur ne fonde car la flamme à hydrogène atteint de très hautes températures. Enfin, nous avons rencontré un grand nombre de problèmes liés aux calculs théoriques nécessaires à la conception du banc. En effet, nous ne disposons que de très peu de données et beaucoup d'inconnues à déterminer. Nous ne savions pas quelles données fixer et lesquelles restaient à déterminer. Nous avons décidé d'aborder les calculs en partant de différentes données pour aboutir à des résultats communs cohérents.

III.2. Limitations

Il faut rappeler que notre élaboration d'un banc à hydrogène est purement théorique et que nos hypothèses n'ont pas pu être vérifiées par la pratique. Ainsi il est difficile de savoir si la production de dihydrogène à l'électrode sera suffisante pour l'obtention d'une flamme. Une limite très importante est le temps nécessaire pour l'électrolyse pour produire l'hydrogène nécessaire. Nous faisons effectivement l'hypothèse calculatoire suivante: la durée de combustion du dihydrogène est égale à celle de la production du gaz. Il est donc indispensable d'avoir un générateur puissant pour maximiser la production de dihydrogène en un temps court, et éviter un temps d'attente parfois très long. D'autre part, l'électrolyse pourrait ne pas fonctionner à débit constant, il se peut que la production d'hydrogène soit non linéaire. Le débit ne serait donc pas constant et suffisant pour obtenir une flamme laminaire.

Une limite technique dans notre projet est la résistance du tube en laiton face aux hautes températures. Bien que nous ayons pris des précautions (système de refroidissement et longue tige) pour éviter la fusion de laiton, la soudure et le métal lui-même peuvent ne pas résister à la chaleur de la flamme et à son rayonnement thermique. De plus, il est indispensable de prendre en compte les effets de conduction thermique à travers la tuyère et le tube en laiton pour prévenir de toutes déformations dues à la chaleur. Une étude thermique serait donc nécessaire pour maîtriser totalement le dispositif. Il faudrait des métaux plus résistants aux hautes

températures comme par exemple du titane ou du molybdène mais ces matériaux sont en général chers, très difficiles à trouver sur le marché public et l'usinage des pièces demande des moyens professionnels.

Enfin, le problème d'une bonne isolation des conduits acheminant le gaz reste présent. L'endroit particulièrement critique de notre banc se situe à la jonction entre l'entonnoir et le tube en laiton. Bien que la colle étanche soit optimale pour sceller les deux pièces hermétiquement, il se pourrait que la qualité de la finition se dégrade sur le long terme. Ce risque pourrait être atténué en prenant un entonnoir avec un col inférieur qui s'emboîte dans le tube en laiton afin que l'hydrogène, aspiré par le haut par un effet Venturi, ne puisse s'échapper.

III.3.Optimisation

Des améliorations peuvent être envisagées. Les matériaux suivants étant coûteux et difficiles à se procurer, nous les exposons tout de même à titre de proposition si le montage futur de notre banc venait à avoir lieu. En effet, ils présentent certains avantages significatifs.

D'abord, le rendement en dihydrogène peut être optimisé en fonction de la nature de l'électrolyte. Des chercheurs du MIT (Massachusetts Institute of Technology) ont découvert que les doubles pérovskites sont des matériaux qui améliorent les réactions d'électrolyse de l'eau. Les doubles pérovskites sont des combinaisons de différents éléments tel qu'un lanthanide, un baryum, un cobalt et de l'oxygène. Ainsi si on prend par exemple du Praséodyme comme un lanthanide, on peut former ce double perovskite synthétisé après mélange des poudres des différents éléments, qui sont ensuite fusionnés dans un four à haute température pour former le cristal, très bon catalyseur. Ce cristal permet donc d'augmenter la vitesse de production de l'oxygène et donc par conséquent celle de l'hydrogène qui nous intéresse. Ces catalyseurs seraient très intéressants à exploiter dans le cas de notre banc, bien que difficiles et très coûteux à synthétiser à notre échelle.

Afin d'optimiser la conception du circuit électrique, nous avons pensé utiliser des fils électriques étanches au lieu d'enfiler des fils dans un tuyau. Les fils étanches seraient reliés aux électrodes et au générateur grâce à des pinces crocodiles. Une partie des électrodes étant émergée, les pinces crocodiles resteraient hors de l'eau. On évite ainsi le problème de court-circuit. Cependant il est difficile de trouver des fils électriques étanches à un prix décent dans le commerce.

Conclusion

L'objectif de notre projet était de mettre au point un banc à hydrogène à destination académique. Nous avons réalisé notre projet de manière théorique. D'abord le dimensionnement de chaque pièce a été choisi en fonction de l'offre, et la nature des matériaux par des recherches bibliographiques. Afin d'obtenir une flamme laminaire, nous avons calculé l'intensité nécessaire du générateur. Ce projet propose donc un banc à hydrogène inédit, argumenté par des calculs. Le but est que la réalisation future du banc à hydrogène permette ainsi de vérifier de manière expérimentale notre projet.

Pour poursuivre l'étude de ce banc à hydrogène, nous suggérons une étude sur les transferts thermiques au sein du système: conductivité, convection et rayonnement à partir des lois de propagation de la chaleur ou de la loi de Stefan-Boltzmann notamment. Des recherches sur l'optimisation de la réaction grâce à la nature de l'électrolyte et de la température sont aussi d'autres axes à approfondir ultérieurement.

Concernant les diverses applications possibles pour notre montage, l'un des prolongements envisagés serait de coupler le banc à une source d'énergie renouvelable, lui prodiguant une autonomie relative. L'idéal serait de récupérer la puissance d'une petite éolienne ou d'un panneau solaire qui remplacerait le générateur pour fournir l'énergie nécessaire à la création d'un courant électrique dans le bain d'électrolyse. On pourrait également imaginer raccrocher notre banc à une Pile à Combustible (PAC) à hydrogène. Le principe de cette PAC est exactement inverse à celui de l'électrolyse la pile permettrait donc de convertir l'énergie chimique (amenée par notre électrolyse) en énergie électrique, utilisable pour de petits dispositifs.

Au terme de cette étude, nous pouvons espérer que le banc à hydrogène sera réalisé dans la pratique et pourra ainsi générer une flamme optimale et propre.

Annexes

Annexe A : Étapes et procédés de gazéification

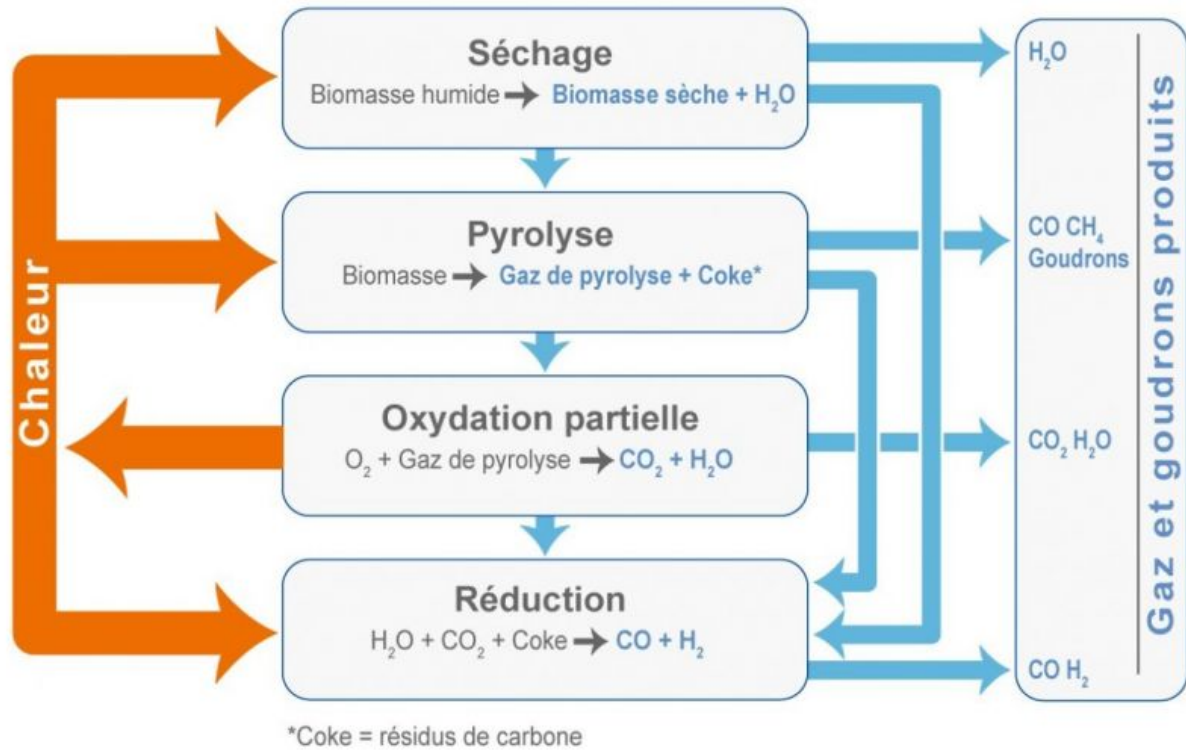


FIGURE A-1 : PROCESSUS DE GAZÉIFICATION

Gazogène à co-courant (lit fixe)

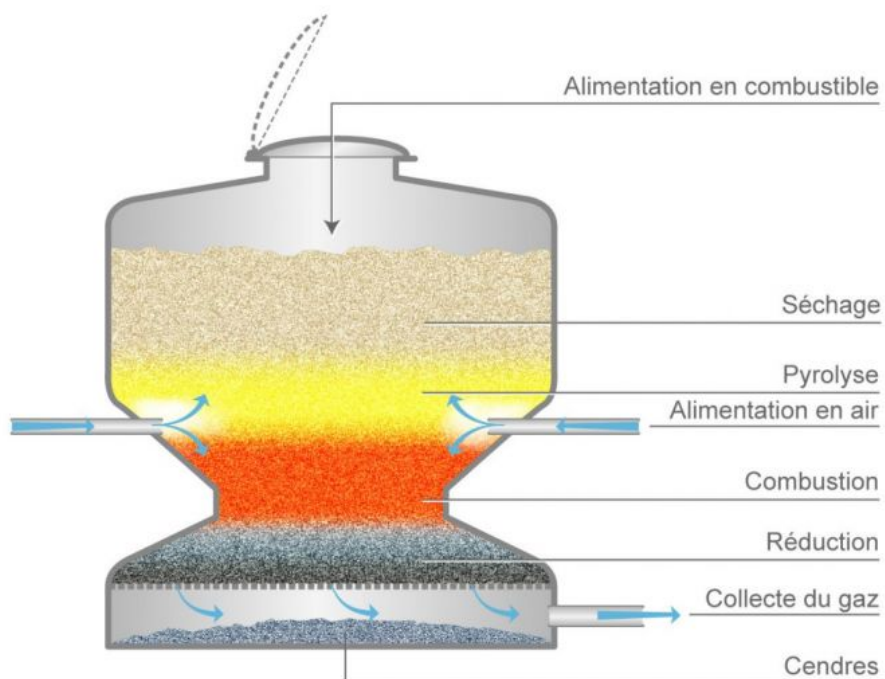


FIGURE A-2.1 : RÉACTEUR À LIT-FIXE CO-COURANT

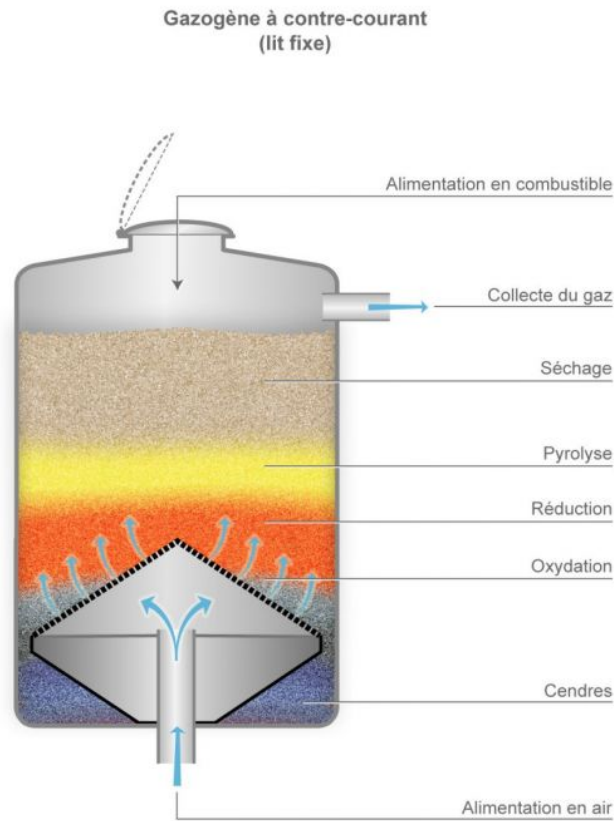


FIGURE A-2.2 : RÉACTEUR À LIT-FIXE À CONTRE COURANT

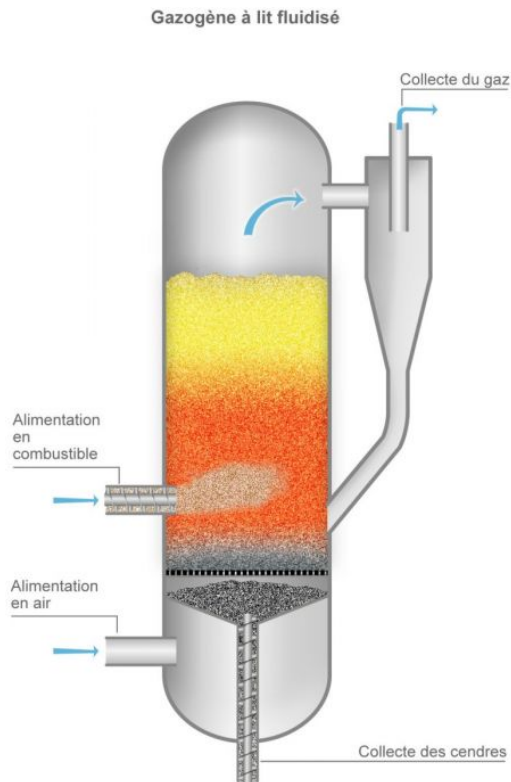


FIGURE A-3.1 : LIT FLUIDISÉ STATIQUE

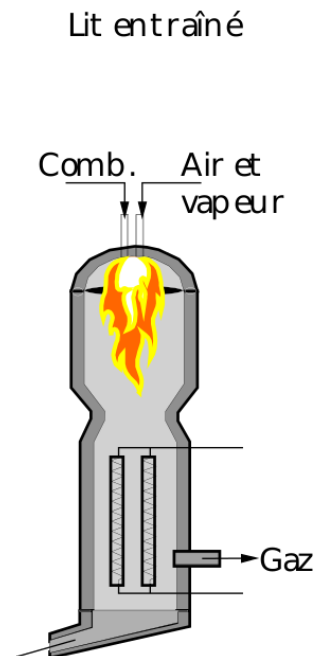


FIGURE A-3.2 : LIT ENTRAÎNÉ

Annexe B : Influence de la température sur le volume de production d'hydrogène

Lors des calculs visant à déterminer le temps de l'électrolyse, nous avons utilisé la relation:

$$n(H_2) = \frac{I\Delta t}{2F} \quad (1')$$

Faisant l'hypothèse que l'hydrogène est un gaz parfait, on admet :

$$PV(H_2) = n(H_2)RT \quad (2')$$

En résolvant ce système, il nous est ensuite possible d'étudier la variation du volume d'hydrogène total $V(H_2)$ produit au brûleur en fonction de la température ambiante que l'on fait varier entre 10 et 70°C.

La relation utilisée pour ce graphe est donc :

$$V(H_2) = \frac{IRT\Delta t}{2FP} \quad (3')$$

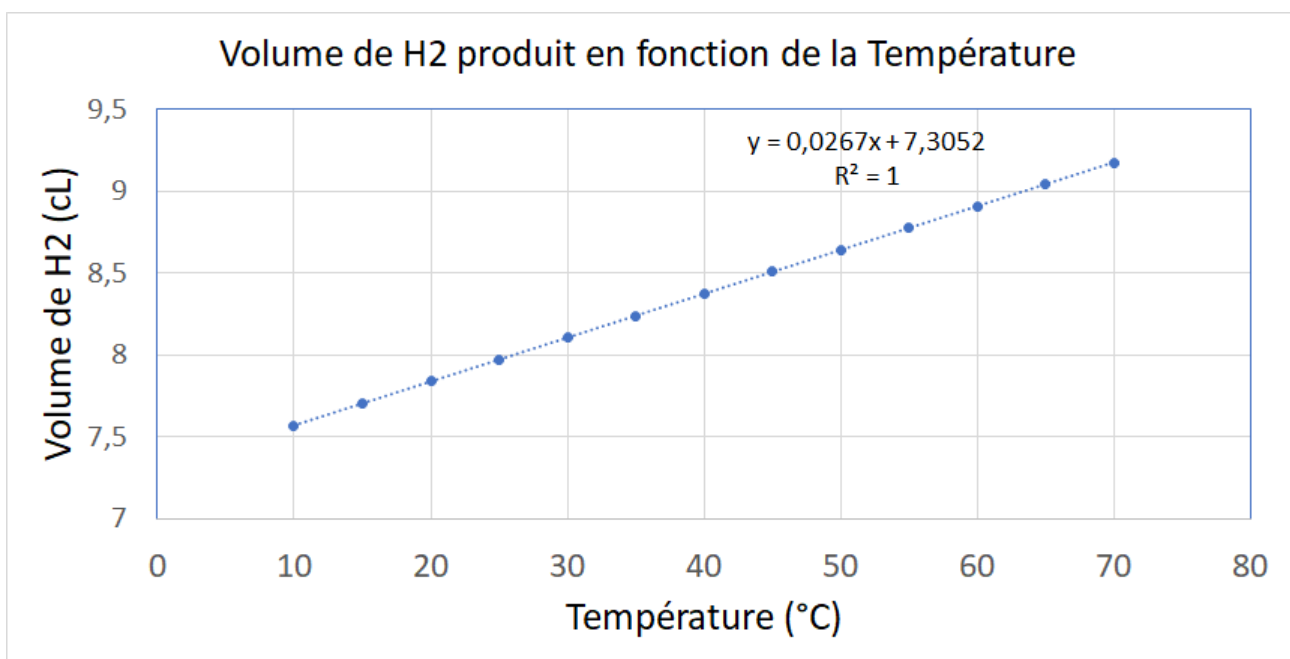


FIGURE B-1: GRAPHE DE L'INFLUENCE DU VOLUME DE H_2 PRODUIT EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Annexe C : Calcul de la conductivité ionique du sulfate de sodium dans l'eau

Loi de Kohlrausch: $\theta = \sum_i \lambda_i C_i$ [38]

avec, θ , C_i , λ_i qui sont respectivement la conductivité, la concentration de l'espèce i et la conductivité molaire ionique de l'espèce i .

Données:

$$\lambda(\text{Na}^+) = 5,01E^{-3}S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$$

$$\lambda(\text{SO}_4^{2-}) = 8E^{-3}S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$$

$$[\text{Na}^+] = 2 \cdot 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$$

Loi de Kohlrausch: $\theta = [\text{Na}^+] \lambda_{\text{Na}^+} + [\text{SO}_4^{2-}] \lambda_{\text{SO}_4^{2-}}$ (4')

$$AN : \theta = 20 * 5,01 \cdot 10^{-3} + 10 * 8 \cdot 10^{-3} = 0,182S \cdot m^{-1}$$

NB: On estime une concentration théorique (15 grammes de sulfate de sodium dans 15 litres d'eau) des ions SO_4^{2-} et Na^+ ; ces concentrations seront à ajuster selon les résultats de l'expérience.

Annexe D : Devis du banc à hydrogène

Matériel	Quantité	Marchand prix TTC (en €)	Total en €
Aquarium	1	19,40	19,40
Electrode graphite	2	7,90	15,80
Générateur	1	66,66	66,66
Tube (brûleur)	1	6,00	6,00
Colle étanche	1	36,66	36,66
Pinces ventouses du dessus	2	1,00	2,00
Pinces ventouse du dessous	2	5,02	10,04
Chariot rouge	1	39,90	39,90
Scie à métaux	1	3,88	3,88
Pistolet à colle	1	78,30	78,30
Colle thermique	1	69,95	69,95
Lunettes de protection	6	3,69	22,14
Tuyère	1	28,56	28,56
Perceuse robuste	1	112,90	112,90
Gants	1	3,48	3,48
Papier pour poncer	1	2,90	2,90
Entonnoir	2	3,20	6,40
Fils électriques	1	3,99	3,99
Pince crocodile	4	0,63	2,52
Sulfate de sodium	1	5,97	5,97
Gaines	1	4,60	4,60
Tuyaux d'eau	1	51,86	51,86
Pompe	1	54,99	54,99
Feuille de laiton	1	65,81	65,81
Réfrigérant à eau	1	19,00	19,00
Prix total TTC (€)			733,62

Matériel	Liens URL
Aquarium	https://www.botanic.com/produit/130367/aquarium-35x18x22-cm-blanc-13-8l.html
Electrode graphite	https://www.amazon.fr/Anode-%C3%A9lectrode-graphite-barre-galvanoplastie/dp/B00PS8VNGE
Générateur	https://www.conrad.fr/p/alimentation-de-laboratoire-reglable-basetech-bt-305-0-30-vdc-0-5-a-150-w-nbr-de-sorties-1-x-1-pcs-513812?gclid=Cj0KCQjw9tbzBRDVARIsAMBplx8M1M82iukRui86y2z1rKfbWH8UpFi_eknkTRLSxODaGAB2IweGOBcaAuz7EALw_wcB
Tube (brûleur)	https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/tube-rond-laiton-satine-dore-l-1-m-x-l-0-4-cm-x-h-0-4-cm-e1501604567
Colle étanche	https://www.legallais.com/produit/mastics-polymere-polymax-fix-and-seal-express/51847
Pincés ventouses du dessus	https://fr.aliexpress.com/item/32889234550.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=494-037-6276&isdl=y&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google_7_shopping&aff_platform=google&aff_short_key=UneMJZVf&&albagn=888888&albcpr=6459788344&albag=76234907246&trgt=743612850874&crea=fr32889234550&netw=u&device=c&albp_g=743612850874&albpd=fr32889234550&gclid=CjwKCAjw95D0BRBFEiwAcO1KDEyCNR5wUKFuF1swEF4hHLZTJRcRGFI DPjBJS8ILTWVW0nST3Pga9RoCNpoQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds
Pincés ventouse du dessous	https://www.supermagnete.fr/accessoires-pour-l-interieur/porte-cartes-ventouse_M-64?origin=&kwd=&adwords_fr_fre-shop=&dfw_tracker=25447-M-64&gclid=CjwKCAjw95D0BRBFEiwAcO1KDO-j_aKOump7sm2ff3F8CKLp8xKHJu6GQPCFSRLmAZtgaXZSDK PbThoCPmQQAvD_BwE
Chariot rouge	https://www.manomano.fr/p/2x-arebos-chariot-servante-datelier-2-etages-6630621
Scie à métaux	https://fr.rs-online.com/web/p/scies-a-metaux/0545159?cm_mmc=FR-PLA-DS3A-_-google-_-PLA_FR_FR_(FR:Whoop!)+Outillage_Experiment-_(FR:Whoop!)+Scies+%C3%A0+m%C3%A9taux-_-PRODUCT_GROUP&matchtype=&pla-305390613276&gclid=Cj0KCQjwjcfzBRCHARIsAO-1_Orn1eaM1vINIj59-B5MJz8dXmC0StxFEPribVoPES1QNhUwVRIOtSgaAqtBEALw_wcB&gclsrc=aw.ds

Pistolet à colle	https://www.raja.fr/adhesifs-cerclage-collage/colles-et-nettoyants-industriels/collage-a-chaud/pistolet-colle-usage-moderne_PDT02393.html
Colle thermique	https://www.raja.fr/adhesifs-cerclage-collage/colles-et-nettoyants-industriels/collage-a-chaud/colle-thermofusible-en-batonnets-tec-bond_OFF_FR_229.html
Lunettes de protection	https://www.manomano.fr/p/lunettes-visiteur-portwest-incolore-unique-2053290
Tuyère	https://www.laboutiquedusoudeur.com/10-tuyeres-de-torche-plasma-20k-21kf.html
Perceuse robuste	https://www.manomano.fr/perceuse-1146?model_id=5519195&g=1&referer_id=687129&gclid=Cj0KCQjw9tbzBRDVARIsAMBplx-GzoiYmkvMoH_qtkCsnO5eh2UV9warZhBgeyKgqRSGizasxVzL4DAaAk4AEALw_wcB
Gants	https://www.robe-materiel-medical.com/Gants-d-examen-latex-poudryE-s-RobyE-MyE-dical-BoyE-te-de-100-GELA56-materiel-medical.htm?gclid=Cj0KCQjw9tbzBRDVARIsAMBplx9_J_GYq-Ybd2aOWgYq_9C0ZVxeY4W_UuIEH57eUHWdvOYic7EYi70aAqpmEALw_wcB
Papier pour poncer	https://www.manomano.fr/rouleau-dabrasif-de-ponceuse-1925?model_id=6159478&g=1&referer_id=688928&gclid=Cj0KCQjw9tbzBRDVARIsAMBplx_KuPP4wRQ6X6yhDqXZxgP2sb9cMdmQdhzwKKNXVKxiJoYUNc51v9AaAqLKEALw_wcB
Entonnoir	https://www.manutan.fr/fr/maf/entonnoir-mig295548 La compatibilité du lecteur d'écran est activée.
Fils électriques	https://www.jeulin.fr/cordons-electriques-de-securite-a-reprise-arriere-gamme-economique-diametre-4-mm-pr-7420.html
Pince crocodile	<a ;"https:="" fr="" href="https://www.reichelt.com/fr/fr/pince-crocodile-4-mm-en-acier-ags-20-p128856.html?PROVID=2788&gclid=Cj0KCQjwmdzzBRC7ARIsANdqRRnc_2Hwsl8NF-N4k51g-fb13hbpgafmHpM-R0w1blnCPTP04jQ6GDgaAk2IEALw_wcB&&r=1" pince-crocodile-4-mm-en-acier-ags-20-p128856.html?provid='2788&gclid=Cj0KCQjwmdzzBRC7ARIsANdqRRnc_2Hwsl8NF-N4k51g-fb13hbpgafmHpM-R0w1blnCPTP04jQ6GDgaAk2IEALw_wcB&&r=1"' www.reichelt.com="">https://www.reichelt.com/fr/fr/pince-crocodile-4-mm-en-acier-ags-20-p128856.html?PROVID=2788&gclid=Cj0KCQjwmdzzBRC7ARIsANdqRRnc_2Hwsl8NF-N4k51g-fb13hbpgafmHpM-R0w1blnCPTP04jQ6GDgaAk2IEALw_wcB&&r=1";"https://www.reichelt.com/fr/fr/pince-crocodile-4-mm-en-acier-ags-20-p128856.html?PROVID=2788&gclid=Cj0KCQjwmdzzBRC7ARIsANdqRRnc_2Hwsl8NF-N4k51g-fb13hbpgafmHpM-R0w1blnCPTP04jQ6GDgaAk2IEALw_wcB&&r=1

Sulfate de sodium	https://www.art-chimie-online.com/produits-chimiques/63-sulfate-de-sodium-anhydre-technique-min-998-.html
Gaines	https://fr.rs-online.com/web/p/conduits-de-cable/0429678?cm_mmc=FR-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_FR_FR_(FR:Whoop!)+C%C3%A2bles+%26+cordons+et+fils_Experiment-_(FR:Whoop!)+Conduits+de+c%C3%A2ble-_-PRODUCT_GROUP&matchtype=&aud-828197004210:pla-325337244360&gclid=CjwKCAjw5Ij2BRBdEiwA0Frc9YeoG6Ow6h3vjk8ZbLbkMX9kt8vR2Fwyj48d1bQINAq8ibJXqPGrxBoCEoMQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds
Tuyaux d'eau	tps://fr.rs-online.com/web/p/tubes-flexibles/0440880/
Pompe	https://www.zoomalia.com/animalerie/eheim-universal-300-pompe-a-eau-300-l-h-p-6228.html
Feuille de laiton	https://fr.rs-online.com/web/p/feuilles-en-laiton/8732487?cm_mmc=FR-PLA-DS3A-_-google-_-PLA_FR_FR_(FR:Whoop!)+Abrasifs+%26+Mat%C3%A9riaux+techniques_Experiment-_(FR:Whoop!)+Feuilles+en+laiton-_-PRODUCT_GROUP&matchtype=&aud-827186183686:pla-629731792927&gclid=CjwKCAjw5Ij2BRBdEiwA0Frc9c3aXoeTjIwZR-4bZL5QZ2PthtKepKyw2yoEt9p0xkH_mBn7AQrp0RoC1t8QAvD_BwE&gclsrc=aw.ds
Réfrigérant à eau	https://www.pierron.fr/refrigerant-droit-liebig.html

Annexe E: Influence de l'intensité sur les paramètres du système

Valeurs des différents paramètres selon l'intensité appliquée (pour la production d'un volume de 0,08L):

Intensité (A)	10	20	30	50	70	90
Δt (s)	6,29E+04	3,14E+04	2,10E+04	1,26E+04	8,99E+03	6,99E+03
Δt (h)	1,75E+01	8,74E+00	5,82E+00	3,49E+00	2,50E+00	1,94E+00
Δt (min)	1,05E+03	5,24E+02	3,49E+02	2,10E+02	1,50E+02	1,16E+02
V(H2) produit (L)	7,97E-02	7,97E-02	7,97E-02	7,97E-02	7,97E-02	7,97E-02
Re	2,30E+01	4,60E+01	6,90E+01	1,15E+02	1,61E+02	2,07E+02
vitesse en m/s	3,83E+00	7,66E+00	1,15E+01	1,92E+01	2,68E+01	3,45E+01
vitesse en km/h	1,38E+01	2,76E+01	4,14E+01	6,90E+01	9,65E+01	1,24E+02

Intensité (A)	120	150	300
Δt (s)	5,24E+03	4,19E+03	2,10E+03
Δt (h)	1,46E+00	1,16E+00	5,82E-01
Δt (min)	8,74E+01	6,99E+01	3,49E+01
V(H2) produit (L)	7,97E-02	7,97E-02	7,97E-02
Re	2,76E+02	3,45E+02	6,90E+02
vitesse en m/s	4,60E+01	5,75E+01	1,15E+02
vitesse en km/h	1,66E+02	2,07E+02	4,14E+02

Paramètres utilisés :

Paramètres	
ρ (kg/m ³)	8,23E-02
μ viscosité dynamique Pa.s	8,92E-06
M(H2) en kg/mol	2,02E-03
Farad A.s/mol	96485
Vtot de H2 (m ³)	8,00E-05
L (diamètre brûleur)	6,50E-04
R en J/K.mol	8,314
Patm en Pa	101325
T en K (25°C)	298
Vtot de H2 (L)	8,00E-02
S (m2) tuyère	3,32E-07

Relation entre le volume d'eau et l'intensité (pour une électrolyse de 20s) :

Intensité (A)	10	20	30	40	50	70	90	100	120	150
Veau (m3)	2,05E	4,10E	6,15E	8,21E	1,03E	1,44E	1,85E	2,05E	2,46E	3,08E

Afin de déterminer une relation entre le volume d'eau et l'intensité du courant nous avons effectué le calcul suivant:

$$V_{eau} = \frac{V_{H_2}}{1,24} \quad (5')$$

$$\text{donc } V_{eau} = \frac{IM(H_2)t}{2F\rho * 1,24} \quad (6')$$

avec les paramètres suivants:

Paramètres	
ρ (kg/m ³)	8,23E-02
μ viscosité dynamique Pa.s	8,92E-06
M(H ₂) en kg/mol	2,02E-03
F Farad A.s/mol	96485
Δt (s)	2,00E+01

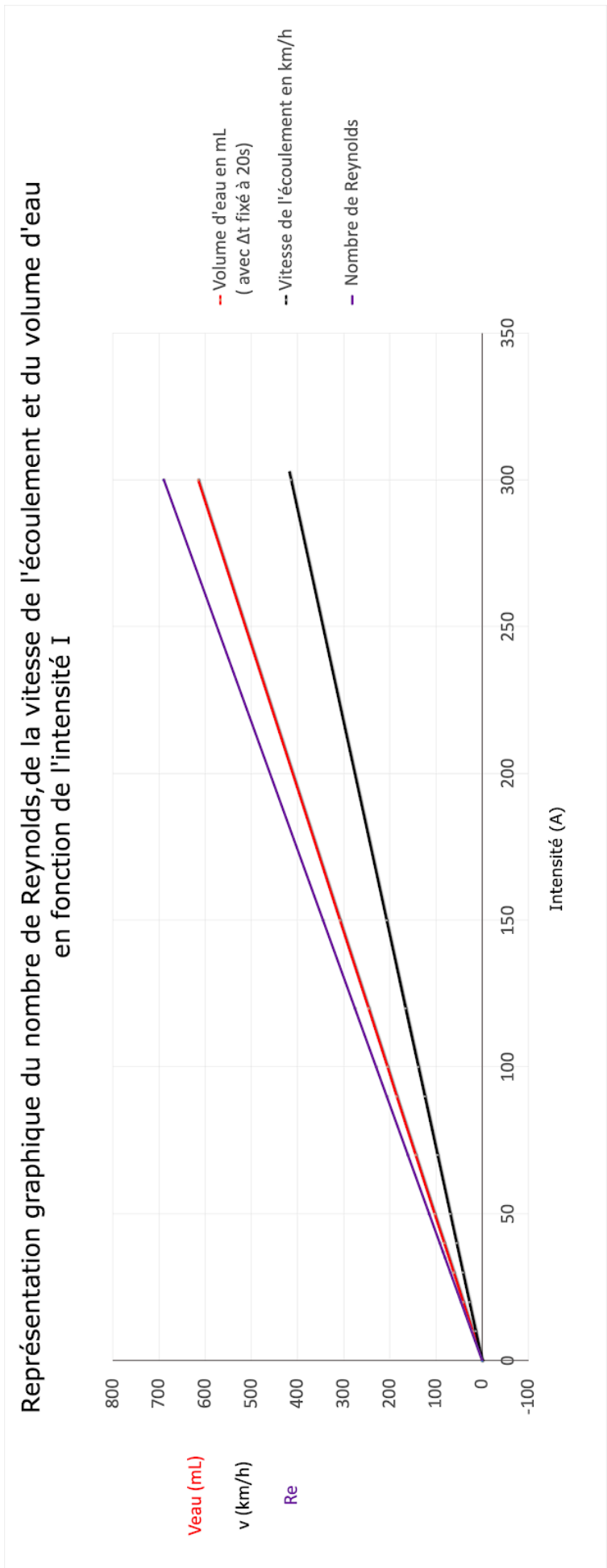


FIGURE E-1: REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES SELON L'INTENSITÉ

Annexe F: Tension à appliquer aux bornes du générateur

Nous avons décidé d'utiliser le sulfate de sodium comme électrolyte. Cette solution va donc interagir aux électrodes suivant les réactions de demi-équations associées :

A l'anode positive, on a les réactions:



Le potentiel à l'anode est donc: $Ea^0 = 2.010V/ESH$

A la cathode négative, on a les réactions :



Le potentiel à la cathode est donc: $Ec^0 = -2.7V/ESH$

On en déduit la tension minimale à appliquer aux bornes des électrodes est :

$$\Delta E = Ea^0 + Ec^0 = 2,01 + 2,7 = 4,71V/ESH \quad (11')$$

Bibliographie

[1] Figure 0.[en ligne].

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.h2-mobile.fr%2Factus%2Frh2ine-corridor-hydrogene-genes-rotterdam%2F&psig=AOvVaw0-7u0koVtfz4wwgfi8UQFk&ust=1590597389772000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCNil8Zb70ekCFQAAAAAdAAAAABAD>

I - Présentation des différents procédés permettant la production d'hydrogène

Introduction

[2] *Connaissances des énergies*, "Hydrogène Énergie" [en ligne]. Publication en 2011, mis à jour le 09/04/15, [consulté le 06/02/2020].

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie#notes>

[3] BARBAUX Aurélie, *Usine Nouvelle*, "Comment Hydrogène de France va produire des piles à combustible géantes à Bordeaux" [en ligne]. Publication le 10/12/19, [consulté le 12/02/20],

<https://www.usinenouvelle.com/article/comment-hydrogene-de-france-va-produire-des-piles-a-combustible-geantes-a-bordeaux.N912044>

[4] Encyclopédie collaborative *Wikipédia*, "Histoire de la production d'Hydrogène", [en ligne]. Publication le 18 octobre 2011, mis à jour le 5 mai 2020 [consulté le 06/02/2020].

https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_production_d%27hydrog%C3%A8ne

Reformage

[5] T. Alleau, P.Malbrunot, J. Saint-Just, "Mémento de l'Hydrogène FICHE 3.1.1" [document en ligne]. Publié en novembre 2019, [consulté le 09/02/20].

<http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.1.1%20-%20Production%20%C3%A0%20partir%20de%20fossiles%20-%20rev%20nov2019%20Th%20A.pdf>

[6] Jihane ABOU RACHED, Thèse soutenue le 31/03/2017, "Production d'hydrogène par vaporeformage du bioethanol brut" [en ligne]. [consulté le 09/02/20], lien internet ne fonctionnant plus, thèse téléchargée.

[7] *H2 Life, Public Interest Foundation*, "Vaporeformage", [en ligne]. Publication en 2017, [consulté le 09/02/2020].

<https://www.h2life.org/fr/hydrogene/sources/vaporeformage>

[8] Institut INERIS, rapport d'étude : "Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés" [en ligne]. Publié le 10/06/08, [consulté le 12/02/20].

https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Techniques_prod_H2_web.pdf

[9] LE VALANT Anthony, Thèse soutenue à l'Université de Poitiers, "Production d'hydrogène par vaporeformage du bioethanol brut" [en ligne]. Publication le 07/08/06, [consulté le 12/02/20].

<http://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/site/esupversions/5a02835c-1507-432a-a4cb-43982c413030>

[10] SURLA Karine, *Techniques de l'Ingénieur*, "Hydrogène" [en ligne]. Publication le 10/05/19, [consulté le 12/02/20].

<https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/fabrication-des-grands-produits-industriels-en-chimie-et-petrochimie-42319210/hydrogene-j6368/>

[11] Figure 1.[en ligne].

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie#notes>

Gazéification

[12] L'équipe de la Fondation, *Connaissances des Energies*, "Gazéification" [en ligne]. Publication en 2011, mis à jour le 03/07/11, [consulté le 06/02/2020].

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>

[13] Association Technique Energie Environnement (ATEE), "Pyrogazéification de biomasse et de déchets, *LeClub*" [en ligne]. Création du Club en 2014, mise à jour du site en 2020, [consulté le 10/03/20].

<https://atee.fr/energies-renouvelables/club-pyrogazeification>

[14] ADEME, GrDF, GRTgaz, collection *Horizons*, "Mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ?" [synthèse de l'étude en ligne]. Publié en janvier 2018, [consulté le 18/03/20].

<https://www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050>

[15] Responsables de publication : MORETTI Isabelle, MICHY Alexandra, GUERRINI Olivier, "Projet GAYA" [document en ligne]. Publié en juin 2017, [consulté le 10/03/20].

https://www.projetgaya.com/wp-content/uploads/2017/06/Gaya-FR-plateforme_2017BD.pdf

Electrolyse

[16] Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC), Mémento de l'Hydrogène, fiche 3.2.1, "Production d'Hydrogène par électrolyse de l'eau" [en ligne]. Mis à jour en janvier 2017 [consulté le 07/03/2020].

<https://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.1%20-%20Electrolyse%20de%20l%27eau%20revjanv2017%20ThA.pdf>

[17] *franceserv*, Physique, "Le courant électrique et les électrolyses" [en ligne]. [consulté le 04/03/20].

<https://notech.franceserv.com/courant-electrique-electrolyses.html>

- [18] *Futura Sciences*, "Electrolyse" [en ligne]. [consulté le 04/03/20],
<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-electrolyse-339/>
- [19] *Lenntech*, "Électrolyse" [en ligne]. [consulté le 04/03/20].
<https://www.lenntech.fr/electrolyse.htm>
- [20] *Sciences en lignes*, Chimie des solutions, Oxydo-réduction, "Electrolyse" [en ligne]. Publié en 2002, [consulté le 04/03/20].
http://www.sciences-en-ligne.com/DIST/Data/Ressources/lic2/chimie/chi_gen/electrochi/electrolyse.htm
- [21] ROZAIN Caroline, Thèse soutenue à l'Université Paris Sud, "Développement de Nouveaux Matériaux d'Electrodes pour la Production d'Hydrogène par Electrolyse de l'Eau" [en ligne]. Soutenance le 27/09/13, [consulté le 15/03/20].
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00923169/document>
- [22] *Le Parisien*, tiré de *Wikipédia*, "Electrolyse de l'eau" [en ligne]. Publication le 13/09/06, mis à jour le 08/04/20, [consulté le 07/03/20].
<http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Électrolyse%20de%20l'eau/fr-fr>
- [23] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), dossier de presse, "Les technologies de l'hydrogène au CEA" [en ligne]. Publication en mai 2012, [consulté le 07/03/20].
<http://www.cea.fr/Documents/Les%20technologies%20de%20l%E2%80%99hydrog%C3%A8ne%20au%20CEA.pdf>
- [24] Figure 2.[en ligne].
<https://www.google.com/url?q=https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-electrolyse-339/&sa=D&ust=1590567598885000&usg=AFQjCNF4DTK0iFO8xMFtNm7D3dbyhlmOtQ>
- [25] Figure 3.[en ligne].
https://www.google.com/url?q=https://fr.wikipedia.org/wiki/%25C3%2589lectrolyse_%25C3%25A0_haute_temp%25C3%25A9rature&sa=D&ust=1590567598884000&usg=AFQjCNEsd9HLRdFOUaGHifwDpcB29EsPSQ
- [26] Figure 4.[en ligne].
https://www.google.com/url?q=https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer_electrolyte_membrane_electrolysis&sa=D&ust=1590567598885000&usg=AFQjCNEbRyN2QvIDHtSW5qzvCjefzm8fMg

II - Etude de la conception d'un banc à Hydrogène

Formule utilisée pour calculer le temps de l'électrolyse

[27] Encyclopédie collaborative *Wikipédia*, "Loi de Faraday (électrochimie)", [en ligne]. Publication le 06/11/12, mis à jour le 16/10/19, [consulté le 22/03/2020].

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Lois_de_Faraday_\(%C3%A9lectrochimie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lois_de_Faraday_(%C3%A9lectrochimie))

Optimisation

[28] Revue *Industrie & Technologies*, "Un catalyseur pour l'électrolyse de l'eau" [en ligne]. Publié le 18/09/13, [consulté le 03/05/20].

<https://www.industrie-techno.com/article/un-catalyseur-pour-l-electrolyse-de-l-eau.24697>

[29] CHANDLER David L., *MIT News*, "New materials improve oxygen catalysis", Etats-Unis, [en ligne]. Publié le 17/09/13, [consulté le 03/05/20].

<http://news.mit.edu/2013/new-materials-improve-oxygen-catalysis-0917>

[30] GRIMAUD Alexis, MAY Kevin J., etc... , revue *nature communications* 4, article n°2439, "Double perovskites as a family of highly active catalysts for oxygen evolution in alkaline solution" [en ligne]. Publié en Septembre 2013, [consulté le 030/05/20].

<https://www.nature.com/articles/ncomms3439>

Influence de la Température

[31] BUELVAS Wilmer Licona, PAJARO AVILA Karen Cecilia, JIMENEZ Álvaro Realpe, Thèse de l'université de Carthagène, Colombie. "Temperature as a factor determining on Water Electrolysis" [en ligne]. Soutenue en janvier 2014, [consultée le 26/04/20].

<http://www.ijettjournal.org/volume-7/number-1/IJETT-V7P217.pdf>

[32] DEROIN Philippe, *L'Usine Nouvelle*, "Un pilote pour l'électrolyse à haute température" [en ligne]. Publication le 09/10/2008, [consulté le 26/04/20],

<https://www.usinenouvelle.com/article/un-pilote-pour-l-electrolyse-a-haute-temperature.N63261>

Annexes

Annexe A

[33] Figure A-1.[en ligne].

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie#notes>

[34] Figure A-2.1.[en ligne].

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie#notes>

[35] Figure A-2.2.[en ligne].

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie#notes>

[36] Figure A-3.1.[en ligne].

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie#notes>

[37] Figure A-3.2.[en ligne].

STPI2/P6/2020-29

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz%C3%A9ification>

Annexe C

[38] GRELIER Stéphane, GAUDIN Etienne, Editeur : Université de Bordeaux, Unisciel, "Méthode : Calcul de la conductivité d'une solution" [en ligne]. [consulté le 15/04/20].

http://ressources.unisciel.fr/DAEU/chimie/savoir-base/co/calcul_conductivite.html

Annexe F

[39] *Wikipédia*, « Liste de potentiels standards » [en ligne]. Publication le 15/05/09, mis à jour le 07/04/20, [consulté le 16/04/20],

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_potentiels_standard