

## **Production d'hydrogène**



**Etudiants :**

**Adam AFONSO      Ambre DE CRESCENZO**

**Eugénie GUEST      Clara IDZIK**

**Aymeric LE GOFF      Léo Maurouard**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Abdellah HADJADJ**



Date de remise du rapport : 12/06/2021

Référence du projet : **STPI/P6/2021 – 05**

Intitulé du projet : **Production d'hydrogène**

Type de projet : **théorique**

Objectifs du projet :

- Découvrir les moyens de production de l'hydrogène
- Poursuivre le projet de l'année dernière
- L'améliorer de manière à le rendre plus écologique
- Étude de la production d'une électricité verte à l'aide d'un vélo
- Étude des risques de l'hydrogène

Mots-clefs du projet : **électrolyse, banc à hydrogène, écologie**

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Mr Abdellah HADJADJ, notre enseignant et responsable de projet, qui nous a aidés et encadrés pendant notre travail. Son accessibilité, ses conseils et son encadrement nous ont permis d'avoir une vision claire de nos objectifs.*

*Tout au long du projet, il nous a conseillés sur l'orientation que celui-ci devait prendre.*

*Merci également à Mr VIEILLE, Mr MOUTIER, Mr TOURBIER et Mr URVOY pour leur grande aide pour répondre à des questions concernant des aspects mécaniques du problème.*

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. Introduction</b>	<b>8</b>
<b>2. Méthodologie / Organisation du travail</b>	<b>9</b>
<b>3. Différents procédés de production de l'hydrogène</b>	<b>10</b>
3.1. Reformage	10
3.2. Gazéification	11
3.3. Électrolyse	14
<b>4. Risques et chimie de l'hydrogène</b>	<b>16</b>
<b>5. Etude et conception de notre banc à hydrogène</b>	<b>19</b>
5.1. Proposition d'un banc à hydrogène	19
5.1.1. Description des éléments composants le banc	19
5.2. Proposition d'amélioration du banc à hydrogène	21
5.2.1. Modification de la matière du tube	21
5.2.2. Production d'électricité	22
5.3. Calculs théoriques	28
5.3.1. Calculs théoriques sur la vitesse et puissance du vélo	28
5.3.2. Calculs théoriques sur l'électrolyse	34
<b>6. Difficultés rencontrées et perspectives d'amélioration du projet</b>	<b>35</b>
6.1. Difficultés	35
6.2. Limites du projet	35
6.3. Perspective d'amélioration	36
<b>7. Conclusion</b>	<b>37</b>
Annexes	<b>38</b>
Bibliographie	<b>42</b>

## NOTATIONS, ACRONYMES

Constante	Valeur
Constante de Faraday : F	96485 C. mol <sup>-1</sup>
Constante des gaz parfaits : R	8.314 J . K <sup>-1</sup> . mol <sup>-1</sup>
Pression atmosphérique : P <sub>atm</sub>	101325 Pa

Grandeur	Symbole	Unité
Intensité	I	A
Temps	Δt	s
Pression	P	Pa
Température	T	K
Volume	V	m <sup>3</sup>
Masse volumique	ρ	kg . m <sup>-3</sup>
Masse molaire	M	kg . mol <sup>-1</sup>
Reynolds	Re	adimensionnel
Vitesse caractéristique débitante	v	m.s <sup>-1</sup>
Section de la tuyère	S	m <sup>2</sup>
Viscosité cinématique	ν	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Viscosité dynamique	μ	Pa.s
Diamètre de la buse	d	m
Longueur	L	m

Débit volumique	$Q_v$	$m^3 \cdot s^{-1}$
Enthalpie de combustion	$\Delta_c H^\circ$	$J \cdot mol^{-1}$
Avancement de réaction	$\xi$	mol
Quantité de matière (initiale)	$n (n_0)$	mol
Tension	$\Delta E$	V/ESH
Potentiel à l'anode (cathode)	$E_{a^0} (E_{c^0})$	V/ESH
Concentration de l'espèce i	$C_i$	$mol \cdot m^{-3}$
Conductivité	$\theta$	$S \cdot m^{-1}$
Conductivité molaire ionique de l'espèce i	$\lambda_i$	$S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$
Nombre d'électrons	$Z(e^-)$	adimensionnel
Quantité de charges	$Q$	C
Diamètre	$\varnothing$	m

## 1. INTRODUCTION

L'hydrogène est le plus petit atome de l'univers et il est l'élément, de loin, le plus abondant. L'hydrogène compose 75 % de la masse de l'univers et 92 % du nombre d'atomes. Il est notamment associé à l'oxygène dans l'eau et au carbone dans une immense majorité des molécules organiques. La molécule qui nous intéresse tout particulièrement est la molécule de dihydrogène : deux atomes d'hydrogène reliés entre eux par une liaison covalente simple.

De l'Antiquité jusqu'au siècle des Lumières, la quasi-totalité des savants sont convaincus que l'univers est constitué de quatre éléments : l'eau, la terre, l'air et le feu. Néanmoins des doutes commencent à s'installer au XVI<sup>e</sup> siècle, si bien que PARACELSE (philosophe et médecin suisse) se demande si l'air qui se dégage lors de la réaction du vitriol sur le fer est bien identique à l'air que nous respirons. Henry CAVENDISH (physicien et chimiste britannique) reprend les travaux de PARACELSE avec différents métaux et découvre l'existence de l'hydrogène. C'est au XVII<sup>e</sup> siècle que l'on se rend compte que l'hydrogène permet de produire une grande quantité d'énergie et apparaît comme une source énergétique incroyable. En 1783, LAVOISIER donne l'appellation au gaz « d'hydrogène ». Depuis, l'hydrogène a connu de nombreux et diverses utilisations notamment comme gaz pour gonfler les dirigeables. Néanmoins, après l'accident du Hindenburg en 1937 à New York, l'hydrogène est remplacé par l'hélium.

Dans le contexte actuel de la transition énergétique, l'hydrogène présente un véritable intérêt en tant que vecteur énergétique, c'est à dire comme passerelle entre sources primaires d'énergie et usages finaux. L'hydrogène apporte ainsi de nouvelles solutions pour stocker l'électricité, gérer les réseaux énergétiques et se déplacer proprement.

Malheureusement, l'hydrogène n'est pas présent sur Terre à l'état naturel: il faut donc le produire. Actuellement, l'industrie de l'hydrogène utilise essentiellement des méthodes d'extraction à partir de molécules à base de carbone car, à l'heure actuelle, c'est la manière la plus efficace et la moins chère. L'hydrogène produit de cette façon est appelé « hydrogène gris » car les mécanismes de production utilisant des hydrocarbures rejettent du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Dans une optique de développement durable, il est nécessaire de s'éloigner de ces méthodes de production pour s'orienter vers l'hydrogène dit « bleu » à basse émission carbone ou l'hydrogène « vert » dont l'empreinte carbone est nulle. L'hydrogène « bleu » est fabriqué de la même manière que l'hydrogène « gris », à la différence que le CO<sub>2</sub> émis lors de la fabrication est capté pour être réutilisé ou stocké. Cela engendre donc une pollution de l'atmosphère moindre. L'hydrogène « vert », quant à lui, est produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement d'énergie renouvelable. Il s'agit donc de la manière la plus propre de synthétiser l'hydrogène mais malheureusement de nos jours cela ne représente que 2 % de la production mondiale.

Ainsi, aux vues des enjeux écologiques du réchauffement climatique dans le cadre de la transition énergétique, nous avons eu la volonté de produire de l'hydrogène grâce à l'électrolyse de l'eau en utilisant une énergie verte. Cela a été la racine de notre réflexion pour concevoir notre propre version du banc à hydrogène.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Au début du projet, pour bien se familiariser avec le sujet, les premières recherches sur l'hydrogène ont été faites de manière individuelle pour les mettre ensuite en commun en groupe. Nous nous sommes vite mis d'accord tous ensemble sur les points d'amélioration à apporter au projet et les axes importants sur lesquels se focaliser. Très vite, le travail a été réparti par binôme, un binôme travaillant sur les risques et la cinétique de combustion de l'hydrogène et un possible stockage, un autre sur la production d'électricité pour l'électrolyse de l'eau et enfin un dernier qui s'est concentré sur la partie de l'électrolyse de l'eau. Un bilan hebdomadaire en équipe permettait de mettre en commun nos idées, nos recherches et de trouver des solutions à d'éventuels problèmes. Les réunions hebdomadaires avec notre professeur référent, où nous lui présentions nos avancés, nous ont permis d'affiner nos idées et nos recherches grâce à des conseils pertinents, un peu plus chaque semaine. Ces rendez-vous se faisaient essentiellement à distance due à la crise sanitaire. Enfin, la rédaction du rapport et sa relecture ont été réalisées en groupe.

### 3. DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE

Il existe plusieurs procédés pour produire du dihydrogène. Celui-ci peut être obtenu grâce au reformage, à la gazéification ou à l'électrolyse.

#### Hydrogène Production et consommation dans le monde

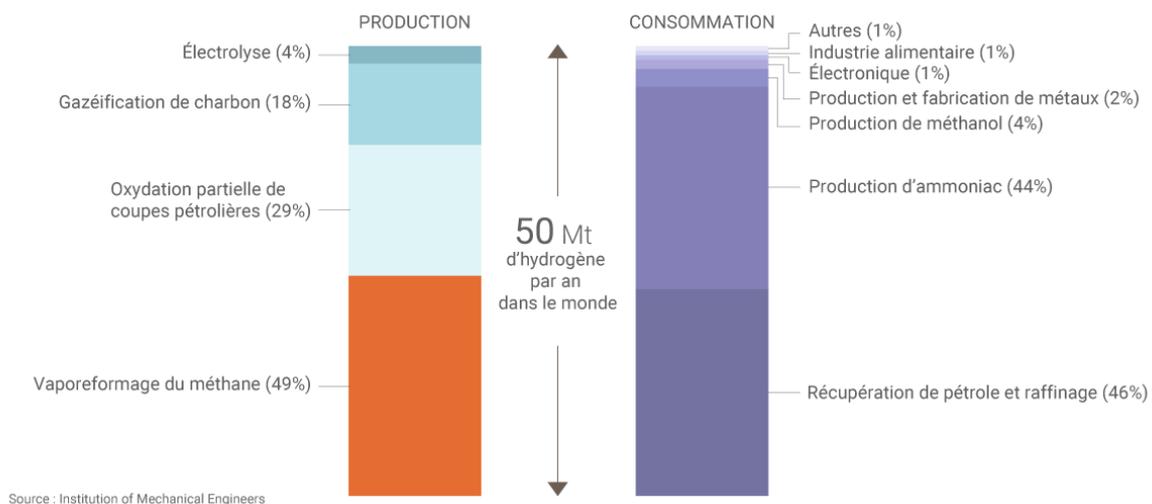


Figure 1: Production et consommation dans le monde

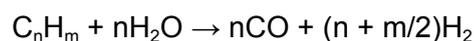
#### 3.1. Reformage

Le reformage est une méthode consistant à casser les molécules d'hydrocarbures afin d'en récupérer l'hydrogène. C'est la méthode la plus couramment utilisée dans la production d'hydrogène aujourd'hui. Le reformage peut se subdiviser en 2 grandes méthodes : le vaporeformage et l'oxydation partielle.

##### Le vaporeformage

Le vaporeformage d'hydrocarbures est le procédé industriel le plus couramment utilisé puisque le plus économique. Cette technologie repose sur la réaction d'hydrocarbures (le plus souvent du méthane) en présence de vapeur d'eau et de chaleur. En effet, le vaporeformage du méthane représente à lui seul 49% de l'hydrogène produit dans le monde en 2015.

La formule générale de la réaction de vaporeformage est la suivante :



Nous devons cependant préciser que cette réaction principale précède des réactions secondaires formant du méthane, du dioxyde de carbone et du carbone.

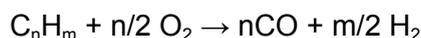
La réaction principale est endothermique. C'est-à-dire qu'elle a besoin d'un apport de chaleur. Elle peut s'effectuer avec un catalyseur pour accélérer la réaction et baisser la température nécessaire. Ainsi, la température est majoritairement située entre 700°C et

1100°C. Le coût de la production d'hydrogène par ce procédé est d'environ 1,5€/kg sachant qu'1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ 3 kg de pétrole. Cependant, le principal inconvénient de ce procédé est qu'il émet 10 kg de CO<sub>2</sub> par kg de dihydrogène produit.

### Oxydation partielle:

L'oxydation partielle est un procédé technologique pouvant s'effectuer sur du gaz naturel, des fractions plus lourdes de pétrole, du charbon ou de la biomasse. Cette méthode est une combustion d'hydrocarbure en présence d'air afin de produire un gaz de synthèse riche en H<sub>2</sub>. Il faut cependant veiller à réaliser cette combustion en défaut d'oxygène afin d'éviter une combustion complète. Cette réaction est exothermique, c'est-à-dire qu'elle émet de la chaleur, et ne nécessite pas de catalyseurs. L'oxydation partielle de coupes pétrolières représente 29% du dihydrogène produit dans le monde en 2015.

La formule de la réaction principale est la suivante :



Nous devons préciser qu'après cette réaction principale, se produisent, à température très élevée, des réactions secondaires comme l'hydrocraquage. Le rendement énergétique de ce procédé est compris entre 53 et 67%. L'oxydation partielle est plus coûteuse que le vaporeformage et n'est donc utilisée que dans certains cas définis :

- fournir des gaz de synthèse avec un ratio H<sub>2</sub>O particulier utile à la pétrochimie.
- lorsque les hydrocarbures légers sont indisponibles ;
- pour détruire des résidus d'hydrocarbures lourds peu valorisables.

Les conditions de production sont également plus contraignantes. En effet, l'oxydation partielle nécessite une température comprise entre 1200°C et 1500°C associée à une pression comprise entre 20 et 90 bars. Enchaînons maintenant, sur une technique se basant sur une transformation solide-gaz, la gazéification.

### 3.2. Gazéification

La gazéification de l'hydrogène consiste à transformer un matériau solide riche en carbone, hydrogène et oxygène, en un gaz appelé syngaz. Le matériau choisi peut être de la biomasse ou un hydrocarbure fossile.

Le but de ce procédé est d'obtenir un gaz riche en monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H<sub>2</sub>).

Ce processus se divise en 4 étapes :

- Le séchage
- La pyrolyse
- L'oxydation

-La réduction

### **Séchage:**

Le matériau est chauffé entre 100 et 160°C pour éliminer toute humidité. Le palier maximum d'humidité autorisé en entreprise est autour des 10%. Avant de l'introduire dans le gazéificateur, une phase de broyage est nécessaire pour réduire la granulométrie entre 2 et 50 mm selon le type de gazéificateur.

### **Pyrolyse:**

La pyrolyse consiste à faire chauffer la matière sèche obtenue, entre 120 et 600°C et à pression atmosphérique, en l'absence ou présence infime d'oxygène.

Il existe deux types de pyrolyse :

-La pyrolyse lente aussi appelée carbolysse car à visée de production majoritaire de charbon. La période de chauffage s'étale sur plusieurs heures voire jours et se fait à des températures avoisinant les 400°C. On obtient un rendement de 30% de carbone.

Deux techniques de production sont utilisées en industrie pour fournir de l'énergie, Batch et Continu, qui aujourd'hui industrialisées, permettent de contrôler le taux d'oxygène introduit. Ces procédés sont autothermiques : on utilise une partie des gaz émis pour entretenir la production.

La plus grande différence réside dans le temps de séjour de la biomasse, allant de plusieurs jours à plusieurs minutes respectivement.

-La pyrolyse flash, qui consiste à chauffer sur un temps plus court, quelques minutes, et à une température plus élevée, entre 500 et 1200°C, la matière sèche. Cette technique donne cependant plus de liquide et de gaz que de charbon.

On obtient ainsi à la fin plusieurs types de produits :

-Le "coke" du "char", un solide presque exclusivement composé d'atomes de carbone

-Un gaz non condensable composé principalement de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>. Le CO et l'H<sub>2</sub> composent à eux seuls 80% de ce gaz, et sont formés par craquage homogène puis reformage dans une atmosphère toujours pauvre en oxygène.

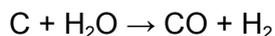
-Un gaz condensable composé principalement de l'H<sub>2</sub>O restant et de goudron, des chaînes hydrocarbonées longues

### **Oxydation:**

L'oxydation consiste à introduire de l'oxygène dans une combustion comprise entre 1200 et 1500°C. Cette étape génère suffisamment de chaleur pour les autres étapes du cycle car très exothermique. Le choix du gaz oxydant va déterminer le PCI, le Pouvoir Calorifique Inférieur, des gaz.

**Réduction:**

La réduction consiste à réduire la vapeur d'eau et les gaz obtenus avec la coke formée précédemment. En l'absence d'oxygène, à des températures entre 800 et 1200°C, la vapeur d'eau se réduit en H<sub>2</sub> et les gaz en CO selon les réactions prépondérantes suivantes:



Cette étape sera d'autant plus rapide que la température est élevée.

Le gaz obtenu à la fin de cette étape correspond à notre gaz de synthèse.

En sortie du gazéificateur, les gaz sont à une température de 500°C. Il est donc nécessaire de les refroidir, avant de les épurer en retirant les produits annexes comme le goudron.

**Plusieurs gazéificateurs:**

Il existe plusieurs types de gazéificateurs :

-Lit fixe

Le combustible est sous forme d'une couche épaisse qui va se déplacer au fil des étapes. La granulométrie est entre 7mm et 50mm. Deux systèmes existent : co-courant et contre-courant. Pour le co-courant, l'air et le combustible sont injectés depuis le haut du gazéificateur, alors que pour le contre-courant, seul le combustible est injecté par le haut. L'air est injecté par le bas. Le syngaz s'obtient respectivement, en bas du gazéificateur et en haut.

Les deux technologies sont cependant limitées à de faibles quantités de biomasse injectée, entre 500kg/h et 4t/h respectivement.

-Lit fluidisé

Le combustible, sous forme de fines granules, est parcouru par un courant d'air de bas en haut pour améliorer les échanges thermiques. La granulométrie est entre 2mm et 5mm. Dans le cas d'un lit dense, (1-2m/s) il n'y a pas d'entraînement du lit. Dans le cas d'un lit circulant, (4-6 m/s), le combustible est entraîné. Il faut donc un système de filtre pour éviter que le combustible ne se mélange avec le gaz de synthèse. Dans le cas d'un lit entraîné (6m/s minimum), le combustible est pulvérisé dans les gaz réactifs à grande vitesse et est brûlé à très hautes températures, entre 1200°C et 1500°C. Cependant, cette technique requiert une granulométrie encore plus basse, de l'ordre de 100 µm. Terminons maintenant cette explication des différents moyen de produire de l'hydrogène par la technique qui nous intéresse, l'électrolyse de l'eau

### 3.3. Électrolyse

#### Électrolyse alcaline

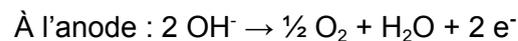
L'électrolyse alcaline est l'électrolyse la plus utilisée dans l'industrie. (68% à 77% de rendement selon une étude d'EDF<sup>1</sup>).

Dans une électrolyse alcaline, on y place une solution d'hydroxyde de potassium ou potasse pour l'électrolyte. L'hydroxyde de potassium est composé des ions  $K^+$  et  $OH^-$  qui peuvent assurer la conduction.

La cathode est composée d'acier nickelé ou de nickel. L'anode est composée de nickel ou d'acier doux. Très rarement, on peut choisir de placer des électrodes en cobalt, plus résistants face à la corrosion engendrée par la base forte qu'est l'hydroxyde de potassium. Un diaphragme est placé entre les deux électrodes. Il a comme propriété de ne pas laisser passer les gaz, mais de laisser le passage aux ions et à l'eau. Ce diaphragme sert à séparer les gaz produits à la fin de l'électrolyse, soit l'oxygène et l'hydrogène.

La température est comprise entre 60-80°C à une pression de fonctionnement inférieure à 30 bars.

Il s'y passe alors les réactions suivantes :



On peut donc voir que l'hydrogène est produit à la cathode. Si en théorie, il ne s'y produit que de l'hydrogène pur, en pratique des impuretés viennent se mêler à l'hydrogène. Il faut donc traiter le gaz à la fin de l'électrolyse, pour atteindre un degré de pureté supérieur à 99%.

#### Électrolyse à haute température

L'électrolyse à haute température (HTE) se caractérise donc par l'utilisation de températures bien plus élevées que l'électrolyse alcaline, entre 700-800°C. L'un des avantages de cette électrolyse est qu'elle utilise l'énergie apportée par de l'électricité, mais aussi celle apportée par la chaleur. Ainsi, on peut augmenter la température pour réduire l'apport d'électricité et donc, augmenter le rendement et diminuer les coûts. On estime un rendement de 90%<sup>2</sup> pour ce type d'électrolyse.

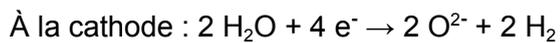
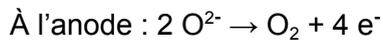
Enfin, l'un des derniers avantages est qu'on peut directement utiliser la chaleur fournie par la réaction d'électrolyse car elle est exothermique. Les électrodes sont en céramique, un matériau qui résiste bien aux chaleurs élevées.

<sup>1</sup> [Électrolyse et pile à combustible : l'hydrogène vert à de l'avenir – EDF Entreprises](#)

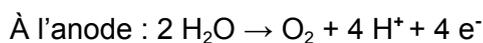
<sup>2</sup> [Hydrogène, un rendement de 90 % sur un système d'électrolyse du CEA \(techno-science.net\)](#)

L'électrolyte va influencer sur la réaction qu'on peut observer :

Électrolyte à conduction d'ions superoxydes :



Électrolyte à conduction protonique :



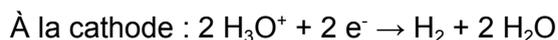
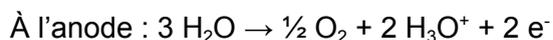
Pour le premier, l'électrolyte est en céramique en zircone. Pour le second, l'électrolyte est en oxydes de cérium et de zircone.

### Électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons

L'électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEM pour Proton Exchange Membrane) se différencie par l'usage particulier de sa membrane. En effet, celle-ci est constituée de polymères capables de laisser passer les ions  $\text{H}^+$  de l'anode à la cathode. Le nom de ce polymère est copolymère de tétrafluoréthylène et de perfluorovinyléther.

L'usage seul de cette membrane permet d'enlever l'électrolyte liquide, ce qui permet de réduire la détérioration des matériaux due à une électrolyte liquide basique.

L'électrolyse PEM nécessite cependant l'usage de catalyseurs. On peut citer parmi eux le platine et l'iridium.



L'avantage de cette technique est sa faible production de gaz à effet de serre. Cependant, le point négatif majeur de cette technique réside dans son coût élevé à cause de l'usage d'une membrane spécifique, et de ses catalyseurs qui sont en métaux nobles.

De nombreux autres moyens de produire de l'hydrogène sont en voie de développement tels que l'utilisation de cycles thermochimiques ou encore de biomasse agricole. Néanmoins, ces technologies ne sont encore assez matures pour être industrialisées à l'heure actuelle.

#### 4. RISQUES ET CHIMIE DE L'HYDROGÈNE

L'accident du Hindenburg en 1937, nous montre qu'il est indispensable de bien connaître les risques liés aux caractéristiques physiques de l'hydrogène avant de vouloir en fabriquer. Ainsi, dans cette partie nous allons nous intéresser à la physique de l'hydrogène et ses problématiques et si, dans le cas de notre banc à hydrogène, des précautions particulières sont à prévoir. Nous regarderons également le mécanisme réactionnel simplifié de la combustion de l'hydrogène.



Figure 2 : Photographie de l'accident du Hindenburg<sup>3</sup>, 1937

Mais qu'est ce qui fait de l'hydrogène, un gaz si dangereux ?

Dans un premier temps, l'atome d'hydrogène étant le plus petit des atomes et ayant la plus faible masse molaire, le gaz d'hydrogène est aussi le plus léger. En effet, 1 litre de gaz ne pèse que 90 mg à pression atmosphérique (11 fois plus léger que l'air terrestre). De plus, ce gaz à température ambiante possède la plus faible viscosité des gaz. Ses caractéristiques le rendent donc très volatile et de ce fait il y a un risque de fuite très élevé ce qui est très problématique pour notre installation. En outre, il faudra surveiller les raccordements entre les différents organes du banc et les joints associés.

Dans un deuxième temps, l'embrassement du dirigeable nous montre que l'hydrogène est un gaz très inflammable et explosif. Ainsi, regardons ces propriétés et effectuons quelques calculs pour évaluer la dangerosité de notre production :

---

<sup>3</sup> <https://www.pinterest.fr/pin/407153622535773168/>

Propriétés		Hydrogène	Méthane	Essence
Plage d'inflammabilité dans l'air	(vol. %)	4 - 75	5,3 - 15	1,0 - 7,6
Plage de détonabilité dans l'air	(Vol. %)	13 - 65	6,3 - 13,5	1,1 - 3,3
Energie minimale d'inflammation dans l'air	(mJ)	0,02	0,29	0,24
Chaleur de combustion	(kJ/g)	120	50	44,5
Température d'auto-inflammation	(°C)	585	540	228 - 501
Température de flamme	(°C)	2 045	1 875	2 200
Energie théorique d'explosion	(kg TNT/m <sup>3</sup> <sub>gaz</sub> )	2,02	7,03	44,22
Coefficient de diffusion dans l'air	cm <sup>2</sup> /s	0,61	0,16	0,05

Source : Hydrogen, the energy carrier, TÜV Bayern Group

Tableau 1 : comparatif des propriétés de l'hydrogène<sup>4</sup>

Le Tableau 1 recense différentes propriétés de l'hydrogène comparées à celles du méthane et de l'essence. Nous pouvons donc aisément comprendre pourquoi notre gaz est considéré comme étant « extrêmement inflammable ». En effet, son énergie minimale d'inflammation dans l'air est de 20  $\mu$ J (ce qui équivaut à une décharge électrostatique d'origine humaine) ce qui est extrêmement faible. De plus, sa plage de détonabilité étant très large, entre 13 et 65 % en volume dans l'air, la production d'hydrogène apparaît comme très dangereuse à notre échelle. Cependant, est-ce toujours le cas en considérant notre production théorique ?

Pour vérifier cela, effectuons quelques calculs :

Selon nous, notre banc nous permettrait de produire environ 1 ml d'hydrogène par seconde. Nous souhaitons trouver une énergie pour pouvoir la comparer et ainsi, savoir si notre réaction serait dangereuse.

On a  $m(H_2) = \rho(H_2) \times V(H_2)$ . Avec  $\rho(H_2) = 0.09$  g/l

Ce qui nous donne  $m(H_2) = 9 \times 10^5$  g.

Or, le pouvoir calorifique de  $H_2$  est de 143 kJ/g. Ainsi, notre masse de  $H_2$  produite chaque seconde est équivalente à 12.87 J, c'est-à-dire une puissance de 12,87 W.

De plus, le flash d'un appareil photo amateur produit une puissance d'environ 12 W (voir référence 2). Ainsi, si une explosion se produisait dans notre système, elle n'aurait aucun impact sur la sécurité.

Aussi, notre système ayant pour but d'être pédagogique et non productif sera dans la plupart des cas dans des milieux non confinés (taux d'oxygène presque illimité à l'échelle de notre réaction). Ainsi, le pourcentage d'hydrogène dans l'air n'excédera jamais la plage minimale d'inflammation. Ce qui ajoute une sécurité supplémentaire à notre dispositif.

<sup>4</sup> [1373986645SYHydrogene2008.pdf \(developpement-durable.gouv.fr\)](#)

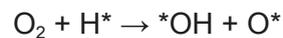
D'autres dangers avec l'hydrogène existent comme la dégradation des métaux et alliages et les réactions avec le chlore. Cependant, ces dangers ne nous concernent pas (réaction avec le chlore) ou très peu (dégradation des métaux). En effet, pour la dégradation des métaux, il faut une exposition continue et longue ce qui ne sera pas le cas de notre installation.

Passons maintenant au mécanisme réactionnel de la combustion d'hydrogène.

**Réaction de combustion de de l'hydrogène** :  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{énergie}$

**Réaction d'initiation** :  $\text{O}_2 + \text{M} \rightarrow 2\text{O}^* + \text{M}$

**Réaction de ramification** :  $\text{H}_2 + \text{O}^* \rightarrow \text{}^*\text{OH} + \text{H}^*$



**Réaction de propagation** :  $\text{H}_2 + \text{}^*\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}^*$

**Réaction de rupture** :  $\text{H}^* + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$

**Réaction de terminaison** :  $\text{}^*\text{OH} + \text{H}^* + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$

Avec M, un partenaire de choc (dans notre montage : le tube en acier).

Les informations sur le mécanisme de la combustion de l'hydrogène sont indispensables pour l'étude de la cinétique chimique afin de déterminer la loi de vitesse et l'ordre de réaction par rapport à chaque réactif. Malheureusement, pour les réactions de combustion il est souvent difficile de trouver les données thermochimiques et les constantes de vitesse car elles sont absentes de la littérature scientifique. Ainsi, l'étude est très complexe à mener et oblige l'utilisation de techniques de chimie assistées par informatique pour obtenir certains paramètres de manière théorique. C'est pour cela que nous n'avons pas pu réaliser d'étude cinétique et que nous vous présentons seulement le mécanisme.

Une fois les risques liés à notre petit atome écartés, occupons-nous de la conception de notre banc.

## 5. ETUDE ET CONCEPTION DE NOTRE BANC À HYDROGÈNE

Pour répondre à la problématique de notre projet, c'est à dire produire de l'hydrogène par le biais d'un banc, nous avons choisi de reprendre le principe du banc à hydrogène de 2019-2020 tout en améliorant certains points comme la source d'énergie électrique utilisée et le matériau du tuyau. Commençons par rappeler ce que nous avons décidé de conserver après étude de notre part.

### 5.1. Proposition d'un banc à hydrogène

#### 5.1.1. Description des éléments composants le banc

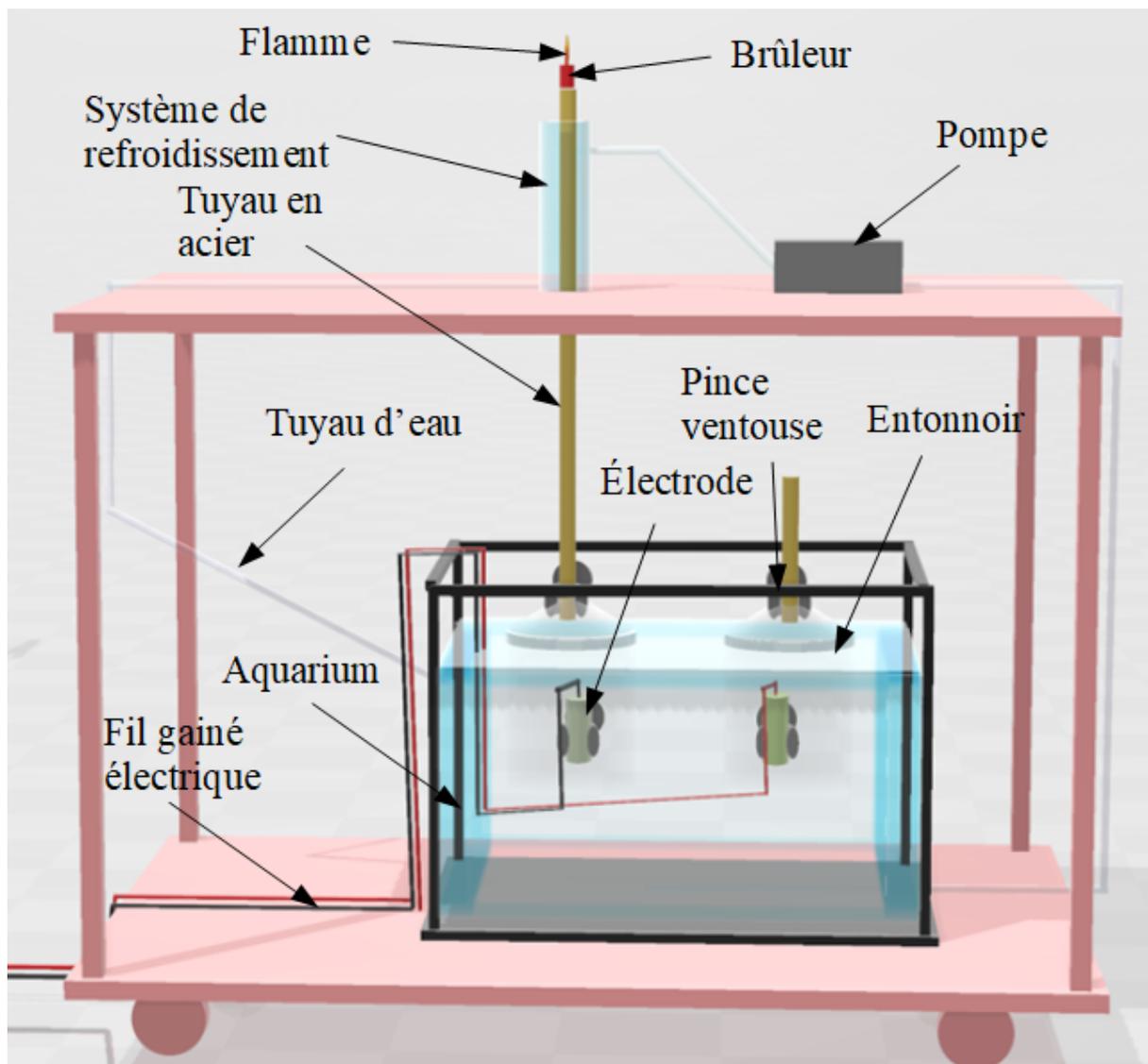


Figure 3 : Aperçu modélisation 3D du banc à hydrogène

En effet, dans le but de concevoir un banc pédagogique transportable, il nous a paru évident de garder le squelette du banc, à savoir le chariot, pour son caractère transportable. La disposition des éléments du banc sera exactement la même (voir figure 3), celle-ci nous

permettant une vision complète et un accès facile aux différentes pièces. Ainsi, notre version du banc fonctionne de la même façon sur le plan de l'électrolyse:

Nous plongeons deux électrodes de graphite, reliées à notre montage électrique par des câbles électriques étanches, dans un aquarium de volume 17.5 L rempli d'une solution aqueuse de sulfate de sodium. Nous les attachons à la paroi par des pinces ventouses. Le graphite ayant plusieurs avantages: ne réagit pas avec la solution aqueuse, insoluble dans l'eau et bon conducteur. Pour capturer l'hydrogène produit à la cathode et l'oxygène à l'anode (qui sera libéré dans l'air car non dangereux), nous plaçons un entonnoir retourné au-dessus de chaque électrode (maintenu par des pinces ventouses collées sur la paroi). Pour produire la flamme, nous relions un tube en acier avec une tuyère en son extrémité à l'entonnoir recueillant l'hydrogène.

Une fois notre production électrique lancée, l'électrolyse s'initie et de l'hydrogène commence à être synthétisé et à monter dans le tuyau pour être brûlé et créer une flamme. Nous considérons qu'une fois le volume de l'entonnoir plus celui du tube en acier rempli par l'hydrogène, un équilibre s'est établi et la flamme pourra être laminaire (débit constant d'hydrogène pour alimenter la flamme). Passons maintenant à quelques précisions sur notre banc:

#### **Protections au retour de flamme:**

Un retour de flamme (descente de la flamme dans la tuyère et le tube) lors de la combustion étant possible, nous plaçons une pelote en fibre de laiton, proche de la sortie du tube, pour bloquer cette flamme (qui brûlera uniquement la pelote).

#### **Jonctions des éléments du banc**

Comme énoncé dans la partie "Risques et chimie de l'hydrogène", L'hydrogène est un gaz extrêmement volatile, il est donc nécessaire que les jonctions des différents composants du banc soient parfaitement hermétiques pour un meilleur rendement et une plus grande sécurité. Les deux liaisons principales et la façon de les étanchéifier sont :

- Entonnoir - tube en acier : colle étanche pour être sûr de combler la moindre interstice.
- Tube en acier-tuyère : soudure car cette partie du tube sera soumise à de fortes températures.

#### **Choix de l'électrolyte**

Dans le but d'augmenter la production d'hydrogène, nous ajoutons à l'eau, un électrolyte, du sulfate de sodium pour une meilleure conductivité ionique. En effet, une meilleure conductivité ionique permet un meilleur échange d'électrons au niveau des électrodes ce qui va donc augmenter le rendement de notre production.

#### **Etanchéité des fils électriques**

Afin d'assurer l'apport en électricité nécessaire pour l'électrolyse, nous relions notre montage électrique, en partant du transformateur, aux électrodes dans notre aquarium par des câbles électriques avec des pinces crocodiles aux extrémités connectés aux bords des électrodes immergés. De plus, pour éviter les dommages aux câbles causés par la solution

aqueuse de sulfate de sodium (et le contact avec l'eau) et par conséquent des courts-circuits, nous allons faire passer les fils dans des gaines, ce qui les protégera tout en assurant un bon fonctionnement du système et en étant peu coûteux. Place maintenant, à la partie amélioration du banc à hydrogène.

## 5.2. Proposition d'amélioration du banc à hydrogène

### 5.2.1. Modification de la matière du tube

La combustion de l'hydrogène dans l'air donne lieu à une flamme quasi-invisible et très chaude d'une température de 2045°C. Il est donc nécessaire d'adapter les matériaux au contact de la flamme en prenant en compte cette contrainte. C'est dans cet optique que nous avons décidé de changer le matériau choisi par nos prédécesseurs, le laiton, pour de l'acier pour trois raisons :

- La température de fusion de l'acier est de 1500°C alors que le laiton 900°C.
- La température à partir de laquelle l'acier peut être soumis à des distorsions est de 500°C
- L'acier est un métal très bon marché et facilement malléable ce qui nous permet d'avoir une pièce de bonne qualité.

Même si la température propre de la flamme est supérieure à la température de fusion de l'acier, une grande partie de cette énergie thermique est dissipée dans l'air. De plus, il faut prendre en considération que la durée de combustion est relativement courte. Enfin, il est intéressant de constater que la température est moindre sous la base de la flamme.

Malgré tout, par mesure de sécurité, nous avons décidé d'installer un système de refroidissement autour du tube en métal afin de ne pas faire fondre l'acier dans le cas où la flamme serait entretenue plus longtemps. Ce système est simplement composé d'un réfrigérant à eau alimenté en continu par l'eau froide du bassin grâce à une pompe. Cela va permettre de réguler la température du tube par transferts thermiques conductifs entre le métal et l'eau. Par la même occasion, ce dispositif assure une protection physique au tube ce qui élimine complètement les risques de brûlures: ce qui est important pour un banc destiné à être présenté lors de différents événements.

Pour finir, si ce système a pour fonction principale de refroidir le tube d'acier, cela va dans le même temps augmenter la température de l'eau, qui est ensuite relâchée dans l'aquarium. Or, la chaleur de l'eau est un facteur catalytique de la réaction d'électrolyse et va donc favoriser la production d'hydrogène.

Ce dispositif est donc doublement bénéfique pour notre banc car il assure à la fois une sécurité face aux hautes températures de la flamme tout en optimisant la productivité de notre banc à hydrogène.

Passons maintenant au pilier de l'amélioration du banc de l'année précédente (2019-2020).

### 5.2.2. Production d'électricité

Notre objectif principal était de modifier le projet initial (année 2019- 2020) afin de le rendre plus écologique, pour cela nous avons réfléchi à une manière de remplacer le générateur par une production d'électricité verte. Nous nous sommes intéressés à l'énergie solaire, éolienne et hydraulique, mais aucune de ces énergies ne convenait à notre utilisation du banc (tension trop faible, cela nécessiterait la présence de vent ou de soleil à chaque utilisation ce qui n'est pas possible...).

Ainsi nous avons trouvé une autre alternative, et décidé d'utiliser l'énergie mécanique du corps humain. Pour cela nous avons imaginé différents montages mais nous avons choisi de retenir celui qui utilisait les jambes. En effet, les jambes peuvent générer une puissance 5 fois plus importante que les bras. Un montage composé d'un vélo nous permettra de produire de l'électricité en transformant de l'énergie mécanique en énergie électrique grâce au pédalage, pour cela, le montage sera complété par un moteur à courant continu 36V.

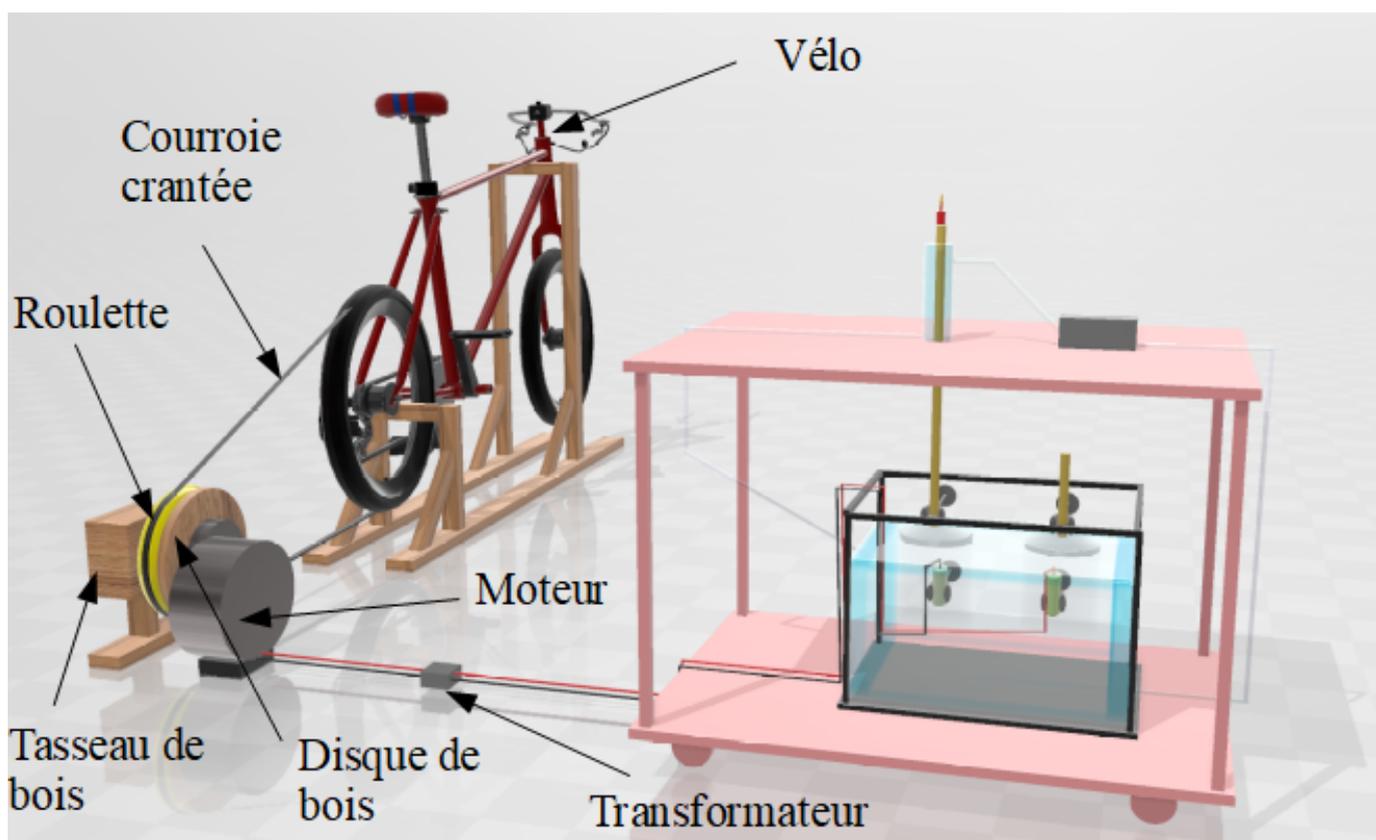


Figure 4 : Aperçu modélisation 3D du banc à hydrogène

(Annexe B)

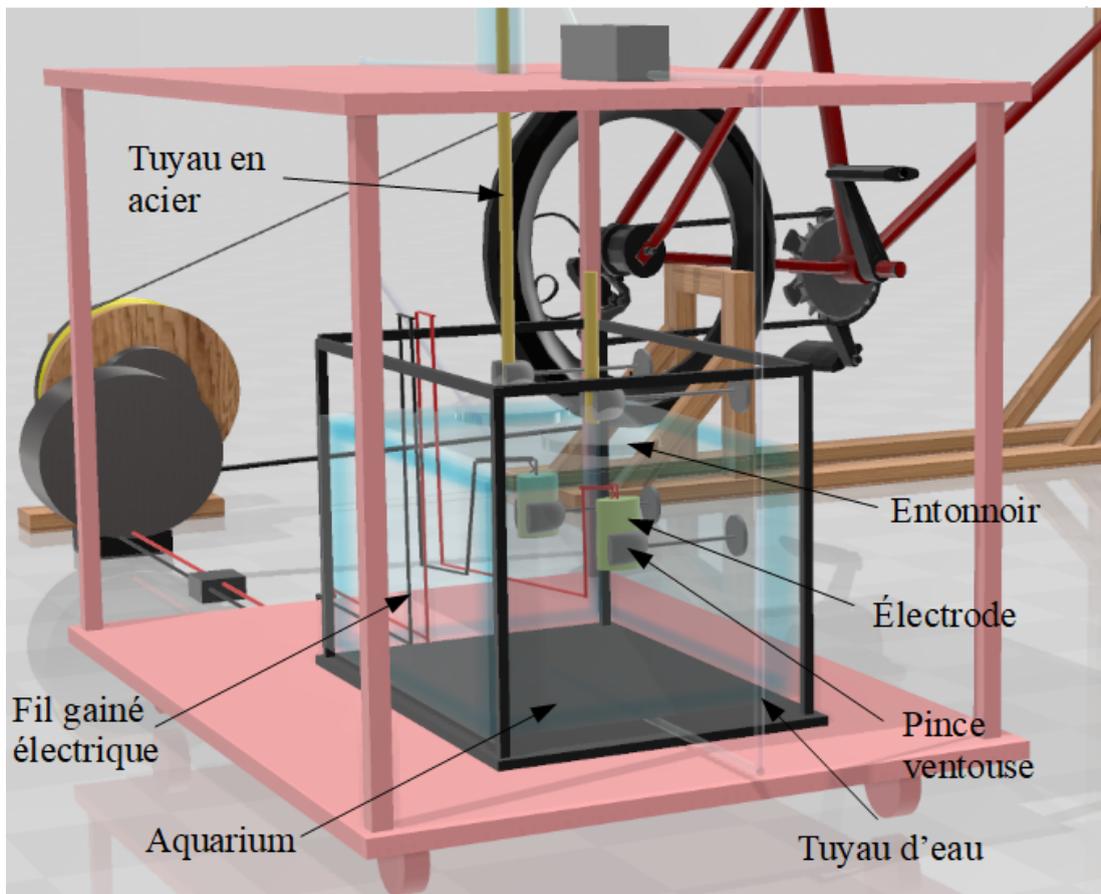


Figure 5 : Aperçu modélisation 3D de l'aquarium

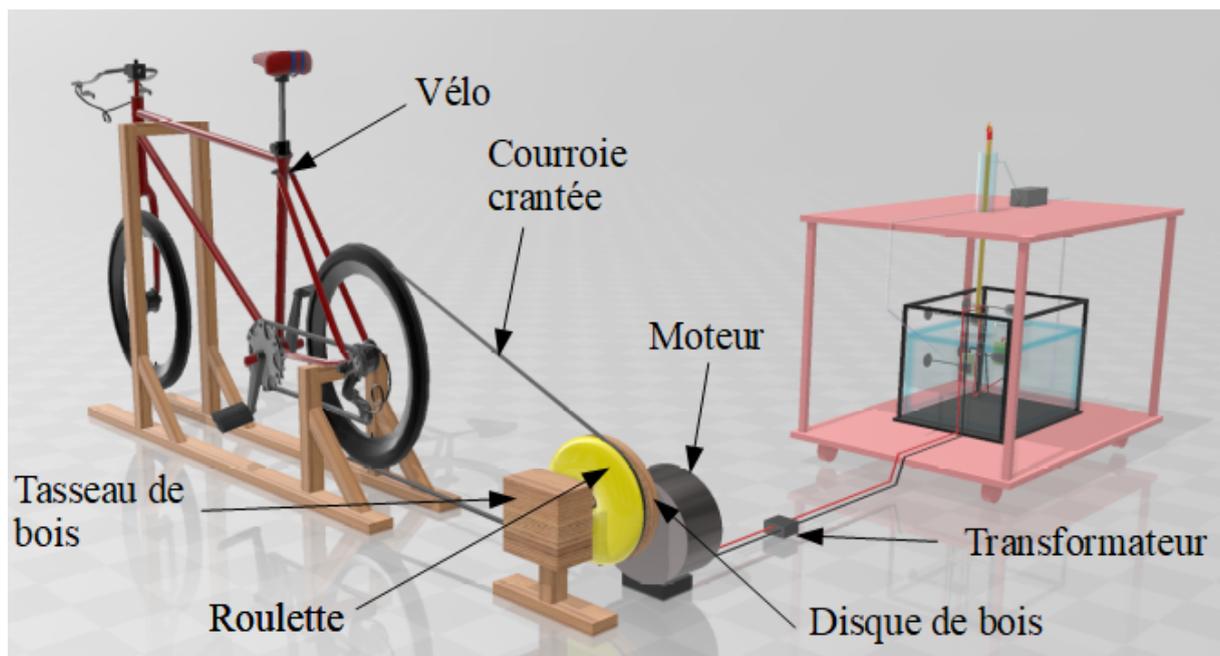


Figure 6 : Point de vue différent du montage

Comme vous pouvez le voir ci-dessus nous avons gardé le chariot du groupe de l'année précédente. Notre vélo et les différents éléments pour pouvoir produire de l'électricité viennent remplacer leur générateur.

Après avoir passé plusieurs semaines à travailler sur un montage utilisant la roulette directement au contact du pneu arrière du vélo, nous nous sommes rendu compte que ce n'était pas forcément la meilleure alternative à notre problème. En effet, en utilisant notre moteur, nous créons un couple électromagnétique qui va entraîner une usure du pneu rapide si le contact pneu/roue est ponctuel. Par conséquent, utiliser une courroie crantée apparaît comme une meilleure alternative et plus adaptée à notre situation. En effet, celle-ci permettrait de limiter cette usure du pneu arrière. Nous allons en plus grâce à cela gagner en puissance (car moins de perte). Cette approche reste théorique et mériterait d'être testée expérimentalement pour avoir des résultats plus précis.

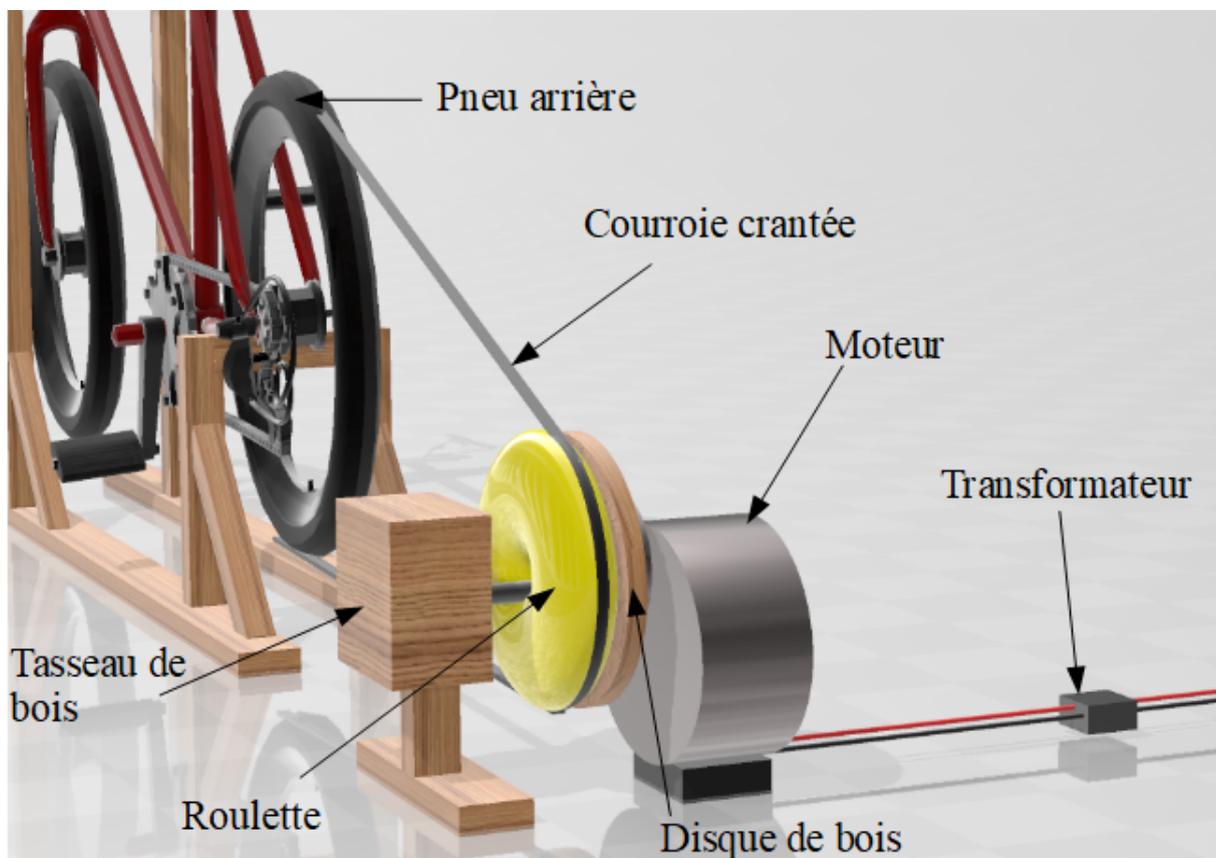


Figure 7 : Aperçu modélisation 3D du banc à hydrogène

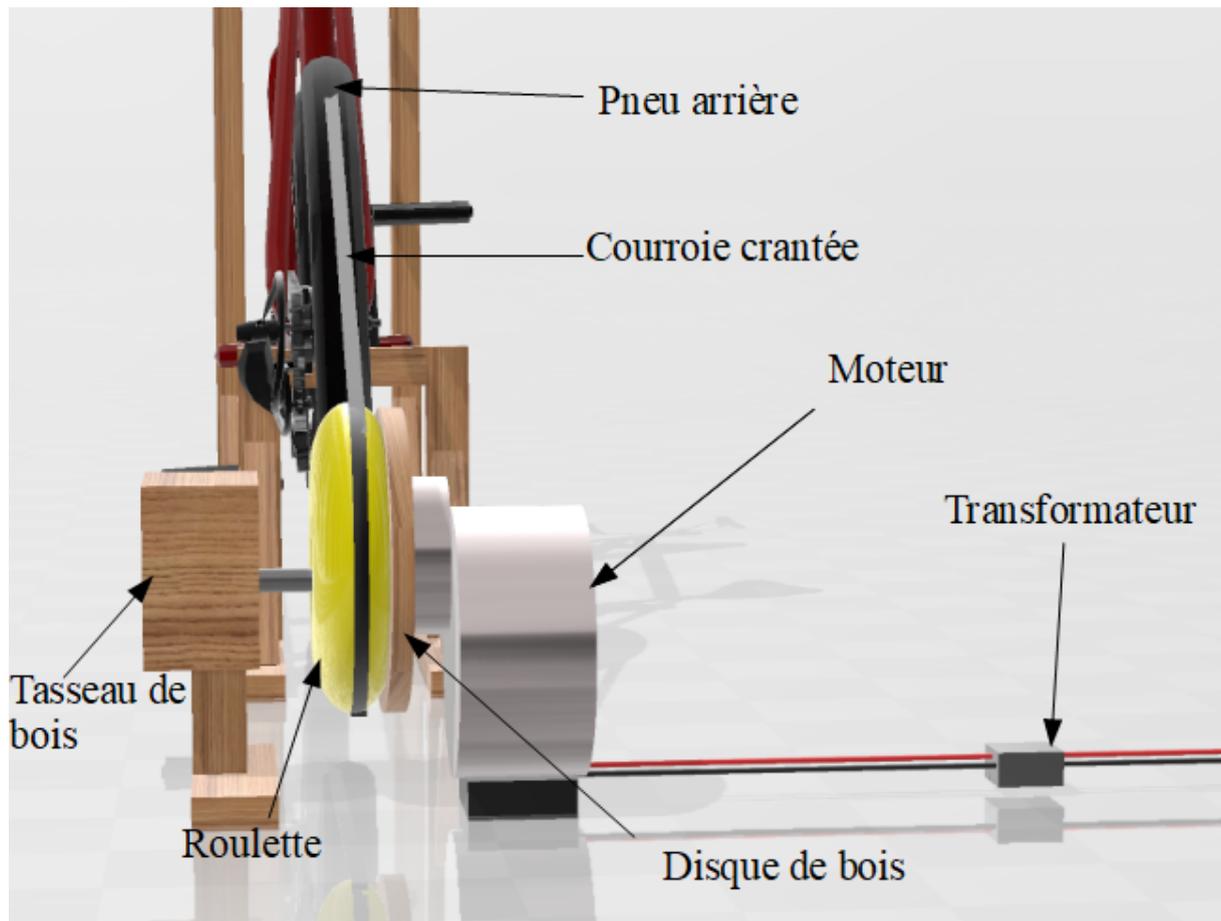
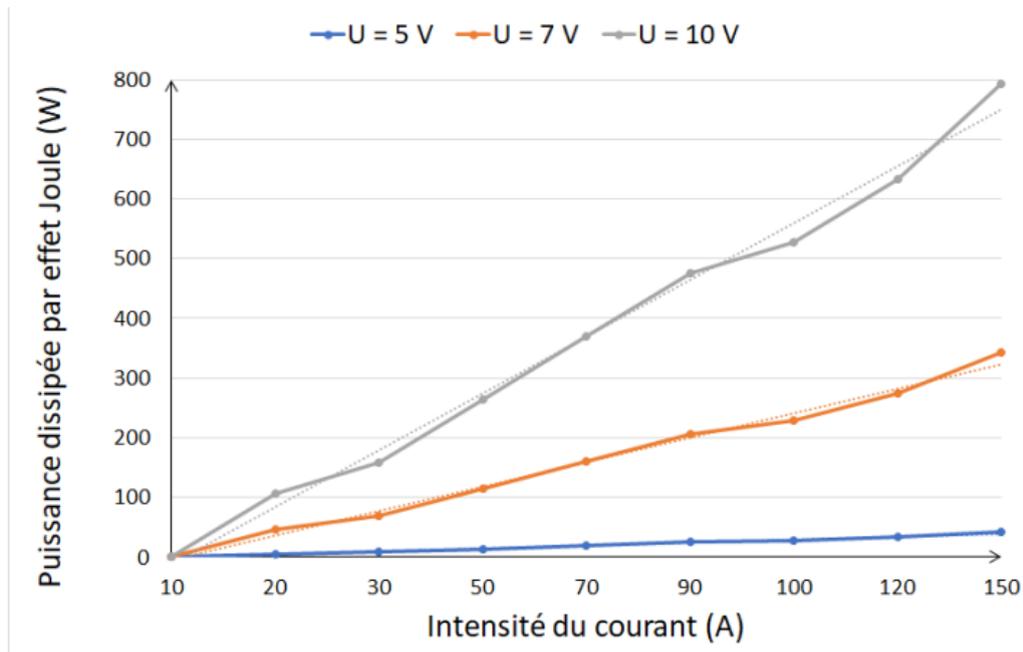


Figure 8 : Point de vue de la chaîne de transmission du montage

Le vélo repose sur des tasseaux de bois qui seront assemblés par des vis à bois permettant ainsi de créer un support pour le vélo, ainsi celui-ci ne sera pas en contact avec le sol et cela limitera les frottements, il sera donc immobilisé et la roue arrière sera surélevée.

#### **Principe de fonctionnement :**

L'utilisateur va pédaler sur le vélo surélevé, cela entraînera une rotation de la roue arrière donc du pneu qui, par l'intermédiaire d'une courroie crantée, va faire tourner une roulette fixée à un disque de bois, lui-même relié au moteur. La force de rotation est transmise avec des vis jusqu'au pignon du moteur. Ainsi l'énergie mécanique produite par le cycliste va être convertie en énergie électrique. Cette énergie traversera ensuite un transformateur qui nous permettra d'ajuster la tension en fonction des besoins du banc à hydrogène. Ce transformateur va permettre d'éviter une perte d'énergie due à l'effet Joule.



Graphique 1 : Graphique représentant la puissance dissipée par effet Joule en fonction de l'intensité

Après plusieurs questionnements au sujet du moteur, nous avons choisi de prendre un moteur 36V, de sortie 250W. Celui-ci paraît le plus adapté à notre montage.

Notre devis (Annexe A) s'élève donc à 272€, ici les outils nécessaires à la construction du montage ne sont pas pris en compte car ceux-ci pourront être empruntés au sein de l'INSA. Cependant, nous pouvons réduire le coût en achetant par exemple un vélo d'occasion pour environ 70€ et utiliser des matériaux de récupération (tasseaux de bois, vis) ainsi le prix peut être estimé à 190 € environ en prenant en compte ces économies. Le générateur présent sur le montage original coûtait 66.66€, ce changement entraînerait une augmentation d'environ 120€ pour ce montage, ce qui reste raisonnable et qui donnerait un coût total du montage (banc compris) de 860€. Cela reste dans notre budget initial de 1000€ et correspond à une évolution de 13,3%. Suite à cette explication sur notre montage électrique, quelques calculs théoriques sur la vitesse et la puissance donnée par le vélo.

### 5.3. Calculs théoriques

#### 5.3.1. Calculs théoriques sur la vitesse et puissance du vélo

Aucune étude tribologique ne nous permet de déterminer avec précision les puissances créées et perdues dans ce montage. En effet, dans ce montage complexe nous sommes face à un cas non linéaire car dépendant de beaucoup de critères. Parmi eux, le poids du cycliste, sa force, la pression des pneumatiques, la nature des matériaux, de la surface de contact. Tous ces critères ne nous permettent que d'estimer les puissances créées et dissipées, ainsi une approche théorique est très complexe. En revanche, une étude expérimentale peut être réalisée à l'aide d'un wattmètre.

D'après les caractéristiques du vélo, nous avons :

- Pignons : 14

- Mono plateau : 38 dents

Dimensions des roues : 700 x 1,7

Calcul du périmètre de la roue :  $2 \times \pi \times r = 2198 \text{ mm}$

Rapport de réduction :  $38 / 14 = 2,71$ . Ce rapport est ce que l'on appelle le braquet.

$2198 \times 2,71 = 5956 \text{ mm}$  soit 5,9 m (environ 6m)

En d'autres termes, si on laissait le vélo mobile, la distance parcourue pour un tour de manivelle avec des roues de 700 mm, un plateau de 38 dents et un pignon de 14 dents est de 5,9 mètres.

Nous allons adopté les notations suivantes pour poser l'étude :

- indice 'p' pour le pédalier

- indice 'r' pour la roue

- indice 'a' pour l'alternateur final

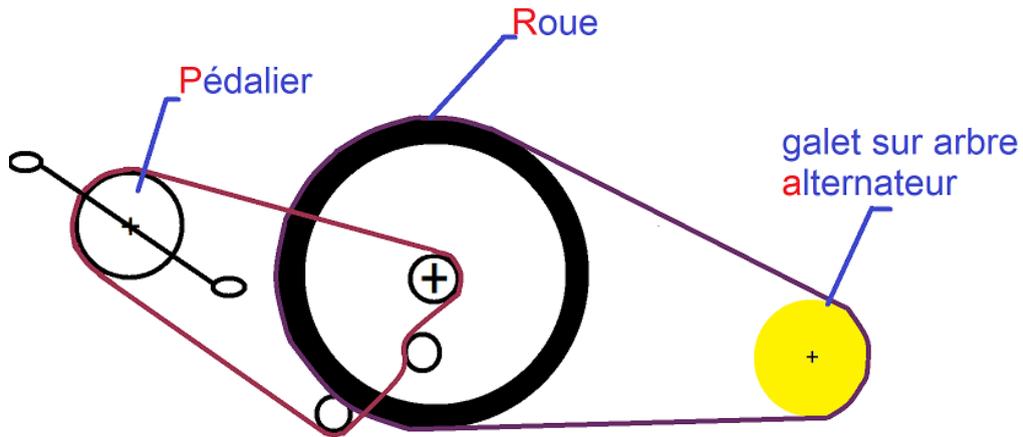


Schéma 1 : Schéma simplifiée de la chaîne de transmission

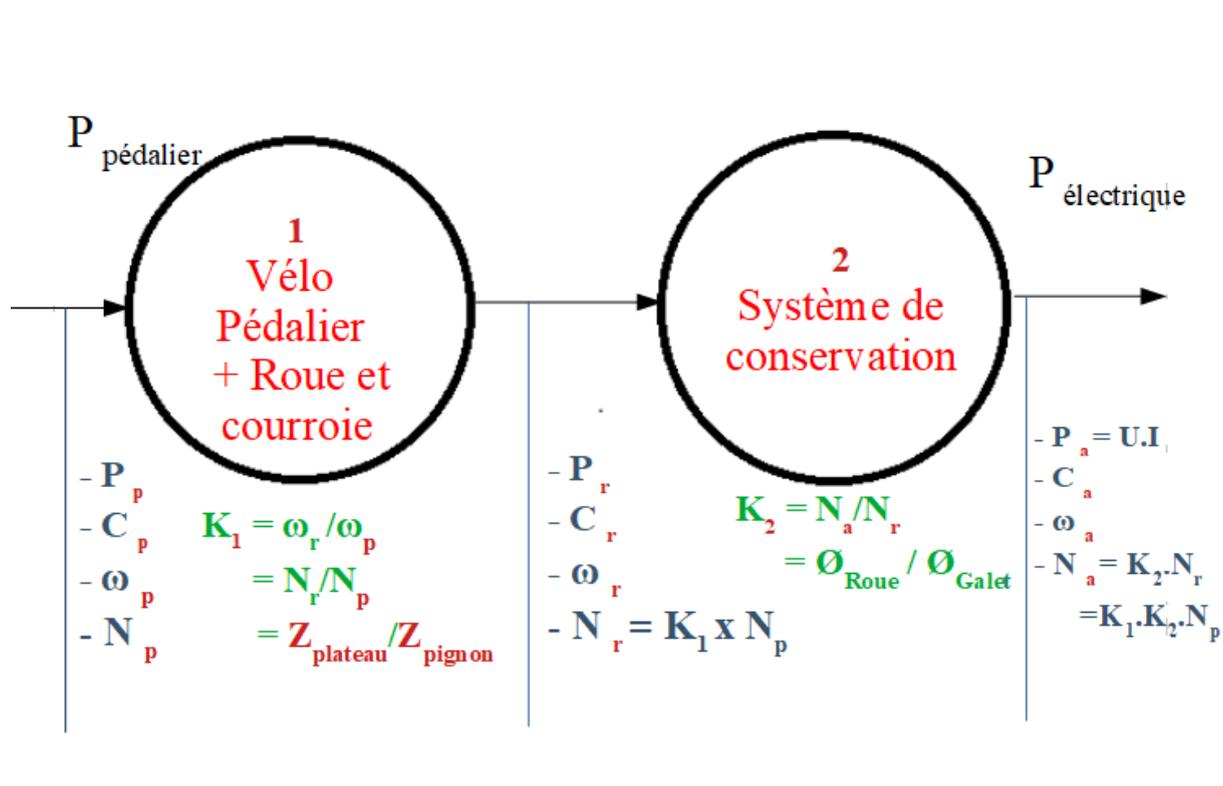


Schéma 2: Bilan énergétique

Les relations régissant ce problème sont celles des vitesses de rotation  $N_i$  listées ci-dessus ainsi que celles établissant les relations entre les couples, elles découlent des relations de rendement :

$$\eta_1 = P_R / P_p = C_R \times \omega_R / C_p \cdot \omega_p = k_1 \times C_R / k_1 \quad (1)$$

on a la même chose

$$\eta_2 = f(C_a, C_R \text{ et } k_2) \quad (2)$$

Nous cherchons à évaluer la puissance  $P_R$ , puissance produite par le vélo au niveau de la roue motrice.

On sait que:

$$P_R = C_R \times \omega_R \quad (3)$$

Avec  $C_R$  le couple en Newton et  $\omega_R$  la fréquence de rotation de la roue de notre vélo.

On peut évaluer  $\omega_R$  pour une vitesse moyenne de 30 km/h car de manière générale c'est la vitesse moyenne d'un cycliste qui roule sur du plat. [39]

Si  $V = 30 \text{ km/h} = 30/3,6 \text{ en m/s} = 8,33 \text{ m/s}$ ,  $\omega = \omega_{\text{Roue}} = \text{inconnue}$  et  $R = \text{rayon Roue}$ . ( $R = 35\text{cm} = 0,35\text{m}$ )

On réalise l'application numérique :

$$\omega_{\text{Roue}} = V / R = (30/3,6) / 0,35 = 8,33/0,35 = 23,8 \text{ rad/s} \quad (5)$$

$$\text{soit } N_{\text{Roue}} = \omega_{\text{Roue}} \times 60/(2\pi) = 23,8 \times 60/(2\pi) \simeq 227 \text{ tr/min} \quad (6)$$

Or d'après la définition de  $k_1$  (cf. bilan énergétique) :

$$k_1 = N_R / N_P = Z_{\text{Plateau}} / Z_{\text{Pignon}} \quad (7)$$

On déduit ainsi que :

$$N_P = N_R \times Z_{\text{Pignon}} / Z_{\text{Plateau}}$$

$$N_P = \square_{Roue} \times 60/(2\pi) \times Z_{Pignon} / Z_{Plateau}$$

$$N_P = V / R_{Roue} \times 60/(2\pi) \times Z_{Pignon} / Z_{Plateau} \quad (8)$$

La cadence de pédalage  $N_P$  est déterminée par la relation :

$$N_P = \frac{V}{3,6 \times R} \times \frac{60}{2\pi} \times \frac{Z_{Pignon}}{Z_{Plateau}} \quad (9)$$

avec  $V$  représentant la vitesse moyenne en km/h,  $R$  rayon de la roue en m

Pour rappel, d'après les caractéristiques du vélo nous avons :

- Pignons : 14
- Mono plateau : 38 dents

Pour une monte de 38/14 :  $Z_{Pignon} / Z_{Plateau} = 14/38$ , on trouve une cadence de 83.7 tours /minutes.

Cette fréquence est donc donnée à l'endroit du pédalier. Pour retrouver la vitesse correspondante du vélo, il suffit de renverser **(9)**.

On cherche à évaluer la fréquence de rotation de la roue  $\square_R$  et celle du rotor alternateur  $\square_a$ .

$$\square_R = k_1 \times \omega_p = 38/14 \times \square_P \quad (10)$$

$$\square_a = k_1 \times k_2 \times \omega_p = 38/14 \times \varnothing_{Roue} / \varnothing_{Galet} \times \square_P \quad (11)$$

Pour cette partie, il faut recalculer  $\square_R$  car, le 83.7 tr/min est donné au pédalier.

Ainsi on obtient (10) :

$$\square_R = 83,7 \times 2\pi / 60$$

$\square_R = 8.76 \text{ rad.s}^{-1}$  grâce à une conversion (on passe de tours par minute en radians par seconde).

Cependant on ne connaît ni  $C_R$ , ni  $P_R$ . On va donc chercher à déterminer  $P_R$  grâce à un rendement.

Avec  $P_{cycliste}$ , la puissance produite par le cycliste et  $\eta_{chaîne}$ , le rendement de la chaîne de vélo. On sait que le rendement moyen d'une chaîne de vélo est de 0.986. [40]

Ainsi, nous pouvons déterminer la valeur de  $P_R$  grâce à  $P_{cycliste}$ .

$P_{\text{cycliste}}$  dépend du cycliste (poids, musculation,) et ainsi dépendra du cycliste qui pédalera. Une étude basée sur un cycliste précis permettra de calculer cette puissance.

On prend l'exemple ici pour une personne de 65 kg pratiquant le vélo occasionnellement, soit :

$$P_{\text{cycliste}} = P \times Y \quad (12)$$

$$P_{\text{cycliste}} = 65 \times 5 = 325 \text{ W} \quad [41]$$

(Avec  $P$  masse en kilogrammes du cycliste et  $Y$  la puissance moyenne par kilogramme, pour un cycliste expérimenté.)

Ainsi on obtient à l'aide de (12) :

$$P_R = \eta_{\text{ensemble vélo}} \times P_{\text{cycliste}}$$

$$P_R = 0.986 \times 325 = 320.45 \text{ W}$$

Grâce à ce calcul on va pouvoir déterminer le rendement de la chaîne de transmission entre le pneu du vélo et le moteur :

$$P_a = \eta_{\text{ensemble vélo}} \times \eta_{\text{courroie}} \times \eta_{\text{ensemble conversion}} \times P_{\text{cycliste}} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{courroie}} = 0,96$$

En effet le rendement pour une courroie crantée synchrone peut s'évaluer à 0,96. [42]

On cherche à vérifier que la valeur de la vitesse de rotation  $N_a$  et le couple  $C_a$  développés en entrée de rotor correspondent aux caractéristiques du moteur en régime « nominal ».

On sait que :

$$P_a = \omega_a \times c_a \Leftrightarrow c_a = P_a / \omega_a \quad (14)$$

or

$$N_a = 1500 \text{ trs/min}$$

$$\omega_a = 2700 \times \frac{2\pi}{60} = 283 \text{ rad/s}$$

$$C_a = 250 / 283 = 0.883 \text{ Nm}$$

$$k_1 = 38 / 14 \text{ avec } k_1 = Z_{\text{Plateau}} / Z_{\text{Pignon}} = 2,71$$

$$k_2 = \varnothing_{\text{Roue}} / \varnothing_{\text{Galet}} = 0,70 / 0.10 = 7 \quad (15)$$

$$N_a = k_1 \times k_2 \times N_p \quad (16)$$

$$= 2,71 \times 7 \times 83,8$$

$$N_a = 1589 \text{ tr/min}$$

On trouve donc une valeur cohérente avec notre valeur de  $N_a$  pour notre moteur.

On veut vérifier que  $C_a$ , le couple nominal du moteur, soit atteignable pour un athlète moyen. Pour cela on pose  $C_{a'}$ , le couple du moteur théorique qu'un athlète moyen atteint, on veut vérifier que  $C_{a'}$ , atteigne bien la valeur de  $C_a$ , trouvée précédemment. On reprend la formule précédente en remplaçant  $C_a$  par  $C_{a'}$  :

$$P_a = \eta_{\text{ensemble vélo}} \times \eta_{\text{courroie}} \times \eta_{\text{ensemble conversion}} \times P_{\text{cycliste}} \quad (17)$$

or

$$P_a = C_{a'} \times \square_a \text{ donc}$$

$$C_{a'} \times \square_a = \eta_{\text{ensemble vélo}} \times \eta_{\text{courroie}} \times \eta_{\text{ensemble conversion}} \times P_{\text{cycliste}} \quad (18)$$

$$C_{a'} = (\eta_{\text{ensemble vélo}} \times \eta_{\text{courroie}} \times \eta_{\text{ensemble conversion}} \times P_{\text{cycliste}}) / \square_a$$

$$C_{a'} = (0.986 \times 0.96 \times \eta_{\text{ensemble conversion}} \times 320.45) / 283$$

Si on fixe  $\eta_{\text{ensemble conversion}}$  égale à 1 on a ainsi :

$$C_{a'} = (0.986 \times 0.96 \times 1 \times 320.45) / 283 = 1,07$$

or pour rappel  $C_a = 0,883$  donc on trouve une valeur cohérente qui est atteignable pour un athlète moyen.

Or dans la réalité on sait que  $\eta_{\text{ensemble conversion}}$  ne sera pas égale à 1 et sera même inférieur à 1 (frottements, puissances dissipées,...) mais cela fonctionne quand même pour

$\eta_{\text{ensemble conversion}} = 0,83$  ou l'on obtient  $C_{a'} = 0,8896$ .

### 5.3.2. Calculs théoriques sur l'électrolyse

#### Calcul théorique de l'intensité nécessaire au maintien d'une flamme :

Tout d'abord la vitesse de combustion d'une flamme alimentée par du dihydrogène  $V_{\text{comb}}(\text{H}_2)$  est comprise entre 2,65 et 3,25  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Ensuite, le diamètre  $d$  de la tuyère est de 0,65 mm.

On fait l'hypothèse d'une flamme conique.

$$\text{Donc } \frac{dV}{dt} = V_{\text{comb}}(\text{H}_2) \times S = V_{\text{comb}}(\text{H}_2) \times \frac{(d/2)^2}{3}$$

$$\text{Or } \frac{dn(\text{H}_2)}{dt} = \frac{dV}{dt} \times \frac{\rho(\text{H}_2)}{M(\text{H}_2)}$$

$$\begin{aligned} \text{Enfin, } I &= 2F \times \frac{dn(\text{H}_2)}{dt} \\ &= 2F \times \frac{dV}{dt} \times \frac{\rho(\text{H}_2)}{M(\text{H}_2)} \\ &= 2F \times V_{\text{comb}}(\text{H}_2) \times \frac{(d/2)^2}{3} \times \frac{\rho(\text{H}_2)}{M(\text{H}_2)} \end{aligned}$$

Donc, on a  $2,54 \text{ A} < I < 3,12 \text{ A}$ .

Nous avons donc besoin d'une intensité d'au moins 3A pour maintenir la flamme allumée. Le moteur est donc apte à alimenter le banc à hydrogène afin de maintenir une flamme en continu.

## 6. DIFFICULTÉS RENCONTRÉES ET PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION DU PROJET

### 6.1. Difficultés

Au cours de ce semestre nous avons travaillé en groupe dans le but d'améliorer le banc à hydrogène conçu par le groupe de l'année dernière. Cette année encore, nous avons dû aborder ce projet de manière purement théorique à cause du contexte sanitaire.

Les principales difficultés rencontrées étaient l'approche mécanique, le choix des matériaux, le manque de valeurs expérimentales et le travail à distance.

L'approche mécanique était complexe à réaliser, en effet il fallait trouver un moyen de produire de l'électricité compatible avec le banc existant. Un bon assemblage du vélo et du banc était nécessaire afin de le rendre fonctionnel (tension adaptée, ...) Le choix du moteur fut également une difficulté pour nous car la puissance de celui-ci devait être en accord avec la puissance générée par le cycliste sur le vélo.

Le choix des matériaux a également été une contrainte pour nous, ceux-ci devaient pouvoir résister notamment à la chaleur et adaptés au montage.

Notre plus grand défi a été de réaliser le projet avec une approche purement théorique. Aucune expérience n'a pu être effectuée, ainsi nous avons dû réaliser des calculs complexes qui ne reflèteront pas forcément les chiffres expérimentaux. Ces calculs nous ont pris beaucoup de temps et nous ont ralentis alors qu'une approche expérimentale aurait été plus précise et rapide (calculs de puissances).

Le travail à distance a été un frein à l'avancée du projet, nous n'avons pu nous réunir que très rarement à cause des règles sanitaires. Cependant notre organisation en binôme et nos réunions à distance nous ont permis d'avancer efficacement et de réunir nos idées régulièrement, ce qui est indispensable à la réussite d'un travail de groupe.

### 6.2. Limites du projet

Théoriquement, le vélo nous permet d'alimenter le banc à hydrogène mais cela repose sur des calculs purement théoriques et nous ne pouvons pas savoir si en pratique ce montage permettra la création d'une flamme. De plus, nous n'avons pas pu estimer le temps de réaction et donc de pédalage nécessaire à l'obtention d'une flamme sur ce montage. L'étude thermique réalisée repose uniquement sur des résultats théoriques, dans la réalité, un risque de déformation est donc possible, Ajoutons qu'une usure du pneu et des matériaux est envisageable à long terme dans le dispositif. Enfin, nous n'avons pas pu traiter le problème de l'isolation des conduits qui acheminent le gaz, notamment au niveau de la jonction entre l'entonnoir et le tube en acier.

### 6.3. Perspective d'amélioration

Une étude expérimentale permettrait de valider les résultats obtenus à l'aide de nos calculs théoriques. Au niveau du montage mécanique, des wattmètres permettraient de calculer avec exactitude la puissance dissipée par le système mis en place.

Possibilité d'ajouter un réservoir pour l'hydrogène sécurisé qui permettrait de stocker l'hydrogène produit. Cela permettrait d'utiliser le banc à hydrogène sans pédaler simultanément. Cela pourrait être utile notamment lors de présentations du banc.

L'utilisation de matériaux d'occasion ou de récupération permettraient de réduire les coûts du projet mais également le rendre plus écologique.

Une étude sur les réactions secondaires possibles suite à la combustion du dihydrogène serait pertinente.

## 7. CONCLUSION

L'objectif de notre projet était d'améliorer le banc à hydrogène conçu l'année dernière (année 2019- 2020), notamment de le rendre plus écologique mais aussi de nous familiariser avec les différentes méthodes de production de l'hydrogène et les risques qu'il peut présenter. Nous avons donc décidé de changer le mode de production d'électricité initial pour le rendre plus vert et plus ludique. 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. Ce projet s'affirme donc comme une perspective inédite d'amélioration du projet précédent. L'enjeu final étant d'aboutir, dans le futur, à sa réalisation.

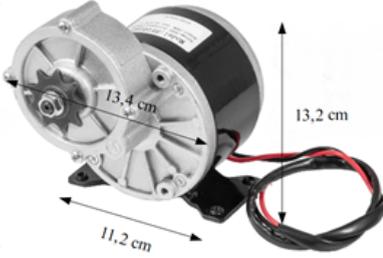
Pour poursuivre l'étude de ce banc à hydrogène, nous suggérons une étude tribologique plus approfondie: frottements entre les matériaux, surfaces de contacts, usures et d'envisager l'utilisation d'autres matériaux permettant de réduire les pertes d'énergie tout en respectant l'aspect économique. De plus, le stockage de l'hydrogène pourrait être une bonne perspective de recherche et si cela est possible et adapté, de le mettre en place.

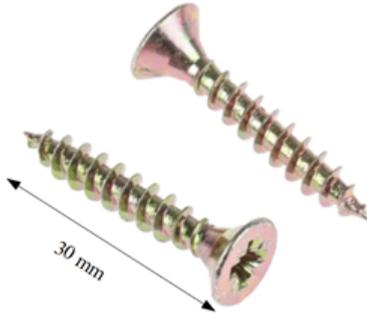
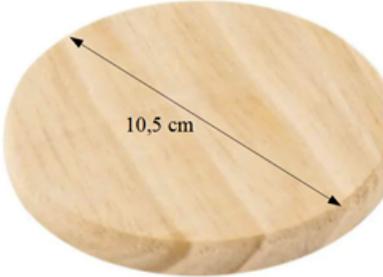
Ce travail de groupe nous a permis d'appliquer concrètement nos connaissances scientifiques apprises tout au long de notre cursus, mais également de travailler en groupe. Par conséquent nous avons pu exposer à chacun nos différentes idées, nos points de vue, les démarches que l'on pourrait aborder. Ce projet, basé sur un travail en autonomie, nous a permis de chercher des solutions à un problème posé, c'était la première fois que nous nous confrontions à la recherche et développement. On a mis en commun la réflexion de tous les membres du groupe pour un objectif commun, ce qui représente également une des tâches primordiales que nous devons acquérir pour construire l'identité des ingénieurs que nous serons demain.

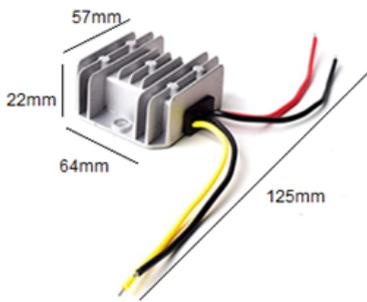
Au terme de cette étude nous avons réussi à imaginer une méthode de production d'hydrogène écologique en espérant qu'elle pourra être un jour réalisée dans la pratique pour produire une flamme optimale.

**ANNEXES**

**Annexe A: Devis des matériaux**

Matériaux	Image	Prix	Caractéristiques	lien
Vélo		150€	2 tailles disponibles : Taille M de 1,65 m à 1,80 m Taille L de 1,80 m à 1,90 m	<a href="https://www.decatlon.fr/p/velo-tout-chemin-riverside-100-noir/_R-p-300787?mc=8405298&amp;qclid=EAlaIqobChMImYiN8byv7wIVhRoGAB3yswB1EAQYASABEgKxGvD_BwE">https://www.decatlon.fr/p/velo-tout-chemin-riverside-100-noir/_R-p-300787?mc=8405298&amp;qclid=EAlaIqobChMImYiN8byv7wIVhRoGAB3yswB1EAQYASABEgKxGvD_BwE</a>
Moteur		49.99€	36V, Sortie : 250W. Vitesse nominale : 1 500tr/min.	<a href="https://vevor.fr/products/36v-250w-moteur-a-reducteur-motoreducteur-pour-bicyclette-a-modifie?qclid=Cj0KCQjwPdQDBhCSARIsAEUJ0hM9qCdTTUHN7vX2o4cubIL2BY6k_3Wa6Q4MfrJRQa4ykOGMMI1bYaAo6NEALw_wcB">https://vevor.fr/products/36v-250w-moteur-a-reducteur-motoreducteur-pour-bicyclette-a-modifie?qclid=Cj0KCQjwPdQDBhCSARIsAEUJ0hM9qCdTTUHN7vX2o4cubIL2BY6k_3Wa6Q4MfrJRQa4ykOGMMI1bYaAo6NEALw_wcB</a>
Roulette		9.05€	Diamètre : 100 mm	<a href="https://www.deporvillage.fr/roue-bestial-wolf-pilot-jaune?qclid=Cj0KCQjw0caCBhCIARIsAGAfuy9fGjTf2FmbICEtuG-i0F0P4dIls7dw4QaKlhtVilRPIY4TiUhpqaAhR_EALw_wcB">https://www.deporvillage.fr/roue-bestial-wolf-pilot-jaune?qclid=Cj0KCQjw0caCBhCIARIsAGAfuy9fGjTf2FmbICEtuG-i0F0P4dIls7dw4QaKlhtVilRPIY4TiUhpqaAhR_EALw_wcB</a>

<p><b>100 vis à bois</b></p>		<p>4.73€</p>	<table border="1"> <tr> <td>Longueur métrique</td> <td>30mm</td> </tr> <tr> <td>Taille de filetage</td> <td>5mm</td> </tr> <tr> <td>Forme de tête</td> <td>Fraisée</td> </tr> <tr> <td>Matériau</td> <td>Acier</td> </tr> </table>	Longueur métrique	30mm	Taille de filetage	5mm	Forme de tête	Fraisée	Matériau	Acier	<p><a href="https://fr.rs-online.com/web/p/vis-a-bois/2631921/?cm_mmc=FR-PLA-DS3A-_-google-CSS_FR_FR_Visserie_et_Fixations_Whoop-_(FR:Whoop!)+Vis+%C3%A0+bois-_-2631921&amp;matchtype=&amp;pla-336053083125&amp;gclid=Cj0KCQjw0caCBhCIARisAGAFuMzUkKSKarl0X90n45q2cRphlZgARl1qj6fjLhfPJ_OOVYOE9luac4waAt-EALw_wcB&amp;gclidsrc=a_w.ds">https://fr.rs-online.com/web/p/vis-a-bois/2631921/?cm_mmc=FR-PLA-DS3A-_-google-CSS_FR_FR_Visserie_et_Fixations_Whoop-_(FR:Whoop!)+Vis+%C3%A0+bois-_-2631921&amp;matchtype=&amp;pla-336053083125&amp;gclid=Cj0KCQjw0caCBhCIARisAGAFuMzUkKSKarl0X90n45q2cRphlZgARl1qj6fjLhfPJ_OOVYOE9luac4waAt-EALw_wcB&amp;gclidsrc=a_w.ds</a></p>
Longueur métrique	30mm											
Taille de filetage	5mm											
Forme de tête	Fraisée											
Matériau	Acier											
<p><b>Tasseaux de bois</b></p>		<p>3.93€</p>	<p>40x 60mm -3m</p>	<p><a href="https://www.manomano.fr/planche-bille-lambourde-2865?model_id=4888194&amp;g=1&amp;referer_id=689880&amp;cq_src=google_ads&amp;cq_cmp=11057446537&amp;cq_con=110150695580&amp;cq_term=&amp;cq_med=pla&amp;cq_plac=&amp;cq_net=g&amp;cq_pos=&amp;cq_plt=gp&amp;cq_plt=gp&amp;gclid=Cj0KCQjw0caCBhCIARisAGAFuMxWxLG8B5KsbjEyyVnG2JlQ6HgKlyH0TuiJhb_nJtBLOQtBbURGA3saAomGEALw_wcB">https://www.manomano.fr/planche-bille-lambourde-2865?model_id=4888194&amp;g=1&amp;referer_id=689880&amp;cq_src=google_ads&amp;cq_cmp=11057446537&amp;cq_con=110150695580&amp;cq_term=&amp;cq_med=pla&amp;cq_plac=&amp;cq_net=g&amp;cq_pos=&amp;cq_plt=gp&amp;cq_plt=gp&amp;gclid=Cj0KCQjw0caCBhCIARisAGAFuMxWxLG8B5KsbjEyyVnG2JlQ6HgKlyH0TuiJhb_nJtBLOQtBbURGA3saAomGEALw_wcB</a></p>								
<p><b>Disque de bois</b></p>		<p>2.99€</p>	<p>Diamètre 10.5 cm</p>	<p><a href="https://www.google.com/shopping/product/12640108799887394467?q=disque+de+bois&amp;client=ava&amp;st&amp;sxsrf=ALeKk013C7CUjdY4XjempNNCiLnotySU0A:1615999048034&amp;biw=1536&amp;bih=722&amp;prds=epd:16146242452032724273.prmr:3&amp;sa=X&amp;ved=0a">https://www.google.com/shopping/product/12640108799887394467?q=disque+de+bois&amp;client=ava&amp;st&amp;sxsrf=ALeKk013C7CUjdY4XjempNNCiLnotySU0A:1615999048034&amp;biw=1536&amp;bih=722&amp;prds=epd:16146242452032724273.prmr:3&amp;sa=X&amp;ved=0a</a></p>								

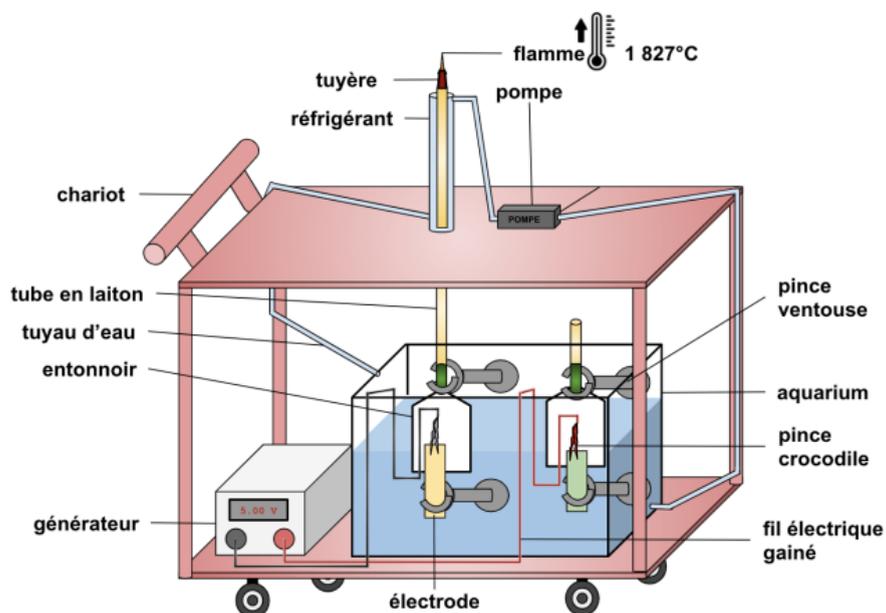
				<a href="https://www.amazon.fr/R%3%A9gulateur-Convertisseur-Adaptateur-Imperm%C3%A9able-%C3%A9lectronique/dp/B07Q98M7QM">hUKEwjD5ujQ4b fvAhUIJhoKHRH nACwQ8gll8Qo</a>
<b>Transformateur</b>		18,99€	Convertisseur abaisseur DC 12V 24V 36V à DC 5V. Plage de tension d'entrée : 8V-40V. Tension de sortie: 5V. Courant maximum 10A 50W.	<a href="https://www.amazon.fr/R%3%A9gulateur-Convertisseur-Adaptateur-Imperm%C3%A9able-%C3%A9lectronique/dp/B07Q98M7QM">https://www.amazon.fr/R%3%A9gulateur-Convertisseur-Adaptateur-Imperm%C3%A9able-%C3%A9lectronique/dp/B07Q98M7QM</a>
<b>Courroie crantée</b>		31,93€	Courroie synchrone Contitech, 2m x 20mm, pas : 8mm, 250 dents	<a href="https://fr.rs-online.com/web/p/courroies-synchrones/4750737?cm_mmc=FR-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_FR_FR_Transmission_de_puissance_m%C3%A9canique_Whoop-_(FR:Whoop!)+Courroies+synchrones-_-4750737&amp;matchtype=&amp;pla-336625783856&amp;gclid=Cj0KCQjw2NyFBhDoARIsAMtHtZ7E1A7nCFIBFFnACR_8aQxa6BBpH6PlisPiBwIYAfnPsIEGHbhwXooaAqsUJELw_wcB&amp;qclsrc=aw.ds">https://fr.rs-online.com/web/p/courroies-synchrones/4750737?cm_mmc=FR-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_FR_FR_Transmission_de_puissance_m%C3%A9canique_Whoop-_(FR:Whoop!)+Courroies+synchrones-_-4750737&amp;matchtype=&amp;pla-336625783856&amp;gclid=Cj0KCQjw2NyFBhDoARIsAMtHtZ7E1A7nCFIBFFnACR_8aQxa6BBpH6PlisPiBwIYAfnPsIEGHbhwXooaAqsUJELw_wcB&amp;qclsrc=aw.ds</a>
<b>Tuyau en acier</b>		3,64€	Tube rond en acier longueur 1 m - épaisseur 1 mm - Ø 8 mm	<a href="https://www.quinaillerie.pro/produit/p240147/tube-rond-acier-vernici-profile-froid-cgfd-longueur-1m-epaisseur-1mm-diametre-8mm?from=landing">https://www.quinaillerie.pro/produit/p240147/tube-rond-acier-vernici-profile-froid-cgfd-longueur-1m-epaisseur-1mm-diametre-8mm?from=landing</a>

**Annexe B: QR-code**



*QR-code à scanner qui vous amène à une vidéo youtube pour découvrir sous tous les angles notre modélisation 3D et notre projet.*

**Annexe C: Projet initial présenté dans le Rapport\_P6\_2020\_29**



## BIBLIOGRAPHIE

### Introduction:

- [1] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>
- [2] <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/vecteur-hydrogene>
- [3] [https://www.youtube.com/watch?v=sqYx8K\\_m9c](https://www.youtube.com/watch?v=sqYx8K_m9c)

### Différents procédés de production de l'hydrogène :

#### Reformage :

- [4] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie>
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Production\\_d%27hydrog%C3%A8ne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d%27hydrog%C3%A8ne)
- [6] [http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche\\_3.1.1\\_production\\_partir\\_de\\_fossiles\\_rév.sept2014\\_ta.pdf](http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_3.1.1_production_partir_de_fossiles_rév.sept2014_ta.pdf)

#### Gazéification:

- [7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse>
- [8] <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/energies-th4/conversion-et-transport-d-energie-42206210/technologie-de-gazeification-integree-a-un-cycle-combine-b8920/cycle-combine-b8920niv10004.html>
- [9] <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-laction/valorisation-energetique/dossier/pyrolyse-gazeification/principes-pyrolyse-gazeification>
- [10] <https://atee.fr/energies-renouvelables/club-pyrogazeification/la-pyrogazeification-comment-ca-marche>
- [11] [https://www.youtube.com/watch?v=2CtdIC2RYoc&ab\\_channel=UVED](https://www.youtube.com/watch?v=2CtdIC2RYoc&ab_channel=UVED)
- [12] [https://www.youtube.com/watch?v=3Mblt\\_HQ0-8&ab\\_channel=UVED](https://www.youtube.com/watch?v=3Mblt_HQ0-8&ab_channel=UVED)
- [13] <https://www.glaesum.nl/en/electron/applications/thermal-cleaning-recycling/batch-pyrolysis-furnace/>
- [14] <https://www.bioenergie-promotion.fr/62964/les-micro-unites-de-cogeneration-par-gazeification-de-bois-en-wallonie/>
- [15] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>

- [16] <https://www.gazeification.info/>
- [17] <https://www.naoden.com/gazeification/>
- [18] <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/energies-th4/conversion-et-transport-d-energie-42206210/technologie-de-gazeification-integree-a-un-cycle-combine-b8920/gazeification-du-charbon-b8920niv10002.html#niv-sl2681068>
- [19] <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>
- [20] <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00271260/document>
- [21] <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752750/document>

### **Électrolyse :**

- [22] <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/dra-71-benchmark-sur-les-electrolyseurs-et-stockage-hydrogene-vf-1469010848.pdf>
- [23] [http://www.fondation-tuck.fr/upload/docs/application/pdf/2015-01/idees-mobilite-\\_01-12-2014-fabien-aupretre.pdf](http://www.fondation-tuck.fr/upload/docs/application/pdf/2015-01/idees-mobilite-_01-12-2014-fabien-aupretre.pdf)
- [24] [https://www.mines-paris.org/global/gene/link.php?doc\\_id=2753&fg=1](https://www.mines-paris.org/global/gene/link.php?doc_id=2753&fg=1)
- [25] <https://www.orygeen.eu/docs-actus/glossaire/hydrogene-vert/>
- [26] <https://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.1%20-%20Electrolyse%20de%20l%27eau%20revjanv2017%20ThA.pdf>
- [27] <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-4-hqe/differentes-technologies-electrolyseur.php>
- [28] [https://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin\\_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/343\\_dec\\_06/PMILLET\\_n343\\_p17-25\\_w.pdf](https://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/343_dec_06/PMILLET_n343_p17-25_w.pdf)
- [29] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Zircone\\_stabilis%C3%A9\\_%C3%A0\\_l%27oxyde\\_d%27yttrium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Zircone_stabilis%C3%A9_%C3%A0_l%27oxyde_d%27yttrium)
- [30] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-de-lhydrogene>
- [31] [Électrolyse et pile à combustible : l'hydrogène vert à de l'avenir – EDF Entreprises](#)
- [32]  [Hydrogène, un rendement de 90 % sur un système d'électrolyse du CEA \(techno-science.net\)](#)

### **Risques de l'hydrogène :**

- [33] [1373986645SYHydrogene2008.pdf \(developpement-durable.gouv.fr\)](#)
- [34] [Fiche 7.1 rev. fev 2015 INERIS BWe PM \(afhypac.org\)](#)

### Température fusion de l'acier :

[35] [http://www.zpag.net/Soudure/1951/Point\\_Fusion\\_Div\\_Metaux.htm](http://www.zpag.net/Soudure/1951/Point_Fusion_Div_Metaux.htm)

[36] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Flamme\\_\(combustion\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Flamme_(combustion))

### Production d'électricité :

[37] <https://www.youtube.com/watch?v=fCa1sWc1LoM&t=101s> (format vidéo)

[38] <https://calculis.net/velo>

[39] [http://christophe.matter.free.fr/construction/\\_private/CI7/TRP/Roues%20de%20friction.pdf](http://christophe.matter.free.fr/construction/_private/CI7/TRP/Roues%20de%20friction.pdf)

[40] [https://www.cder.dz/download/ICRESD07\\_35.pdf](https://www.cder.dz/download/ICRESD07_35.pdf)

[41] <https://www.overrc.com/techniques/generalites/tribologie.htm>

[42] <https://surdeuxroues.org/2016/07/11/vos-performances-comparees-a-celles-des-cyclistes-professionnels/>

[43] <https://www.citycycle.com/25507-comprendre-les-caracteristiques-d-une-chaine-de-velo/#:~:text=Selon%20une%20%C3%A9tude%2C%20une%20cha%C3%A9ne,boue%20ou%20encore%20l%27humidit%C3%A9>

[44] <https://www.velochannel.com/cest-quoi-la-puissance-en-cyclisme-32808#:~:text=entre%20182C6%20et%2020.14%20W%2Fkg%20%3A%20cycliste%20occasionnel>

[45] <https://energie.wallonie.be/fr/transmission.html?IDC=8042&IDD=9767>

[46] [https://reso-nance.org/wiki/projets/velo\\_energie/accueil](https://reso-nance.org/wiki/projets/velo_energie/accueil)

[47] <https://nopanic.fr/le-velo-generateur/>

[48] <https://www.facebook.com/incroyablesExperiences/videos/1743151199030693>

[49] [http://blogs.univ-poitiers.fr/noelbrunetiere/files/2015/12/tribologie\\_brunetiere\\_2016.pdf](http://blogs.univ-poitiers.fr/noelbrunetiere/files/2015/12/tribologie_brunetiere_2016.pdf)

### Calculs théoriques sur l'électrolyse :

[50] [http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%207.1%20-%20Inflammabilit%C3%A9%20R%C3%A9v.%20avril%202020\\_PM.pdf](http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%207.1%20-%20Inflammabilit%C3%A9%20R%C3%A9v.%20avril%202020_PM.pdf)

**Cinétique de l'hydrogène :**

[51] [combustion bas latin combustio -onis de comburere brûler - LAROUSSE](#)

**Sources des illustrations:**

**Figure 1:** <https://www.pinterest.fr/pin/407153622535773168/>

**Figure 2:** [1373986645SYHydrogene2008.pdf \(developpement-durable.gouv.fr\)](#)

**Figures 3 à 8:** Issues de notre modélisation

**Graphique 1:** Rapport de l'année dernière 2019/2020

**Schéma 1 :** Schéma réalisé par nous même

**Schéma 2 :** Schéma réalisé par nous même