

ÉSPÉ Académie de Limoges
Métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation
2eme degré

13 mai 2019

Chimie et conversion d'énergie

**Piles à combustible et chaîne énergétique au Lycée : mise au point,
préparation à l'oral et analyse de situations**



Germouty Julie

Mémoire dirigé par
[Olivier Noguera]
Enseignant chercheur
ESPE



Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Monsieur Olivier Noguera pour m'avoir accordé sa confiance dans cet exercice. Mes remerciements vont également à Monsieur François Reynaud qui a été mon rapporteur durant ces deux années de travail. Enfin, je remercie particulièrement Monsieur Fabien Rémondière qui, non content de suivre mon parcours et mon évolution depuis presque dix ans, m'a beaucoup aidée pour la mise en ligne de ce travail. Il aura donc eu ce rôle particulier d'être un de mes professeurs préférés durant tout ce temps...

Je tiens aussi à remercier chaleureusement ma tutrice Madame Laurence Hilaire qui aura été mon « phare dans la nuit » durant cette année, m'aura donné beaucoup de son temps et fournit des conseils précieux qui me serviront par la suite.

Je ne pourrais aborder le sujet de ce T.E.R sans faire référence à mon binôme de toujours, Monsieur Nicolas Chan-Im-Lim. En effet, ce T.E.R s'est fait en deux temps, la première année un travail bibliographique devait être réalisé à deux et j'ai eu la chance de travailler avec ce personnage atypique. Ce travail n'aurait pas été le même sans lui.

J'aurais notamment appris à réaliser d'excellentes tisanes pour tenir le coup face à la recherche bibliographique et expliquer comment dompter le logiciel Zotero. Ce T.E.R m'aura fait découvrir une amitié enrichissante. J'aurai également mieux compris le dicton « un rire communicatif ». Alors, MERCI pour : m'avoir appris à dire quelques mots en créoles, ces heures de révisions, ces confidences sur les bancs de la Fac'.

De manière plus personnelle, je voudrais remercier une autre personne qui a partagé ces deux années de Master et a donc contribué à la finalisation de ce rapport. Monsieur Jordan Thiais qui a eu la bienveillance de m'épargner dans ses folles expériences et qui ne manquera pas également de me manquer l'année prochaine.

Quant à Madame Isabelle Madrange, je n'ai pas de mots assez forts pour lui exprimer toute ma gratitude. Ce fut un pilier, et l'ESPE serait si vide sans toi.

Merci à Monsieur Jérôme Fatet pour les discussions enrichissantes sur les sciences et la didactique. Merci à Madame Rachida Zerrouki pour nous avoir montré ce que « avoir de la répartie » voulait dire. (« Tranquille sur le Carbone en beta du carbonyle... »)

Merci à ma Famille et mes ami(e)s de m'avoir soutenue dans mes choix, et j'espère qu'ils se feront dès lors moins de soucis pour moi à l'avenir. Mes parents ont tant participé à ce que je réussisse mes projets et là encore je n'ai pas de mots pour les remercier. Merci à ma belle-famille de m'avoir également aidée et soutenue.

Et enfin, un grand merci à celui qui partage ma vie, Mathieu, ma vie serait bien fade sans toi. Merci pour le temps que tu as pris à jouer le relecteur, à m'aider à progresser non pas seulement sur Word, mais aussi sur le plan personnel. (« On met les images dans les tableaux »)



« Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir »
Jules Verne (1874) « L'île mystérieuse » chapitre 11



Table des matières

Introduction	9
1. Les piles	10
1.1. Découverte et invention de la pile	10
1.2. Principe général	10
1.3. Composition d'une pile	11
1.3.1. Réactions mis en jeu	11
1.3.2. La force électromotrice	12
2. Les piles à combustibles (P.A.C.)	13
2.1. Historique.....	13
2.2. Fonctionnement général	13
2.2.1. Réactifs mis en jeux et sécurité	13
2.2.2. Réactions mises en jeux.....	14
2.2.3. Décomposition de l'hydrogène à l'anode	16
2.2.4. Décomposition de l'oxygène à la cathode.....	17
2.3. Les différents types de pile à combustible.....	17
3. Les piles à combustibles PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	19
3.1. Cœur de la pile à combustible PEMFC	19
3.2. Composants de la pile à combustible.....	20
3.2.1. Les électrodes	20
3.2.2. Les couches de diffusion (GDL).....	21
3.2.3. Plaques de diffusion des gaz – Plaques bipolaires	21
3.3. Electrolyte polymère	21
3.3.1. Structure du polymère	22
3.3.2. Conductivité ionique et perméation gazeuse	22
3.3.3. Mécanisme de diffusion des protons dans la membrane	23
3.4. Dégradation des membranes.....	23
3.4.1. Dégradations causées par la présence d'oxydants.....	23
3.4.2. Dégradation thermique	24
3.4.3. Dégradations liées à son utilisation pour l'automobile.....	24
4. Le rendement de la pile PEFMC et ses limites	25
4.1.1. Pertes ohmiques (η_{ohm})	25
4.1.2. Pertes dues à la barrière d'activation (η_{act}).....	26
4.1.3. Pertes dues aux concentrations des réactifs (η_{conc}).....	26
5. Applications et production de la pile	27
5.1. Le domaine automobile.....	27
5.2. Production du dihydrogène	28
5.2.1. Reformage du méthane	28
5.2.2. Alternatives écologiques.....	28
6. Séance a priori	31
6.1. Programme de la 1ère STI2D	31
6.1.1. Rappel du formalisme établi en cycle 4	31
6.2. Déroulement de la séance a priori.....	32
7. Analyse et déroulement de la séance a posteriori	37
7.1. Séance 1 – Séance de réalisation des posters	37



7.1.1. Minutage et ajustement de la séance 1	37
7.1.2. Réception de la vidéo et fiche à compléter	40
7.1.3. Montage au bureau	42
.....	43
.....	43
7.1.4. Réalisation des Posters	44
7.2. La séance d'oral en accompagnement personnalisé	46
7.2.1. Ordre de passage	46
7.2.2. Passage à l'oral	47
8. Remédiation	49
Conclusion	50
Références bibliographiques	51
Table des annexes	53



Table des illustrations

Figure 1 : Modélisation d'une pile réalisée par nos soins	11
Figure 2 : Illustration de la décomposition de l'hydrogène à l'anode	16
Figure 3 : Illustration de la décomposition de l'oxygène à la cathode.....	17
Figure 4 : Modélisation d'une pile PEMFC	19
Figure 5 : Schématisation d'un empilement de PEMFC [9].....	20
Figure 6 : Empilement de PEMFC [9]	20
Figure 7 : Plaque bipolaire commercialisée par Electrographite Carbon Co®	21
Figure 8 : Représentation du Nafion® [12].....	22
Figure 9 : Modélisation du mécanisme de Grotthuss [16].....	23
Figure 10 : Coupe transversale d'une voiture à P.A.C. [21]	27
Figure 11 : Schématisation de l'électrolyse réalisée par une cellule solaire [25]	29
Figure 14 : Modèle P.A.C voiture de chez Jeulin®.....	32
Figure 15 : Document élève.....	33
Figure 16 : Diagramme énergétique mis en jeu	33
Figure 17 : Projection des groupes de travail.....	37
Figure 18 : Copie d'élève sur la fiche à trou.....	41
Figure 19 : Montage au bureau de la P.A.C.....	42
Figure 20 : Notation par compétences et tableau de conversion en note sur 20.....	43
Figure 21 : Exemple du cours donné au préalable.....	44
Figure 22 : Production des élèves durant la séance	45
Figure 23 : Capture d'écran du Quizz	46
Figure 24 : Présentation d'un de leur poster	47
Figure 25 : Poster du groupe 2	48
Figure 12 : Devanture du Lycée Raoul Dautry	55
Figure 13 : Emploi du temps de l'année 2018/2019	56



Table des tableaux

Tableau 1 : Les différents générateurs d'électricité.....	10
Tableau 2 : Activité d'une espèce chimique.....	12
Tableau 3 : Pictogramme de sécurité	13
Tableau 4 : Données thermodynamiques pour 298K [4].....	15
Tableau 5 : Description des étapes de la décomposition de l'hydrogène gazeux.....	16
Tableau 6 : Présentation des différentes piles à combustibles [8].....	18
Tableau 7 : Description des différents éléments de la P.A.C.	20
Tableau 8 : Bulletin Officiel n°3 du 17 Mars 2011	31
Tableau 9 : Jokers disponibles au cours de la séance.....	34
Tableau 10 : Évaluation par compétences.....	35
Tableau 11 : Minutage de la séance à priori	36
Tableau 12 : Minutage de la séance 1 a posteriori	39



Introduction

« La maire de Paris Anne Hidalgo poursuit son combat contre les voitures à moteur thermique. Après les véhicules diesel qui ne seront plus les bienvenus dans la capitale à partir de 2024, l'édile socialiste souhaite également bannir les voitures à essence de la capitale d'ici 2030. Il s'agit de l'un des éléments clés du plan climat à Paris, présenté mercredi 11 octobre 2017. » [1]

Avec l'annonce de ces nouvelles mesures, et, à terme, l'épuisement certain des énergies fossiles aisément accessibles, exploiter et améliorer des énergies alternatives dans le milieu automobile devient capital. Actuellement, le marché des voitures alternatives se compose essentiellement de moteurs électriques équipées de batteries rechargeables sur secteurs ou d'hybrides. Il existe cependant d'autres véhicules, électriques également, utilisant la technologie de la pile à combustible et fonctionnant donc avec de l'hydrogène. Pour le moment, l'offre d'automobile fonctionnant à l'aide de cette technologie est très limitée, seules les Honda Clarity®, Hyundai ix35 Fuel Cell® et Toyota Mirai® animent le marché. Il est à noter que dans certains pays, des prototypes d'autocars fonctionnent aussi avec le même dispositif, avec Carpostal® par exemple. Ces différents véhicules motorisés sont très peu commercialisés et nous pouvons alors parler d'un banc d'essai grandeur nature pour les constructeurs avec à peine une centaine de véhicules en circulation. Ces voitures conduisent à la production d'électricité, de chaleur et d'eau. Le véhicule à pile à combustible ne rejette que de l'eau, ce qui, au final, en fait une alternative « propre » aux véhicules diesel et essence comme toute voiture électrique. Néanmoins, comme nous vous le présenterons plus tard, la production de dihydrogène reste problématique.

Une première partie de ce mémoire sera focalisée sur la présentation de la pile, son histoire et son mode de fonctionnement afin d'appréhender et d'approfondir la compréhension des technologies qui lui sont liées. La partie suivante portera plus particulièrement sur les piles à combustibles avant de concentrer nos recherches sur les piles à combustibles utilisant des électrolytes polymères déjà utilisées dans le milieu automobile. Cette partie se poursuivra par une étude sur la fabrication du dihydrogène et les alternatives écologiques. Enfin, une séance auprès des élèves sur cette thématique sera présentée ainsi que sa critique.



1. Les piles

1.1. Découverte et invention de la pile

En 1786, Galvani, anatomiste italien, avait l'habitude de réaliser des expériences avec des cadavres de grenouilles dont les pattes étaient soumises à des décharges d'électricité statique provoquant ainsi leur tressaillement. Un jour où il en avait accroché une à un fil de cuivre sur son balcon, le vent fit toucher les cadavres de grenouilles au fer du balcon. Les corps des grenouilles se mirent alors à tressaillir, comme s'ils étaient soumis à un choc électrique. Galvani conclut à des forces mystérieuses et à l'existence d'une « électricité animale » provenant des grenouilles [2]. Selon Alessandro Volta, la grenouille ne produit pas l'électricité mais subit cette électricité s'opposant ainsi à la thèse de Galvani. En cherchant à reproduire les observations de Galvani, il s'aperçut qu'il fallait associer deux métaux différents et séparés ceux-ci par une solution aqueuse. Après plusieurs essais avec des solutions et des métaux différents, il construisit dans les années 1800, la première pile en empilant des rondelles de zinc (jouant le même rôle que le fer du balcon de Galvani), de carton imbibé d'eau salée (le rôle des humeurs de la grenouille) et d'argent (le rôle du fil de cuivre sur lequel étaient accrochées les grenouilles). Puis, Volta découvrit que le courant électrique était produit grâce à une réaction chimique qui avait lieu entre les substances constituants la pile [3].

1.2. Principe général

Comme nous pouvons le voir dans le

<i>Générateur</i>	<i>Type de conversion</i>
<i>Pile</i>	Energie chimique → énergie électrique
<i>Centrale thermique</i>	Energie thermique → énergie électrique
<i>Centrale nucléaire</i>	Energie nucléaire → énergie électrique
<i>Centrale hydraulique</i>	Energie mécanique → énergie électrique
<i>Photopile</i>	Energie lumineuse → énergie électrique

Tableau 1, il existe plusieurs types de générateurs permettant la libération d'une énergie électrique. La pile permet de convertir une énergie chimique en énergie électrique. En effet, certaines réactions chimiques libèrent des électrons, permettant ainsi la manifestation d'un courant électrique. Ces réactions sont dites d'oxydoréduction, puisqu'elles mettent en jeu la libération et la captation d'électrons.



Générateur	Type de conversion
Pile	Energie chimique → énergie électrique
Centrale thermique	Energie thermique → énergie électrique
Centrale nucléaire	Energie nucléaire → énergie électrique
Centrale hydraulique	Energie mécanique → énergie électrique
Photopile	Energie lumineuse → énergie électrique

Tableau 1 : Les différents générateurs d'électricité

1.3. Composition d'une pile

Les piles sont composées de deux demi-piles, une que l'on appelle cathode et une autre anode. Les deux compartiments de la pile sont donc chacune composées d'une électrode, immergée dans un milieu adapté donnant lieu à une réaction d'oxydoréduction, et sont séparées par un électrolyte qui assure le passage des ions ou des contre ions entre les deux demi-piles. Les électrons sont récupérés par les électrodes et vont se déplacer du pôle négatif au pôle positif à travers un circuit électrique. La cathode représente le pôle positif, siège de la réduction d'une espèce chimique, l'oxydant. L'anode quant à elle va être le pôle négatif, siège de l'oxydation d'une espèce chimique, le réducteur.

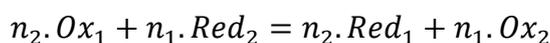
1.3.1. Réactions mis en jeu

Afin de comprendre ce qu'il se produit dans les deux demi-piles, nous allons prendre deux demi-couples :



Cathode (borne +)	Réduction	$Ox_1 + n_1 e^- = Red_1$
Anode (borne -)	Oxydation	$Red_2 = Ox_2 + n_2 e^-$

Il est alors possible d'écrire la réaction globale d'une pile, avec $n_1 \times n_2$ électrons échangés (représentant le plus petit multiple commun entre n_1 et n_2) :



Une écriture symbolique de la pile peut également être utilisée :



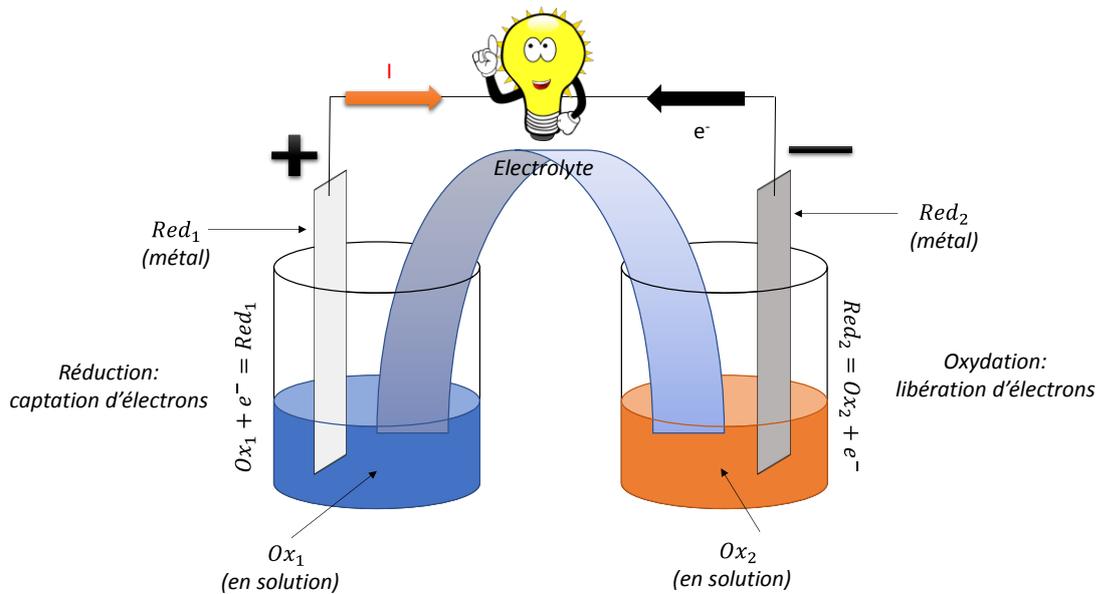


Figure 1 : Modélisation d'une pile réalisée par nos soins

1.3.2. La force électromotrice

La pile délivre une force électromotrice, c'est à dire une tension à vide, qui est due à la différence de potentiel des couples de réaction mis en jeu. Il faut avant tout que le potentiel standard du premier couple soit différent du deuxième couple afin que la pile puisse fonctionner.

Dans certains cas, les couples sont identiques, mais diffèrent par leur concentration, générant une différence de potentiel, et donc une force électromotrice.

La force électromotrice (f.e.m.) peut s'écrire :

$$f.e.m = E_{cathode} - E_{anode} (V)$$

La pile ne délivre cependant pas forcément la valeur de cette différence de potentiel. En effet, il faut également prendre en compte les pertes dues à l'effet joule (résistance interne) ou encore à la surtension (anodique ou cathodique). On peut donc avoir un « écart » entre la valeur théorique et la valeur expérimentale.

Pour déterminer la f.e.m. théorique d'une pile, il est possible de calculer séparément les potentiels à chaque électrode, avec la formule de Nernst [4] :

$$\left\{ E_{\text{électrode}} = E_{\text{couple}}^0 + \frac{RT}{n_1 F} \times \ln \left(\frac{a_{\text{oxydant}}}{a_{\text{réduction}}} \right) \right.$$



Avec E_{couple}^0 le potentiel standard du couple en Volt, a l'activité chimique des constituants du couple, R la constante des gaz parfaits, T la température en Kelvin, F la constante de Faraday et n_1 le nombre d'électrons échangés pour le demi-couple.

État de la matière	Gaz	Liquide	Solide
Activité	$a_{Gaz} = \frac{P_i}{P^0}$ <p>$\left\{ \begin{array}{l} P_i : \text{pression partielle de l'espèce } i \\ P^0 : \text{pression standard, 1 bar} \end{array} \right.$</p>	$a_{liquide} = \frac{C_i}{C^0}$ <p>$\left\{ \begin{array}{l} C_i : \text{concentration de l'espèce } i \\ C^0 : \text{concentration standard, 1 mol.L}^{-1} \end{array} \right.$</p>	$a_{solide} = 1$

Les activités ici sont simplifiées, les gaz sont assimilés à des gaz parfaits, les solutions à des solutions diluées idéales et pour un solide seul dans sa phase.



2. Les piles à combustibles (P.A.C.)

2.1. Historique

Les premiers travaux sont l'œuvre de Christian Fiedrich Schönbein qui va découvrir le principe de la pile à combustible. En 1838, en réalisant l'électrolyse de l'eau, le chimiste allemand découvre "l'effet " pile à combustible. Un an plus tard, en s'aidant des travaux de son ami Schönbein, William Robert Grove réalise la première pile à combustible (avec de l'hydrogène) en laboratoire. L'ingénieur Francis Thomas Bacon va faire progresser la pile à combustible en créant un prototype industriel de puissance. La NASA reprend ensuite la pile à combustible à son compte pour en installer dans ses vaisseaux spatiaux. Il faudra cependant attendre le premier choc pétrolier pour sortir la pile à combustible d'une utilisation exclusive à la conquête spatiale. Le coût des catalyseurs et des membranes freine la recherche qui se met en veille dans les années 1980 avant que, dix ans plus tard, les avancées technologiques et les problèmes environnementaux remettent au goût du jour cette technologie. Les progrès en miniaturisation vont également permettre d'installer cette pile sous le capot des automobiles [5] et ainsi démocratiser son usage.

2.2. Fonctionnement général

Une pile à combustible est un générateur dans lequel la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur, par exemple du dihydrogène, couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que le dioxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur qui est généralement du platine. Bien que d'autres combinaisons soient possibles, la pile la plus couramment étudiée et utilisée est la pile dihydrogène-dioxygène ou dihydrogène-air ; ceci s'expliquant notamment par l'abondance des ressources en hydrogène sur Terre et la facilité de production du dihydrogène [6].

2.2.1. Réactifs mis en jeux et sécurité

H ₂		O ₂	
			

Tableau 3 : Pictogramme de sécurité



2.2.2. Réactions mises en jeux

Un élément de pile à combustible réalise donc la transformation directe de l'énergie chimique d'une réaction, c'est à dire l'enthalpie libre standard de la réaction $\Delta_r G^0$ ¹, en énergie électrique selon l'équation :

$$\Delta_r G^0 + n \times F \times fem = 0$$

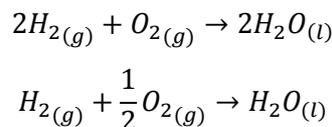
Pour que cette réaction soit possible, il faut $\Delta_r G^0 < 0$, la réaction est alors dite spontanée. Dans le cas de la pile à combustible les couples mis en jeux sont :

$$\begin{cases} H^+/H_2 \\ O_2/H_2O \end{cases}$$

Les demi-réactions sont :

$$\begin{cases} 2H^+ + 2e^- = H_{2(g)} & (1) \\ O_{2(g)} + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O_{(l)} & (2) \end{cases}$$

La réaction se fait entre O_2 et H_2 , pour écrire la réaction bilan il faut mettre en jeu un nombre égal d'électrons. La réaction (1) doit être multipliée par deux :



Nous pouvons alors calculer l'enthalpie libre de la réaction $\Delta_r G^0$ à 25°C en utilisant les enthalpies standards de formation et les entropies standards des espèces chimiques mises en jeu :

$$\Delta_r G^0 = \Delta_r H^0 - T \times \Delta_r S^0$$

Nous pouvons calculer les enthalpies et entropies des réactions à partir des formules suivantes :

$$\begin{cases} \Delta_r H^0 = \sum_i v_i \times \Delta_f H^0_i \\ \Delta_r S^0 = \sum_i v_i \times S^0_i \end{cases}$$

Avec v_i le coefficient stœchiométrique algébrique.

$H_{2(g)}$	$O_{2(g)}$	$H_2O_{(l)}$
------------	------------	--------------

¹ L'état standard d'un composé chimique pur est défini sous la pression standard : $P^0 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$. Pour l'état gazeux il s'agit de l'état de gaz parfait, état légèrement différent de l'état réel. Les tables élémentaires de thermodynamique chimique se limitent à la température de référence 298,15 K (25 °C) tandis que les tables complètes donnent les grandeurs thermodynamiques standard à diverses températures.



$\Delta_f H^0 (kJ.mol^{-1})$	0	0	-285,1
$S^0 (J.mol^{-1})$	130,46	204,82	69,96

Tableau 4 : Données thermodynamiques pour 298K [4]

$$\begin{cases} \Delta_r H^0 = 1 \times (-285,1) = -285,1 \text{ kJ.mol}^{-1} \\ \Delta_r S^0 = 69,96 - \frac{1}{2} \times 204,82 - 130,46 = -162,9 \text{ J.mol}^{-1}.K^{-1} \end{cases}$$

$$\Delta_r G^0 = \Delta_r H^0 - T \times \Delta_r S^0 = -285,1 - 298 \times (-162,9) \times 10^{-3} = -236,6 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Nous pouvons alors en déduire que la f.e.m. de la pile sera égale à :

$$f.e.m = -\frac{\Delta_r G^0}{nF} = \mathbf{1,23V} \text{ à } 298K$$

Il est à noter que cette réaction est exothermique car libérant de l'énergie thermique. Cette énergie thermique est dissipée et liée aux phénomènes irréversibles engendrés lors du passage en courant électrique. Comme expliqué précédemment, une pile est composée d'une anode et d'une cathode, nous allons donc nous intéresser aux phénomènes ayant cours de part et d'autre des électrodes entre celles-ci et les électrolytes de la pile à combustible [7].



2.2.3. Décomposition de l'hydrogène à l'anode

Du côté anodique, l'hydrogène est oxydé à la surface d'un catalyseur avec libération d'électrons et d'ions H^+ .

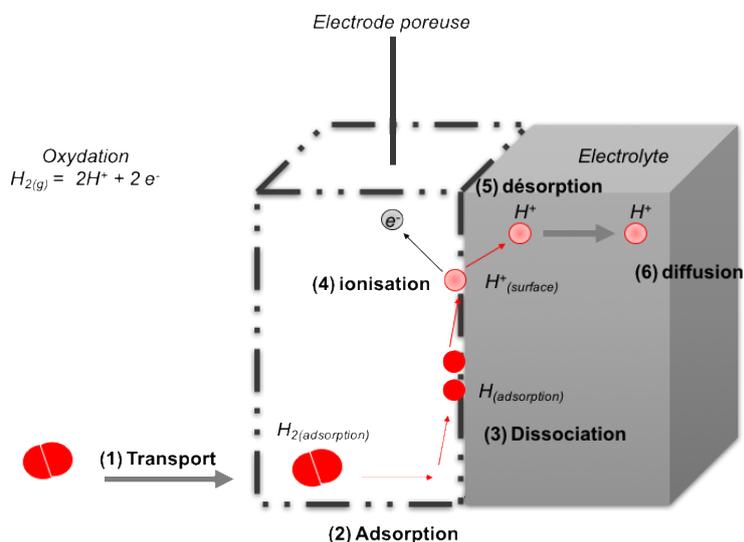


Figure 2 : Illustration de la décomposition de l'hydrogène à l'anode

1. Transport	Le dihydrogène traverse l'électrode poreuse et se dirige vers l'électrolyte
2. Adsorption	La molécule vient se fixer sur la surface de l'électrolyte
3. Dissociation	Du fait des interactions avec l'électrolyte la molécule se dissocie en deux atomes distincts d'hydrogène (l'électrode poreuse sert de catalyseur)
4. Ionisation	Excitation de l'atome libérant un électron
5. Désorption	L'ion hydrogène formé se détache de la surface
6. Diffusion	L'électrolyte permet la diffusion de l'ion vers la zone moins riche en H^+

Tableau 5 : Description des étapes de la décomposition de l'hydrogène gazeux



2.2.4. Décomposition de l'oxygène à la cathode

Du côté cathodique, l'oxygène est catalytiquement réduit en eau grâce à la présence des protons qui ont traversé la membrane électrolyte depuis l'anode, d'une part, et des électrons qui sont transférés par le circuit extérieur vers la cathode d'autre part. La membrane n'est pas un conducteur électronique.

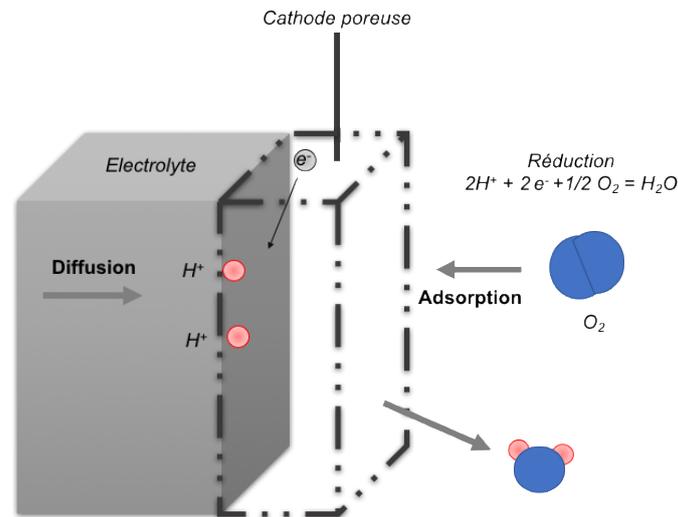


Figure 3 : Illustration de la décomposition de l'oxygène à la cathode

2.3. Les différents types de pile à combustible

La pile à combustible peut opérer dans une large gamme de températures s'étendant de 60°C à 900°C. Selon la température de fonctionnement, la nature de l'électrolyte, les électrodes et les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient mais le principe général reste le même. Comme nous pourrions le voir dans le Tableau 6.

En élevant la température, les réactions sont plus rapides provoquant ainsi un accroissement du débit de la pile, toutefois des problèmes techniques liés aux hautes températures limitent ces usages.



Voici un tableau récapitulatif des différents types de pile à combustible classées par température d'utilisation :

Famille de pile	Anode	Electrolyte	Cathode
PEMFC			
(membrane polymère)	$H_2 = 2H^+ + 2e^-$ (Pt)	Polymère acide H ⁺ (solide)	$O_{2(g)} + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O_{(l)}$ (Pt)
Température de fonctionnement : 60-90°C			
PAFC			
(acide phosphorique)	$H_2 = 2H^+ + 2e^-$ (Pt)	H ₃ PO ₄ (85-100%) H ⁺ (liquide)	$O_{2(g)} + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O_{(l)}$ (Pt)
Température de fonctionnement : 160-220°C			
AFC			
(liquide alcalin)	$H_2 + 2OH^- = 2H_2O + 2e^-$ (Pt, Ni)	KOH OH ⁻ (liquide)	$2O_{2(g)} + 4H_2O + 4e^- = 2OH^-$ (Pt-Au, Ag)
Température de fonctionnement : 50-250°C			
MCFC			
(carbonate fondu)	$H_2 + CO_3^{2-} = H_2O + CO_2 + 2e^-$ (Ni + 10% Cr)	LiCO ₃ /K ₂ CO ₃ /NaCO ₃ CO ₃ ⁻ (liquide)	$2O_{2(g)} + 4CO_2 + 4e^- = 2CO_3^{2-}$ (NiO lithié)
Température de fonctionnement : 650°C			
SOFC			
(oxide solide)	$H_2 + O^{2-} = H_2O + 2e^-$	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ O ²⁻ (Solide)	$2O_2 + 4e^- = 2O^{2-}$
Température de fonctionnement : 750-900°C			

Tableau 6 : Présentation des différentes piles à combustibles [8]

D'après le Tableau 6, nous voyons que pour des utilisations dans des conditions de températures non extrêmes, les piles à combustibles PEMFC sont les plus adéquates. C'est pourquoi elles sont utilisées dans les voitures. Nous allons donc nous intéresser plus particulièrement à ces piles. Toutefois, il est à noter que les PEMFC emploient des électrodes de platine, ce qui en fait une pile onéreuse, et limite notamment son accessibilité auprès du grand public.



3. Les piles à combustibles PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Comme nous l'avons vu précédemment, la pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC permet de convertir l'énergie chimique d'oxydation du dihydrogène en énergie électrique et thermique selon la réaction globale de synthèse de l'eau. La pile est constituée de deux électrodes, l'une alimentée en dihydrogène et l'autre en dioxygène qui sont séparées par une membrane échangeuse de protons.

3.1. Cœur de la pile à combustible PEMFC

Le cœur de la pile présente une structure symétrique avec l'arrivée et l'évacuation des gaz de part et d'autre (Figure 4). Le cœur de la pile est constitué de l'assemblage membrane – électrodes insérées entre deux couches de diffusion des gaz (GDL : gaz diffusion layer). L'ensemble est maintenu par des plaques de distribution des gaz réactifs. Pour les véhicules motorisés, il ne s'agit non pas d'une pile seule, mais d'un empilement de piles afin d'augmenter la force électromotrice comme le montre les figures 5 et 6.

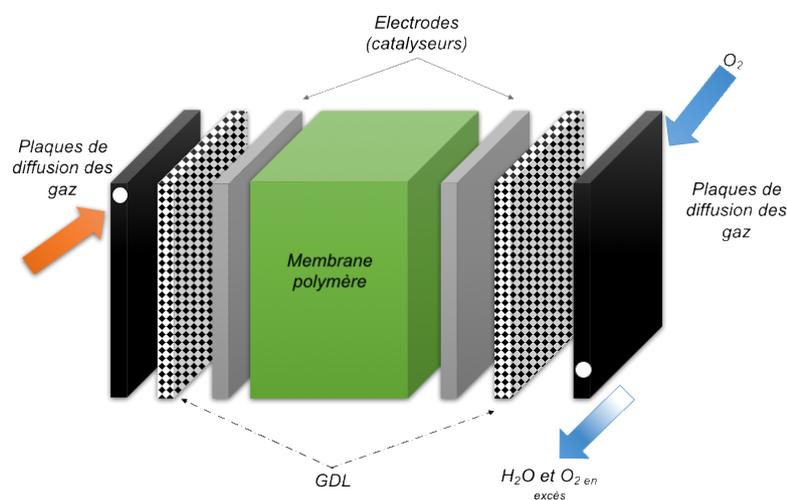


Figure 4 : Modélisation d'une pile PEMFC



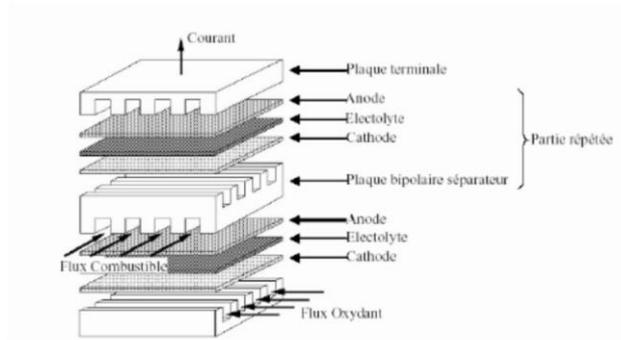


Figure 5 : Schématisation d'un empilement de PEMFC [9]

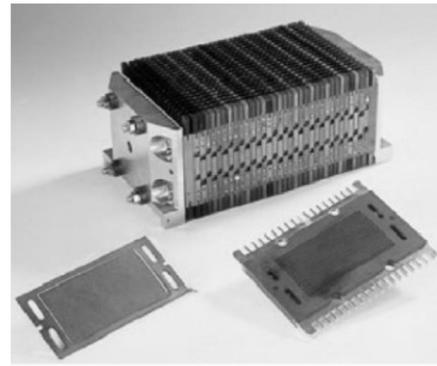


Figure 6 : Empilement de PEMFC [9]

3.2. Composants de la pile à combustible

Dans ce paragraphe, nous allons expliquer le rôle de chacun des composants à travers le Tableau 7, et nous nous attarderons plus particulièrement sur la membrane polymère.

Électrodes	Les électrodes servent de supports catalytiques aux réactions intermédiaires, (ionisation de l'hydrogène par exemple) et aux réactions électrochimiques.
GDL	Elles permettent d'amener les réactifs gazeux jusqu'aux électrodes, siège des demi-réactions chimiques.
Plaque de diffusion des gaz (plaque bipolaire)	Elles permettent l'arrivée des réactifs, des gaz dans la pile à combustible et l'évacuation de l'eau

Tableau 7 : Description des différents éléments de la P.A.C.

3.2.1. Les électrodes

Les électrodes permettent les réactions électrochimiques à l'anode et à la cathode. Leur rôle principal est de supporter le catalyseur et de permettre son contact avec le gaz et le conducteur ionique. Elles doivent également permettre le déplacement des espèces protoniques depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène se réduit [10].



3.2.2. Les couches de diffusion (GDL)

Les couches de diffusion des gaz assurent une répartition homogène des gaz, une bonne gestion de l'eau dans la pile (afin de ne pas altérer les composantes de celle-ci), une tenue mécanique de la membrane et des électrodes. Par conséquent, ce composant doit présenter une bonne conductivité électrique et thermique ainsi qu'une porosité adaptée (tailles des pores) et des propriétés d'hydrophobie maîtrisées. Ainsi ces dernières sont généralement constituées d'un tissu carboné poreux d'épaisseur comprise entre 100 et 200 μm , enduit de polymère [10].

3.2.3. Plaques de diffusion des gaz – Plaques bipolaires

Les plaques bipolaires ont pour fonction la collecte du courant, la distribution et la séparation des gaz à l'anode et à la cathode. Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant, une imperméabilité au gaz supérieure à la membrane échangeuse de protons et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de la pile (eau, oxygène...). Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage [11].

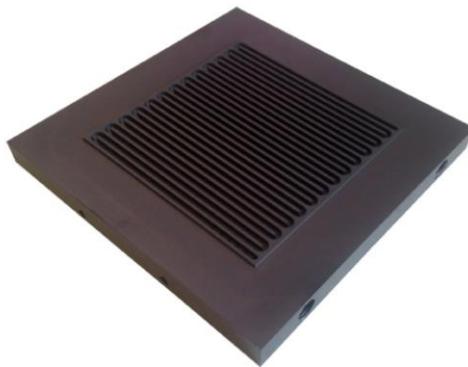


Figure 7 : Plaque bipolaire commercialisée par Electrographite Carbon Co®

3.3. Electrolyte polymère

Les membranes formant l'électrolyte possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de protons, généralement SO_3H ou COOH , permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode. Dans ces travaux, nous ne nous intéresseront qu'aux électrolytes comportant des groupements SO_3H . Ce sont, en effet, les piles PEMFC qui fonctionnent aux plus basses températures. C'est un polymère acide perfluorosulfoné (PFSA, Perfluorosulfonic Acid) appelé Nafion®. Comme tout électrolyte de pile à combustible, celui-ci doit présenter une très faible perméabilité aux gaz, un caractère isolant électronique et une bonne conductivité ionique. La membrane a également un rôle de



support mécanique des électrodes sur chacune de ses faces. L'épaisseur de la membrane polymère échangeuse d'ions, généralement comprise entre 50 et 150 μm , résulte d'un compromis entre les divers paramètres suivants : les caractéristiques mécaniques, la conductivité ionique, la perméation des gaz, les caractéristiques d'hydratation et le coût de fabrication. Nous allons donc parcourir dans la suite ses propriétés.

3.3.1. Structure du polymère

Le Nafion[®] est thermostable et possède une excellente inertie chimique. Son acidité est améliorée grâce à la présence de groupements $-\text{CF}_2-$ acide sulfonique ($-\text{CF}_2\text{SO}_3\text{H}$) [12]. Les polymères PFSA sont composés d'un squelette perfluoré à base de polytétrafluoroéthylène (PTFE) extrêmement hydrophobe dû à la présence de groupements CF_2 sur lesquels sont greffés des chaînes pendantes perfluorosulfonées, terminées par un groupement acide sulfonique fortement hydrophile [13] et [14].

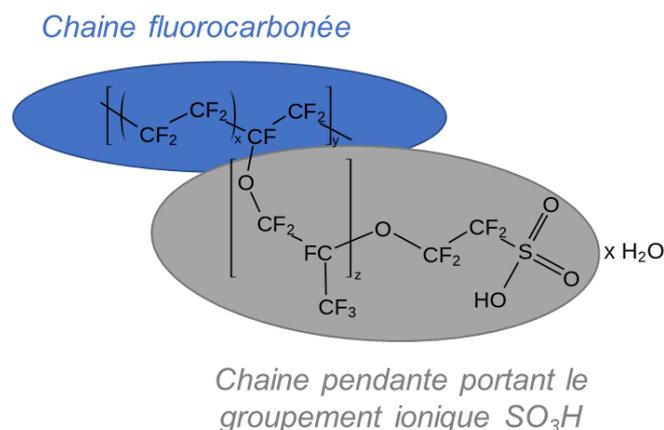


Figure 8 : Représentation du Nafion[®] [12]

- Les régions hydrophiles sont interconnectées et sont responsables du transport des protons.
- La région hydrophobe est dense et assure la stabilité morphologique de l'ensemble.

3.3.2. Conductivité ionique et perméation gazeuse

La conductivité ionique du polymère doit être élevée afin d'accroître la diffusivité des protons jusqu'à la cathode. Le transport du proton est lié au transport de l'eau puisque la conduction protonique dans la membrane ne peut avoir lieu que dans un environnement hydraté. Ainsi l'hydratation préalable de la membrane permettra de jouer sur la conductivité en plus de la membrane elle-même. La membrane doit être également étanche à l'hydrogène et l'oxygène. En effet, si cette membrane était perméable aux réactifs gazeux alors ils se combineraient en eau sur le catalyseur (l'électrode) mais sans production



d'électricité, c'est à dire que les électrons ne seraient pas récupérés par le circuit extérieur. Sa conductivité ionique est de l'ordre de $0,1 \text{ S.cm}^{-1}$ [15].

3.3.3. Mécanisme de diffusion des protons dans la membrane

Comme il a été présenté en Figure 5, la structure chimique des membranes de type PFSA consiste en un squelette hydrophobe de PTFE fournissant la stabilité mécanique avec des chaînes pendantes hydrophiles comportant des sites sulfonates, assurant l'absorption d'eau dans la membrane. Le mécanisme de diffusion de protons proposé par Grotthuss [16], plus communément appelé mécanisme de transport coopératif est illustré en Figure 9. Selon celui-ci, le proton se déplace via les molécules d'eau adsorbées par les parties hydrophiles, d'un site sulfonate hydraté à un autre tel un passage de témoin. Comme le proton est faiblement lié au site, il peut sauter d'un site à un autre par formation et rupture de liaison hydrogène avec l'atome d'oxygène de l'eau, avec laquelle il forme un ion hydronium provisoire (H_3O^+). Autrement dit, l'eau adsorbée agit alternativement comme donneur et accepteur de protons.

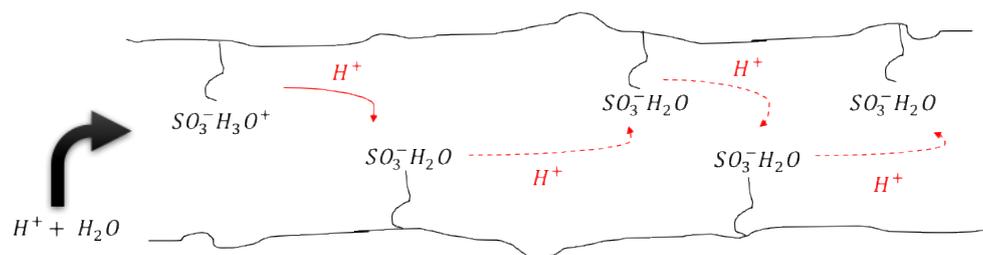


Figure 9 : Modélisation du mécanisme de Grotthuss [16]

3.4. Dégradation des membranes

3.4.1. Dégradations causées par la présence d'oxydants

La dégradation chimique de la membrane est souvent liée à la présence de peroxyde d'hydrogène. Dans les faits OH^\cdot et HOO^\cdot , dérivés du peroxyde et générés pendant le fonctionnement de la pile, sont des oxydants très puissants [17]. Ils sont produits essentiellement par la réduction de l'oxygène à la cathode. Ces radicaux hydroxyles « attaquent » la membrane polymère, mais le mécanisme n'est pas encore élucidé. Des cations étrangers, issus de la corrosion des différents composants de la pile, favorisent la formation de radicaux hydroxyles libres. La conséquence directe de ces dégradations est l'affinement de la membrane et donc une fragilité mécanique de la membrane.



3.4.2. Dégradation thermique

Comme nous l'avons vu précédemment, la température d'utilisation d'une pile à combustible avec une membrane en Nafion® est généralement comprise entre 60 et 90°C. Au-delà de ces températures, les propriétés de la membrane se dégradent. Il y aura d'une part les propriétés mécaniques de la membrane qui seront modifiées si on atteint la température de transition vitreuse du matériau (autour de 100°C). Ensuite, la teneur en eau de la membrane chutera, l'eau commencera à s'évaporer, cela diminuera la conductivité du matériau.

3.4.3. Dégradations liées à son utilisation pour l'automobile

Il est à noter que dans des utilisations automobiles, les températures extérieures peuvent endommager la pile. En effet, si la température extérieure est inférieure à 0°C, l'eau résiduelle contenue dans la pile peut geler, empêchant les réactifs gazeux de circuler. L'expansion physique due au changement d'état peut occasionner une déchirure locale de la membrane. Quand la pile est remise en marche, la température remonte et l'eau dégèle entraînant une réduction du volume. Les changements physiques perpétuels ont un effet néfaste à terme sur la durée de vie de la membrane.



4. Le rendement de la pile PEFMC et ses limites

Pour la pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène le rendement théorique dans les gammes de températures annoncées est entre 83% et 91%. En pratique, la tension de sortie de la PAC, notée U , est moindre que la tension idéale prédite par la thermodynamique : *f. e. m* [8]

Ce rendement inférieur à 100% peut être expliqué par la perte d'énergie sous différentes formes. Ces pertes peuvent à terme diminuer davantage le rendement de la pile. Dans cette partie seront abordées 3 types de pertes mises en jeu [18] :

- Pertes ohmiques (η_{ohm})
- Pertes dues par la barrière d'activation (η_{act})
- Pertes dues aux concentrations des réactifs (η_{conc})

On a donc en réalité :

$$U = f. e. m - (\eta_{ohm}) - (\eta_{act}) - (\eta_{conc})$$

4.1.1. Pertes ohmiques (η_{ohm})

Dans une PEMFC, les protons et les électrons s'accumulent à l'anode alors qu'ils sont consommés à la cathode. Cette accumulation/déplétion d'électrons aux deux électrodes crée un gradient de tension qui transporte les électrons de la réaction d'oxydation de l'anode vers la cathode à travers la charge électrique extérieure et y crée donc un courant électrique. Dans l'électrolyte, l'accumulation/déplétion de protons crée un gradient de tension et un gradient de concentration. Ces deux gradients transportent les protons de l'anode à la cathode. Notons que l'effet du gradient de tension est plus important que celui du gradient de concentration. [18]

Le transport de charges provoque une perte de tension pour la PAC :

$$\eta_{ohm} = i \times R_{ohm} = i \times (R_{elec} + R_{ion})$$

R_{ohm} la résistance ohmique de la PAC (électrodes, électrolyte, interconnexions)

R_{elec} la résistance électronique

R_{ion} la résistance ionique



4.1.2. Pertes dues à la barrière d'activation (η_{act})

Le rendement d'une pile à combustible est directement lié à la vitesse des réactions qui ont lieu à l'anode et à la cathode [19].

La loi empirique d'Arrhenius utilisée en cinétique chimique, permet de décrire la variation de la vitesse d'une réaction chimique. Cette vitesse de réaction est fonction de la température de réaction et de l'énergie d'activation E_a :

$$k = A \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)$$

Où k est la constante de vitesse et A une constante fonction de la réaction. L'oxydation de l'oxygène et la réduction de l'hydrogène étant des réactions naturellement lentes, une accélération de celles-ci apparaît indispensable pour optimiser le fonctionnement d'une pile à combustible et par conséquent la tension délivrée par la pile. Dès lors, on remarque qu'une énergie d'activation élevée, nécessaire à convertir les réactifs en produits, fait diminuer la tension de sortie de la pile. On parle donc de perte d'activation.

4.1.3. Pertes dues aux concentrations des réactifs (η_{conc})

Les pertes par concentration ont pour origine la baisse de concentration des réactifs sur la surface des électrodes.[20] Elles apparaissent pour des courants élevés où la concentration des réactifs diminue très rapidement en surface des électrodes. Dans le cas de l'air (qui contient normalement environ 21% d'oxygène), la fraction d'oxygène à la surface des électrodes va diminuer, plus ou moins fortement suivant l'intensité du courant, provoquant une chute de la pression partielle d'oxygène (l'arrivée de l'oxygène est par ailleurs bloquée par l'azote) et par conséquent la tension. La vitesse de réaction diminue. Il en est de même pour l'anode alimentée en hydrogène.



5. Applications et production de la pile

Après avoir brièvement décrit le fonctionnement global de la pile à combustible nous allons présenter de manière succincte la mise en place de cette pile dans le milieu automobile et rappeler quelques chiffres sur ses performances actuelles.

5.1. Le domaine automobile

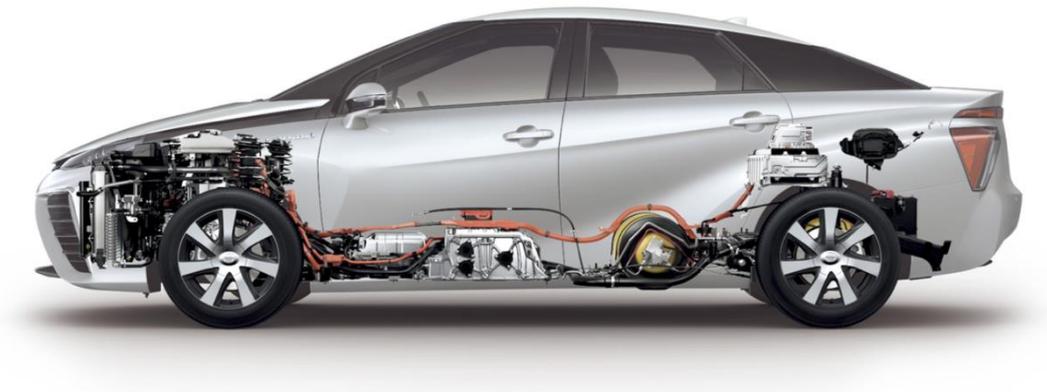


Figure 10 : Coupe transversale d'une voiture à P.A.C. [21]

Actuellement, sur les voitures fonctionnant à partir des piles à combustibles, la pile se trouve sous le siège conducteur et le réservoir d'hydrogène sous le siège arrière des passagers. Contrairement à un véhicule électrique à batterie qui a une autonomie inférieure à 200 km, un véhicule électrique à pile à combustible pourrait avoir une autonomie comprise entre 400 et 800 km selon les modèles. Actuellement, les voitures commercialisées ont une bonne autonomie, avec 650 km après 3 minutes de recharge [22]. Des autocars ont aussi été élaborés par la société Carpostal®. En effet, depuis 2011, à Brugg en Suisse, des cars postaux roulent à plein temps avec un moteur à pile à combustible. Le car aurait économisé en 5 ans 1600 tonnes d'émission de CO₂. Dans leur cas, ils utilisent majoritairement du dihydrogène issu de l'électrolyse de l'eau puisque leur station contient un électrolyseur. Toutefois le coût d'un tel autocar reste onéreux comparé aux moteurs diesels, le projet de généralisation des transports en commun avec la pile à combustible a donc été pour le moment mis de côté. Ce projet a toutefois prouvé qu'il était possible d'utiliser du dihydrogène pour la circulation des transports en commun et a été apprécié par les usagers[23].



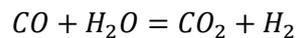
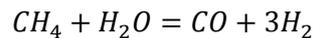
5.2. Production du dihydrogène

5.2.1. Reformage du méthane

Actuellement, 95% du dihydrogène est produit à partir des hydrocarbures, en raison de leur intégration dans l'industrie pétrochimique qui est l'une des premières consommatrices. Le dihydrogène est obtenu à partir du vaporeformage [24].

Le vaporeformage consiste à transformer les hydrocarbures en gaz de synthèse par réaction avec de la vapeur d'eau et en présence d'un catalyseur à base de nickel à des températures élevées (840 à 950°C) et à des pressions modérées (20 à 30 bar). Le gaz de synthèse obtenu n'est pas un mélange simple de dihydrogène et de monoxyde de carbone (CO). Du fait des différentes réactions mises en jeu, il contient également du dioxyde de carbone, du méthane et de l'eau.

Le vaporeformage est généralement effectué à partir de gaz naturel mais il peut aussi se faire à partir de méthane :



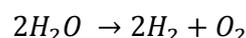
Il s'en suit alors une étape de purification pour obtenir le dihydrogène seul.

Avec ces technologies actuelles de production du dihydrogène à partir de gaz naturel, une voiture émet donc environ 120 g de CO₂ au kilomètre. C'est équivalent à un véhicule moyen propulsé à l'énergie fossile. Toutefois, ce véhicule alternatif n'émet pas de bruit, pas de suies, pas d'oxydes d'azote et pas de soufre.

En évoluant vers des modes de production dihydrogène plus propres d'ici 2020, les émissions de CO₂ baisseront inévitablement. En effet, pour le moment la production de dihydrogène s'effectue par réformage de combustibles fossiles. D'ici 2020, la production de dihydrogène devrait provenir de l'électrolyse de l'eau en utilisant pour cela de l'électricité produite par des systèmes d'énergies renouvelables (éolien, solaire...).

5.2.2. Alternatives écologiques

Comme il été annoncé précédemment, la production du dihydrogène peut se faire à partir de l'électrolyse de l'eau. En effet l'électrolyse est la réaction inverse à la pile, et pour qu'elle se produise, on doit « forcer » la réaction en lui fournissant de l'énergie électrique.



Cette électricité peut être apportée par des systèmes d'énergies renouvelables tels que l'énergie solaire avec des panneaux photovoltaïques.



En effet, des chercheurs allemands et hollandais viennent de mettre au point une cellule solaire capable de produire du dihydrogène et du dioxygène par électrolyse de l'eau. On pourrait ainsi stocker l'énergie solaire et envisager un mode de production durable pour l'hydrogène, un potentiel carburant d'avenir.

Dans le même ordre d'esprit, des chercheurs de l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas) et du Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) ont couplé une cellule solaire simple avec une photoanode en oxyde métallique. Ils ont réussi à atteindre un taux de conversion de 5% de l'énergie lumineuse en hydrogène. Selon les scientifiques, leur dispositif est nettement moins coûteux que des cellules de haut rendement à triple jonction en silicium amorphe ou d'autres semi-conducteurs utilisés pour ce type de réaction [25].

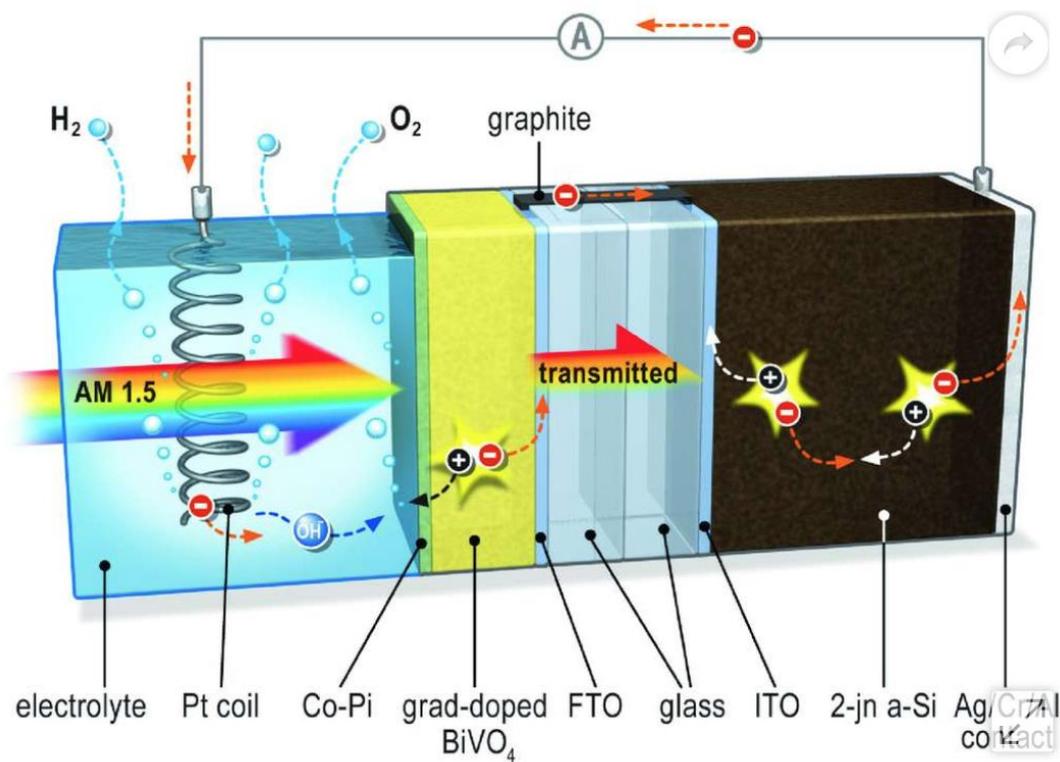


Figure 11 : Schématisation de l'électrolyse réalisée par une cellule solaire [25]

Un potentiel électrique est créé quand la lumière (flèche arc-en-ciel) atteint le système. La couche d'oxyde métallique (grad-doped BiVO_4) capte une partie de la lumière et sert de photoanode. La couche est reliée à la cellule solaire (en noir) par l'intermédiaire d'un pont conducteur en graphite. La cellule reçoit également une partie de la lumière, augmentant le potentiel électrique. L'oxygène se forme alors au niveau de la photoanode, tandis que l'hydrogène est dégagé au niveau d'une spirale de platine plongée dans l'eau et qui fait office de cathode. Pour leur photoanode, le choix s'est porté sur le vanadate



de bismuth (BiVO_4), qui, à l'instar de la cellule solaire simple, a un coût modique : il est disponible en abondance, et est utilisé comme pigment jaune dans les peintures. Son usage permet en principe d'atteindre un taux de conversion de 9 % de l'énergie lumineuse en hydrogène dans le dispositif des chercheurs. Cet oxyde métallique a donc été déposé sur une surface de verre conducteur. Puis, l'on a recouvert le tout d'un catalyseur bon marché, le phosphate de cobalt, en contact avec l'eau, et qui aide à accélérer notablement la formation de dioxygène. Le tout repose sur la cellule solaire, et celle-ci n'est donc pas en contact avec l'eau.



6. Séance a priori

Pour réaliser l'activité centrée sur la pile à combustible il a été choisi de se focaliser sur les classes de 1^{ère} STI2D (Sciences Technologique et Industrielles du Développement Durable). Une présentation du programme et de la séance a priori seront présentés dans cette partie.

6.1. Programme de la 1^{ère} STI2D

Au regard du Bulletin Officiel (BO) du 17 mars 2011, le programme de 1^{ère} STI2D est orienté autour des thématiques des énergies chimique, thermique et électrique. Dans la partie consacrée à l'énergie chimique, le BO insiste fortement sur la notion de chaînes énergétiques. C'est donc naturellement que j'ai décidé de me positionner sur une activité autour de la pile à combustible une fois le chapitre sur la combustion terminé. Il me semble, a priori compliqué d'aborder la pile à combustible à travers l'aspect oxydation-réduction. Il est toutefois envisageable de revenir sur cette notion après l'avoir vu à travers le thème de la santé. En effet, ils ne voient les réactions d'oxydo-réduction qu'au cours de la leçon portant sur l'action des antiseptiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Chaîne énergétique	<ul style="list-style-type: none">- Schématiser simplement les transferts ou les transformations d'énergie mises en jeu au sein d'un habitat- Réaliser un bilan énergétique

Tableau 8 : Bulletin Officiel n°3 du 17 Mars 2011

Pour appréhender au mieux la séance proposée les élèves auront terminé le chapitre sur la combustion et l'énergie chimique, tout en sachant équilibrer l'équation chimique de la réaction de combustion. Il est à noter qu'en début d'année les élèves ont déjà appréhendé les notions d'énergie électrique et d'énergie mécanique au travers de différentes activités.

Enfin, lors du cycle 4, les élèves ont déjà été très rapidement sensibilisés aux sources d'énergies et aux énergies renouvelables.

6.1.1. Rappel du formalisme établi en cycle 4

- Des flèches droites pour désigner le sens
- Sur les flèches sont notées les énergies mises en jeu
- Les systèmes en jeu sont situés dans des formes géométriques



6.2. Déroulement de la séance a priori

J'ai décidé d'utiliser une séance d'une heure et demie pour faire un travail de recherche avec ma classe de première STI2D portant sur la réalisation d'un poster et une présentation orale de 1 à 2 minutes. Il est en effet important pour eux qu'ils s'entraînent à l'oral et construisent parfois leur propre raisonnement avec leurs propres mots.

Avant de commencer la séance, l'installation se fait en binômes créés de manière aléatoire grâce au site internet www.keamk.com. Les élèves entrent dans la salle et prennent connaissance des binômes affichés sur le vidéoprojecteur et s'installent.

Ensuite, une situation déclenchante serait mise en place à l'aide de la vidéo de Carpostal® ([lien vers la vidéo²](#)). Suite à cette vidéo, une expérience avec un modèle réduit de la pile à combustible serait réalisée au bureau du professeur.



Figure 12 : Modèle P.A.C voiture de chez Jeulin®

La problématique de la séance serait la suivante :

« Quelles sont les énergies mises en jeu dans une voiture alimentée par une pile à combustible ? ».

Il y aurait plusieurs questions pour les guider et ainsi mobiliser leurs connaissances sur le chapitre des combustions.

² <https://www.youtube.com/watch?v=0GUpj0sJTzk>



1) Équilibrer l'équation suivante :



2) Déterminer qui est le combustible et qui est le comburant.

3) Remplir la phrase à trou suivante :

« mole(s) de H_2 et mole(s) de O_2 donne mole(s) d'eau »

Figure 13 : Document élève

A la fin de la séance, les élèves auront réalisé un diagramme énergétique tel que suit sur un poster :

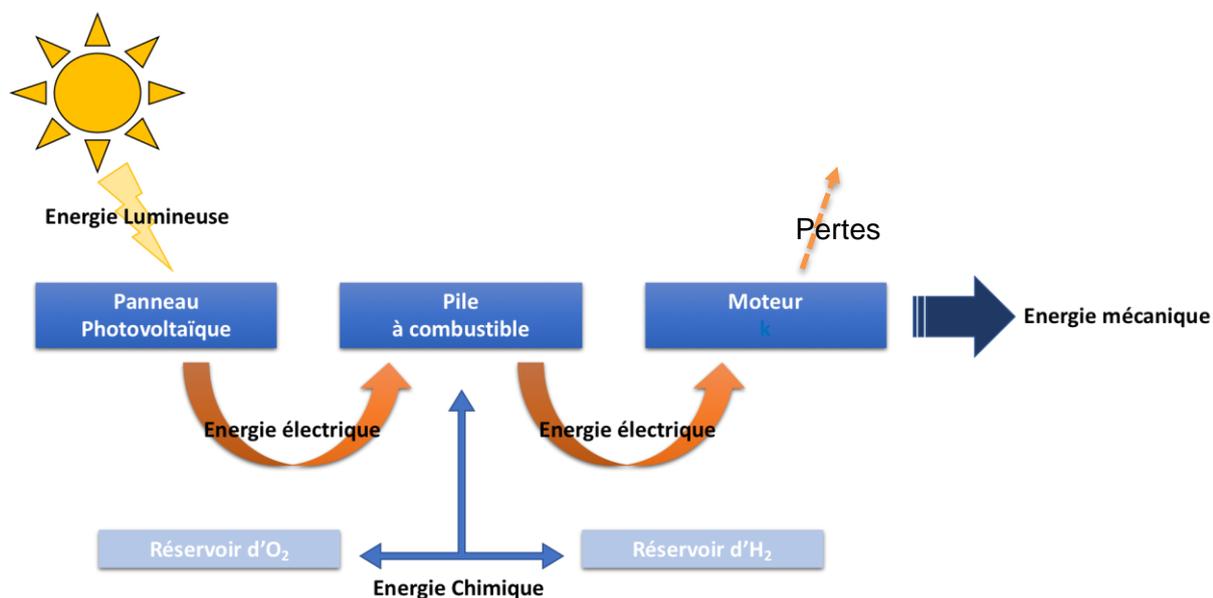


Figure 14 : Diagramme énergétique mis en jeu

En fin de séance, ils devront présenter à leurs camarades de classe leur chaîne énergétique.



Cette séance s'inscrit dans une démarche d'investigation et nécessite donc un accompagnement du professeur et des « jokers » pour débloquer les élèves. Les jokers proposés sont les suivants :

Jokers	<ul style="list-style-type: none"> - Le panneau photovoltaïque « recharge » la pile - La pile à combustible agit comme une pile classique - Bien observer les réservoirs d'oxygène et de d'hydrogène lors du fonctionnement de la pile (vérification de l'équation bilan) - Remontrer le passage sur le fonctionnement de la P.A.C sur la vidéo - Fournir des morceaux de la chaîne énergétique présentée en Figure 16
--------	---

Tableau 9 : Jokers disponibles au cours de la séance

Cette séance sera évaluée par compétences selon le tableau de compétences (Tableau 9).

Suite à la séance, une institutionnalisation sera réalisée et une discussion autour de la « recharge » de la pile sera entamée. A la suite de cette séance, les élèves pourront présenter un bref exposé sur ce thème et sur les piles à combustibles dans la vie courante, ainsi que les lieux communs où elles sont susceptibles d'être utilisées.

Je pense que nous pourrions revenir sur la pile à combustible au cours de deux autres thématiques : transport et réactions d'oxydo-réduction.

Il est aussi à noter que la classe que j'encadre participe à un concours autour de la mer et de ses perspectives énergétiques. Les professeurs concernés sont ceux d'innovation technologique, espagnol, histoire-géographie et de physique-chimie. Les discussions qui peuvent être engendrées par cette expérience et cette activité peuvent faire émerger des idées ainsi que de potentiels points de réflexion pour leur projet.



Nom :		Prénom :		Classe :	
Compétences			Évaluation professeur		
<u>S'approprier (coef 2)</u>					
Les règles de vie (travail en groupe, en chuchotant)					
Mobiliser les données utiles pour répondre à la problématique					
<u>Réaliser (coef 2.5)</u>					
Réaliser un poster (clarté & soin)					
Réaliser correctement la chaîne énergétique					
<u>Analyser (coef 2)</u>					
Répondre aux questions de la fiche					
<u>Valider (coef 1.5)</u>					
Répondre à l'oral aux questions du professeur et des élèves					
<u>Communiquer (coef 2)</u>					
Utiliser un vocabulaire scientifique					
Rendre compte à l'écrit et à l'oral					

Tableau 10 : Évaluation par compétences



Déroulement de l'activité	Difficultés rencontrées	Minutage
<p>Entrée en classe :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les élèves regardent les groupes via le vidéoprojecteur et vont s'installer à chaque poste avec un ordinateur - Durant l'installation je fais l'appel sur Pro-note 	Aucune difficulté envisagée, ils sont habitués à ce système désormais	5 minutes
<p>Présentation de l'activité :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Je présente sommairement l'activité, le fichier source, et ce que j'attends d'eux comme production finale - Je prévois une démonstration pour montrer comment avoir accès via le réseau interne du lycée aux sources internet autorisées. 	Je devrais certainement réexpliquer à chacun les consignes, et aider à se connecter aux ordinateurs s'ils oublient leurs codes	10 minutes
<p>Déroulement de l'activité :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Regarder la vidéo - Démonstration bureau du professeur - Réalisation du poster 	Savoir discriminer les informations et sélectionner les données	55 minutes
<p>Fin de l'activité :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Présentations des diapositives (1 à 2 minutes par groupe) 	Difficulté de prise de paroles	15 minutes

Tableau 11 : Minutage de la séance à priori



7. Analyse et déroulement de la séance a posteriori

La séance s'est déroulée le 18 mars 2019, durant le cours de 9h05 à 10h30. Cette séance étant coupée par une récréation de 10 minutes de 10h00 à 10h10. Suite aux nombreux mouvements de grève et à un fort absentéisme, j'ai été contrainte à modifier le déroulement de la séance par rapport à ce qui a été présenté dans la partie 6 (Tableau 10). De plus, j'avais prévu de réaliser cette séance en une unique session de travaux pratiques (soit une heure et demie sans interruptions) mais certaines séances ont dû être annulées en raisons de sorties pédagogiques et bac blanc de français. La séance a donc dû être découpée en deux. En effet, j'ai décidé d'utiliser une première séance de cours pour l'élaboration d'un poster puis, d'utiliser une séance d'accompagnement personnalisé (AP) pour les présentations orales. Le choix d'utiliser une séance d'AP m'a ainsi permis de leur fournir des conseils pour réaliser au mieux une présentation orale. De plus, cela m'a permis de mettre plus facilement à leur disposition des outils de méthodologie et d'organisation. Cette séance peut également leur permettre d'identifier leurs erreurs.

Dans un premier temps, je présenterai donc la première séance et les différences par rapport à ce qui avait été envisagé. Ensuite, je présenterai la séance d'accompagnement personnalisé utilisée pour l'entraînement à l'oral.

7.1. Séance 1 – Séance de réalisation des posters

7.1.1. Minutage et ajustement de la séance 1

Comme prévu initialement, ils sont rentrés et ont découvert les groupes aléatoires sur le vidéoprojecteur et se sont installés naturellement auprès des camarades concernés.

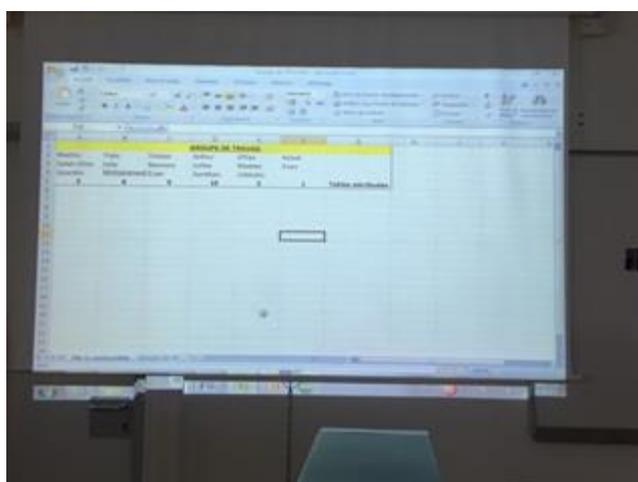


Figure 15 : Projection des groupes de travail



Les élèves arrivent à cette séance souvent en retard de 5 minutes car leur cours précédent se trouve à l'autre bout du lycée. Rentrer, trouver son groupe et s'installer prend donc 10 minutes si le décompte est effectué au moment de la sonnerie. Il est à noter que deux élèves étaient absents ce jour-là, il a donc fallu réarranger les groupes : 5 groupes de 3 ont été formés.

La première modification a été de regarder la vidéo ensemble, et non de manière individuelle, via le vidéo projecteur et discuter de celle-ci. Cela a notamment permis de ne pas perdre de temps dans la recherche du fichier ou dans la mise en route des ordinateurs.

La deuxième modification s'est portée sur la façon dont ils allaient présenter leur travail. J'ai finalement opté pour la réalisation d'un poster sur une feuille A3 et non pas sur une diapositive.



Déroulement de l'activité	Difficultés rencontrées	Minutage
Entrée en classe : <ul style="list-style-type: none"> - Les élèves ont regardé les groupes via le vidéoprojecteur et se sont installés à chaque poste de travail - Une fois installés, j'ai fait l'appel sur Pro-note 	Ils sont habitués au système de groupes aléatoires mais les retards fréquents pour le changement de salle entre le cours précédent et celui-ci nous a fait perdre du temps	10 minutes
Présentation de l'activité : <ul style="list-style-type: none"> - J'ai présenté sommairement l'activité, la fiche de compétences et la fiche à compléter 	J'ai dû réexpliquer les consignes, et les chaînes énergétiques à travers le diaporama du cours	10 minutes
Déroulement de l'activité : <ul style="list-style-type: none"> - Regarder la vidéo (5 minutes) - Compléter la fiche de questions (20 minutes) - Démonstration bureau du professeur (10 minutes) - Prévoir un rappel sur comment établir une chaîne énergétique, notion vu une semaine auparavant. - Commencer les posters 	Discriminer les informations et sélectionner les données, comprendre le fonctionnement de la maquette	35 minutes
RECREATION 10 minutes		
Fin de la séance : <ul style="list-style-type: none"> - Terminer les posters 	S'organiser dans le temps	15 minutes
Je les ai laissé ensuite partir 5 minutes avant pour changer de salle pour leur nouveau cours car il n'y a pas de sonnerie à cet horaire		5 minutes

Tableau 12 : Minutage de la séance 1 a posteriori



7.1.2. Réception de la vidéo et fiche à compléter

a. « Équilibrer l'équation suivante »

De manière générale, ils ont été perturbés d'avoir une combustion sans carbone dans les réactifs. Toutefois, ils ont très vite su comment équilibrer l'équation sachant que le chapitre sur la combustion venait d'être terminé et qu'ils avaient compris la méthodologie à avoir pour équilibrer une équation bilan d'une réaction chimique.

La méthodologie est la suivante :

- ❶ Réaliser un tableau dans lequel il y a une colonne « réactifs » et une colonne « produits »
- ❷ Compter le nombre d'atomes présents dans la partie « réactifs »
- ❸ Compter le nombre d'atomes présents dans la partie « produits ».

Dans notre cas, ils obtenaient le tableau suivant :

$\dots\dots H_2 + \dots\dots O_2 = \dots\dots H_2O$		
	Réactif	Produit
H	2	2
O	2	1

Avec ce tableau, ils ont pu constater que si les éléments chimiques se conservent, alors il manque un oxygène du côté des produits. De ce constat ils ont pu équilibrer l'équation.

b. « Déterminer qui est le combustible et qui est le comburant »

A force d'équilibrer des équations, ils ont retenu que l'oxygène était le comburant et donc instinctivement compris que l'hydrogène était le combustible. C'est donc plus par automatisme qu'ils ont su répondre à cette question.

c. « Remplir la phrase à trous suivante »

La question qui leur semblait compliquée était la phrase à compléter sur les quantités de matière. C'est une notion encore compliquée pour eux et c'est seulement cette question qui a nécessité une aide collégiale au tableau.

d. Aide apportée pour compléter la fiche



Ils n'ont pas eu besoin de « Joker » pour compléter la fiche. Seule la dernière question a nécessité mon intervention. En effet, pour toutes les autres questions (a, b, c), elles se sont résolues d'elles-mêmes de par la synergie du groupe. Chaque membre d'un groupe comprenait une question et l'expliquait aux autres. C'est une classe où lorsqu'il y a des travaux de groupe, il se crée une certaine émulation entraînant même les élèves décrocheurs.

1 ^{ère} STI2D	Pile à combustible	Activité
Noms et prénoms : <u>Julie</u>		
« Quelles sont les énergies mises en jeu dans une voiture alimentée par une pile à combustible ? ».		
Après avoir regardé la vidéo répondre aux questions suivantes :		
1) Équilibrer l'équation suivante :		
$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 = 2 \text{H}_2\text{O}$		
2) Déterminer qui est le combustible et qui est le comburant.		
<u>le comburant est l'oxygène et le combustible est l'hydrogène</u>		
3) Remplir la phrase à trou suivante :		
« <u>2</u> mole(s) de H_2 et <u>1</u> mole(s) de O_2 donne <u>2</u> mole(s) d'eau »		
4) A l'aide de la fiche A3 devant vous, réalisez un poster contenant la chaîne énergétique		

Figure 16 : Copie d'élève sur la fiche à trou



7.1.3. Montage au bureau

Pour que la classe progresse au même rythme, une fois la fiche complétée (exemple en figure 18) jusqu'à la question 3 par tous les élèves, je suis passée dans les rangs notifier directement les erreurs ou les réussites sur leurs fiches de compétences. Je l'ai donc juste modifiée en créant une colonne oui / non pour corriger de manière rapide et directe comme on peut le voir en figure 20.

J'ai ensuite invité les élèves à venir au bureau pour observer le modèle de la pile à combustible. La classe ayant un petit effectif (18 élèves), il est aisé pour eux de venir visualiser l'expérience qui se trouve à mon bureau.

Dans le but d'améliorer leur compréhension, nous avons discuté de l'équation bilan de la combustion et sur la quantité nécessaire en réactifs pour faire fonctionner cette pile. Je leur ai expliqué dans un premier temps, que nous devons remplir notre réservoir à l'aide d'un panneau photovoltaïque. Je ne leur ai pas dit quel réservoir allait contenir le dihydrogène ou l'oxygène, ils devaient le deviner. Après un débat et un vote ils ont compris que l'on formait plus de dihydrogène car « il en faut deux pour un » selon leurs propres mots.

Suite à ce constat et une fois les réservoirs suffisamment remplis, nous avons branché la pile au moteur. Ils ont alors observé les réservoirs se vider et le moteur tourner entraînant la rotation d'une hélice.



Figure 17 : Montage au bureau de la P.A.C



18

Nom :	Prénom : Nassara		Classe : 1 ^{ère} STI2D
Compétences	Évaluation professeur		
	OUI	NON	
S'approprier (coef 2)			
Les règles de vie (travail en groupe, en chuchotant) ✓	✗		A
Mobiliser les données utiles pour répondre à la problématique ✓			
Réaliser (coef 2,5)			
Réaliser un poster (carte & soin) ✓	✗		B
Réaliser correctement la chaîne énergétique ✓			
Analyser (coef 2)			
Répondre aux questions de la fiche	✗		A
Valider (coef 1,5)			
Répondre à l'oral aux questions du professeur et des élèves	✗		A
Communiquer (coef 2)			
Utiliser un vocabulaire scientifique	✗		A
Rendre compte à l'écrit et à l'oral			

Note sur	20	points				
Arrondi à	1	points				
	S'approprier	Analyser	Réaliser	Valider	Communiquer	Note sur
Coefficient	2	2	2,5	1,5	2	20
Evaluation	a	a	b	a	a	18

J.GERMOUTY

Figure 18 : Notation par compétences et tableau de conversion en note sur 20



7.1.4. Réalisation des Posters

Pour réaliser leur poster montrant les chaînes énergétiques, j'ai amené au préalable un sac de crayons de couleurs et de feutres afin qu'ils puissent librement réaliser, selon leur envie, la chaîne énergétique. En début de séance, je leur ai rappelé comment une chaîne énergétique était élaborée à travers un diaporama déjà vu en cours.

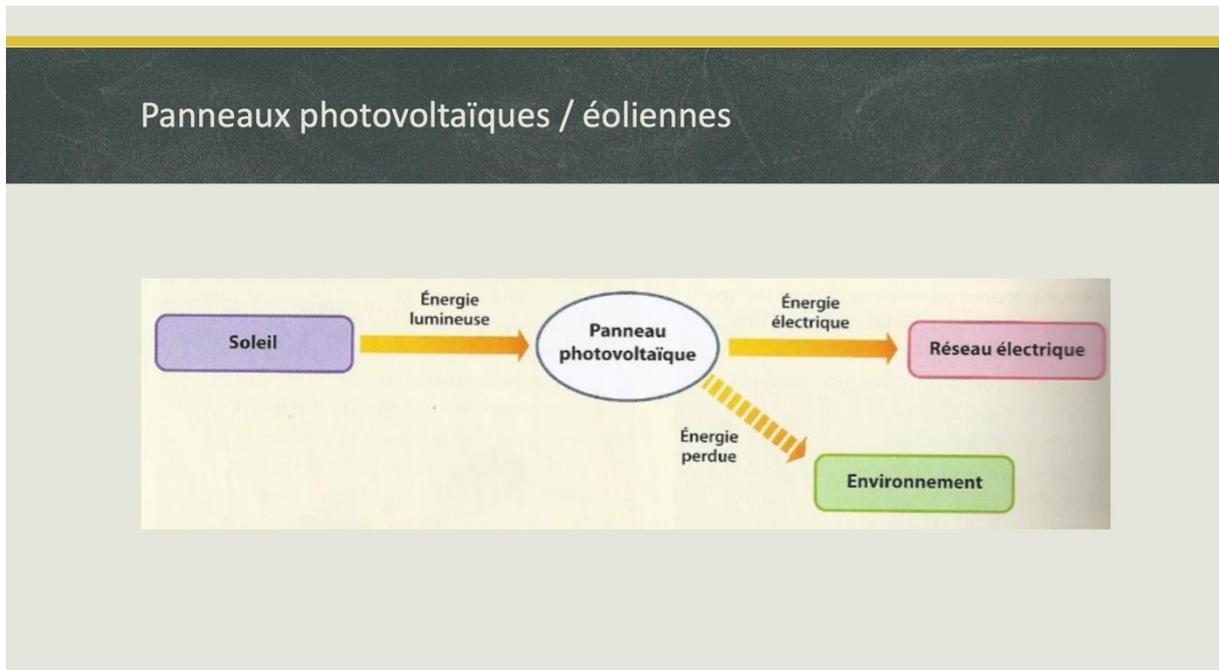


Figure 19 : Exemple du cours donné au préalable

Durant cette fin de séance, les élèves ont fait preuve d'énormément d'investissement bien qu'ils se soient davantage focalisés sur la forme et non le fond. Néanmoins, comme je l'expliquerai plus loin, ils se sont rendu compte que l'esthétisme des posters n'était pas une fin en soi s'ils ne représentaient pas correctement la chaîne énergétique et ne répondaient donc pas correctement à la problématique.

La principale erreur des groupes a été la confusion entre la recharge des réservoirs, par le panneau solaire qui permet d'alimenter la pile, et le fait que la pile fournisse de l'énergie électrique au moteur.



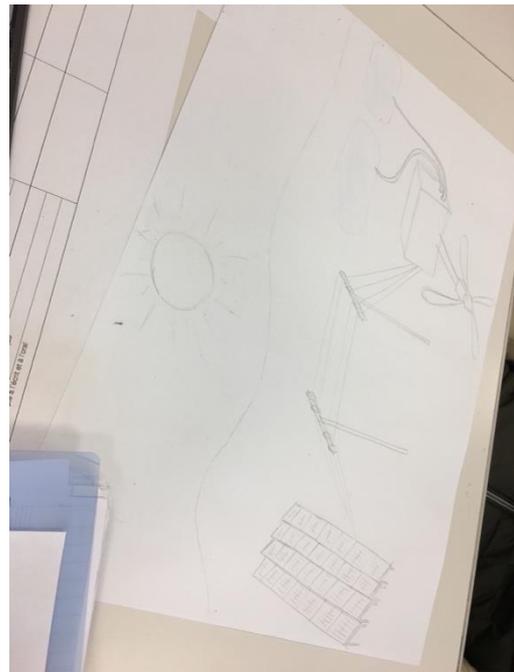
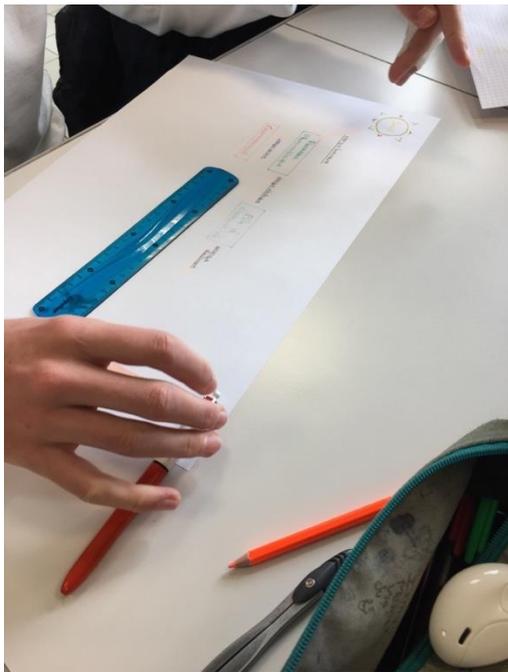
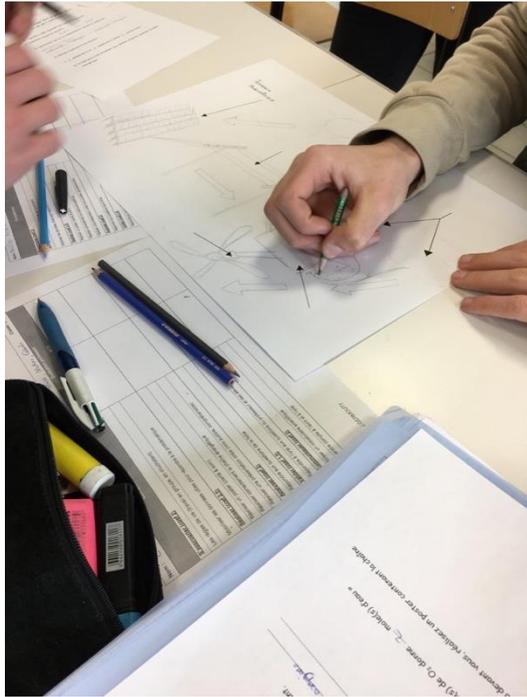


Figure 20 : Production des élèves durant la séance



7.2. La séance d'oral en accompagnement personnalisé

7.2.1. Ordre de passage

Cette séance s'est déroulée le lundi 6 mai de 10h30 à 11h30. Pour des raisons diverses, les séances d'accompagnement personnalisés ont été décalées et à cela se sont ajoutées les vacances.

Dans un premier temps, pour savoir l'ordre de passage, j'ai organisé un quizz autour de la verrerie en chimie. Comme je l'ai dit précédemment, c'est une classe qui s'investit très peu sauf lorsqu'il s'agit d'activités ludiques ou compétitives. Les deux élèves absents le jour de la réalisation des posters étaient jury et avaient révisé avant le quizz pour pouvoir animer celui-ci.



Figure 21 : Capture d'écran du Quizz

A la suite du Quizz, le groupe gagnant désignait qui devait passer en premier pour présenter son poster. Ensuite, à chaque passage le groupe précédent désignait le suivant.

Néanmoins, comme la séance de réalisation du poster datait, j'ai à nouveau montré la vidéo qui leur servait de support la première fois, et le montage de la pile à combustible. Enfin ils ont eu 5 minutes de concertation.

J'ai constitué un jury pour analyser et poser des questions pour rendre la présentation plus conventionnelle. Ce jury était donc composé des deux élèves absents et de moi-même. Leur rôle était de noter les tics de langage, les blancs, la clarté et surtout de juger si les explications de leurs camarades étaient compréhensibles. A mon sens, comme ils n'avaient pas été présents lors de la réalisation des posters, savoir s'ils comprenaient ou non donnait un avis objectif sur la clarté du poster et de la présentation orale.



7.2.2. Passage à l'oral

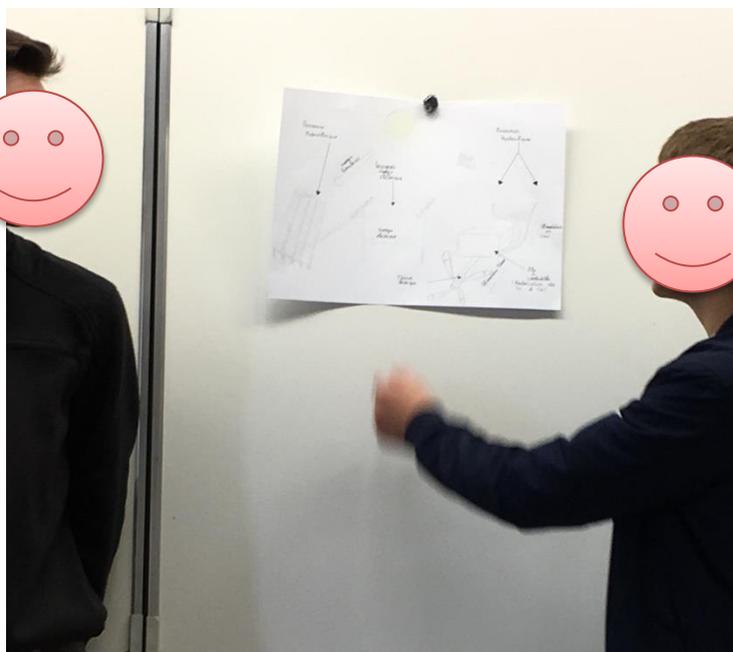
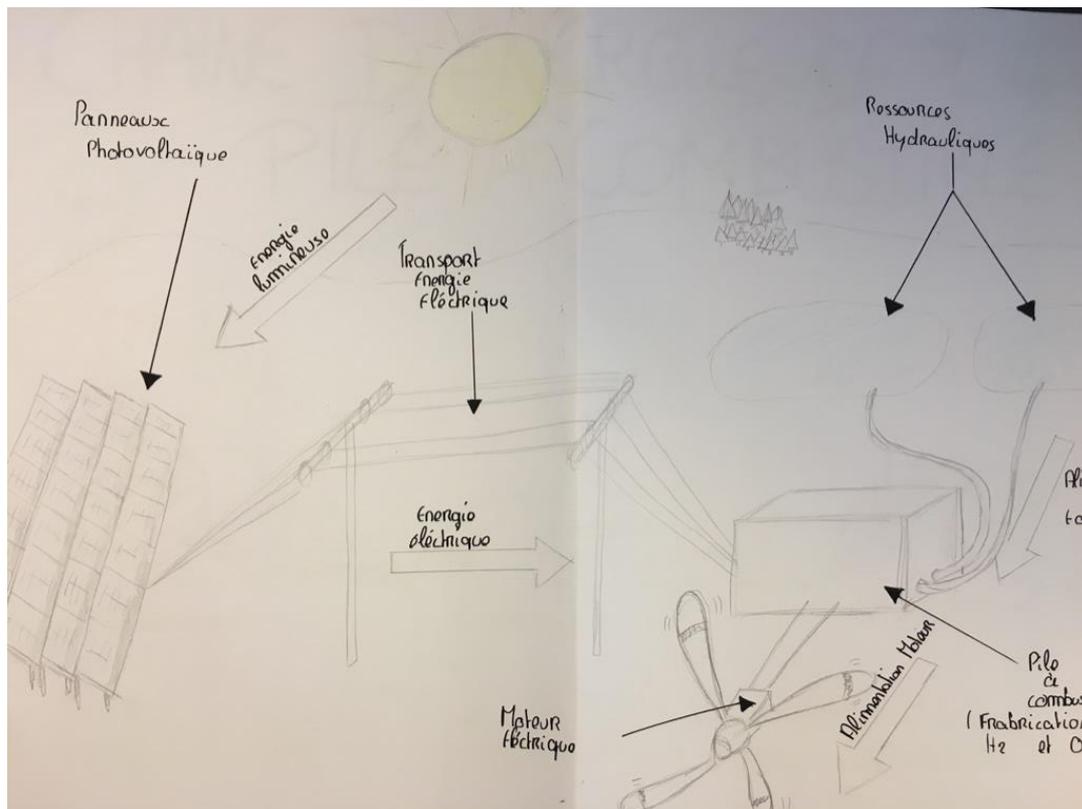


Figure 22 : Présentation d'un de leur poster

Globalement, les groupes ont bien parlé, articulé et ont su répondre aux questions. Ils ont notamment su redonner l'équation bilan de la réaction chimique sans avoir leur fiche sous leurs yeux.



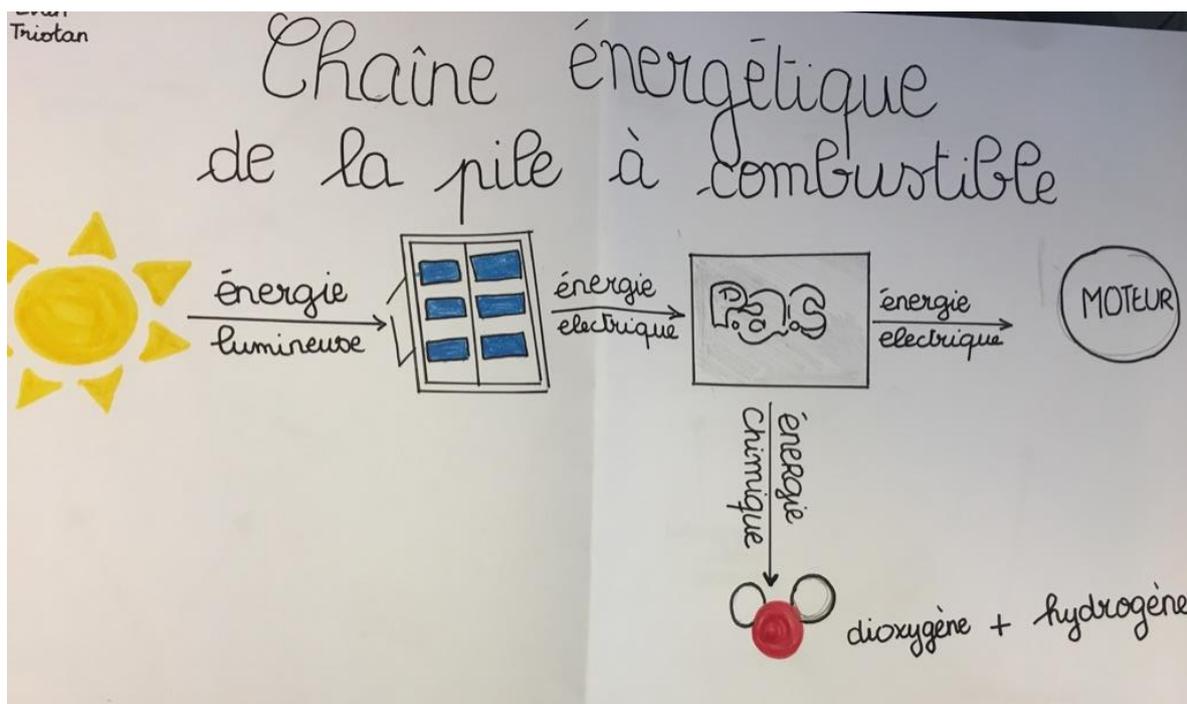


Figure 23 : Poster du groupe 2

Dans la Figure 23, la chaîne est réussie, à un détail près, ils ont dessiné la molécule d'eau et non pas celle du dioxygène et du dihydrogène. Mais encore une fois, à l'oral ils ont su comprendre leur erreur.

Dans la Figure 22, les élèves ont privilégié l'aspect artistique aux faits scientifiques et ils n'ont donc pas respecté le formalisme. De ce fait, leur travail ne permet pas de comprendre que les panneaux solaires permettent d'alimenter en « carburant » la pile à combustible et non pas à la faire fonctionner pour activer le moteur.

Lorsque le groupe est passé à l'oral, ils s'en sont rendu compte en m'expliquant que si leur poster était juste alors il n'y aurait qu'à brancher le panneau solaire au moteur. Je n'ai eu qu'à pointer une incohérence et ils ont su analyser leurs erreurs.

Après le passage des élèves, soit 5 groupes, j'ai aidé les élèves à réaliser une liste de ce qu'il fallait faire et ne pas faire à l'oral. Ayant tous une certaine aisance à l'oral, nous avons pu nous focaliser sur des points d'amélioration tels qu'éviter de lire ses notes. Les dernières minutes du cours ont été consacrées à leurs interrogations sur des méthodes pour garder le fil de la présentation en tête. Comme nous sommes désormais sur la partie du programme des réactions d'oxydo-réduction, nous avons travaillé par la suite sur les demi-équations des couples. Ils ont ainsi pu faire le lien avec l'équation bilan.



8. Remédiation

A travers ces deux séances, j'ai pu constater des difficultés auxquelles j'aurais pu remédier à travers différents documents. Les posters montrent que certains se sont éparpillés et n'ont pas été en mesure de réaliser une chaîne énergétique cohérente. Il aurait été utile de leur fournir la chaîne énergétique avec des « trous » à compléter afin qu'ils ne soient pas perturbés par la recharge de la pile et la décharge de celle-ci.

Si le poster était déjà pré-rempli, la séance aurait pu nécessiter une heure et demie. En effet, il m'aura fallu au final 2h30 pour finaliser cette partie du chapitre.

Toutefois, je suis agréablement surprise qu'ils aient apprécié l'exercice et qu'ils se soient autant investis ; certains voulaient rester durant la récréation pour terminer leur poster.

Pour la séance sur la conception de la chaîne énergétique j'aurais donc fait en deux temps. Dans un premier temps, j'aurais montré la création des « carburants » et les élèves auraient réalisé une première chaîne énergétique.

Dans un second temps, on aurait utilisé la pile telle quelle pour activer le moteur. Les élèves auraient pu ainsi terminer la chaîne énergétique plus facilement.



Conclusion

Durant ces travaux nous avons pu mettre en évidence que la pile à combustible produit de l'électricité pouvant alimenter un moteur électrique et de ce fait entraîner les roues du véhicule. Pour produire de l'énergie, la pile n'a besoin que d'hydrogène et d'air ; deux composés qui se trouvent facilement sur la Terre. En produisant de l'électricité, la pile produit aussi de la chaleur qui peut être récupérée ainsi que de l'eau, mais pas de gaz à effet de serre. Les véhicules motorisés à PEMFC paraissent donc comme une solution face aux moteurs diesels pour diminuer la prolifération des gaz à effets de serre.

Toutefois, l'un des principaux soucis est le dihydrogène lui-même. Un gaz léger, fuyant et explosif. Un gaz qui est contenu dans l'eau, mais qu'il est difficile à extraire de manière écologique. En effet, la production du dihydrogène s'effectuant par réformage de combustibles fossiles, le bilan écologique n'est pas aussi vertueux que l'on aurait pu le penser. Malgré toutes ces difficultés, les constructeurs continuent d'investir dans la recherche sur la pile à combustible pour permettre l'extraction et le stockage de l'hydrogène dans des conditions favorables et écologiquement durables.

L'utilisation de cette ressource énergétique et sa fabrication permettent notamment aux élèves de s'interroger sur l'environnement ainsi que sur les alternatives écologiques et durables. Il se trouve que les 1^{ère} STI2D sont particulièrement sensibilisés à ces sujets durant leur formation et en fait donc une classe propice à l'exploration de ces nouvelles alternatives « écologiques ».

Lors des séances dédiées à cette thématique, ils ont pu réaliser un poster et un oral, ce qui leur a permis de s'entraîner et d'appréhender les prochains oraux qu'ils auront à passer. Ils ont aussi compris la nécessité d'avoir un poster clair, car lors de leur passage ils se sont rendus compte par eux-mêmes des incohérences de leur travail.

Cette partie du chapitre sur la combustion et les chaînes énergétiques m'a également permis d'introduire aisément les réactions d'oxydo-réduction, et de leur faire comprendre le terme de « pile » via les échanges électroniques. Ce sujet sera à nouveau utilisé pour aborder le thème du transport.



Références bibliographiques

- [1] « Après les diesel, Paris veut bannir les voitures à essence d'ici 2030 », *Challenges*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.challenges.fr/automobile/actu-auto/apres-les-diesel-hidalgo-veut-bannir-de-paris-les-voitures-a-essence-d-ici-2030_505726. [Consulté le: 16-déc-2017].
- [2] J.-B. Baudin, *Chimie, Term. S: obligatoire : programme 2002*. Paris: Nathan, 2006.
- [3] E. Universalis, « PILE DE VOLTA », *Encyclopædia Universalis*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.universalis.fr/encyclopedie/pile-de-volta/>. [Consulté le: 16-déc-2017].
- [4] J. Sarrazin et M. Verdager, *L'oxydoréduction: concepts et expériences : à l'usage des étudiants du premier cycle de l'enseignement supérieur (universités et classes préparatoires), des candidats aux concours de recrutement des professeurs des enseignements de second degré (C.A.P.E.S. et agrégations de sciences physiques), de la formation continue des enseignants et des ingénieurs*. Paris: Edition Marketing, 1991.
- [5] « Historique de la Pile à Combustible ». [En ligne]. Disponible sur: <http://pileacombustible.free.fr/historique.htm>. [Consulté le: 16-déc-2017].
- [6] B. Blunier et A. Miraoui, *Piles à combustible: principes, modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés*. Paris: Ellipses, 2007.
- [7] P. Arnaud, F. Rouquerol, G. Chambaud, et R. Lissillour, *Les Cours de Paul Arnaud: Chimie physique, cours avec 350 questions et exercices corrigés*. Paris: Dunod, 2007.
- [8] P. STEVENS, F. NOVEL-CATTIN, A. HAMMOU, C. LAMY, et M. CASSIR, « Piles à combustible », *Ref: TIP301WEB - « Conversion de l'énergie électrique »*, 10-août-2000. [En ligne]. Disponible sur: <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.unilim.fr/base-documentaire/energies-th4/accumulateurs-d-energie-42243210/piles-a-combustible-d3340/>. [Consulté le: 16-déc-2017].
- [9] S. Meddah et A. Menasria, « Etude d'un système énergétique à pile combustible destiné à une application résidentielle ». Université de Bechar Algérie, 2006.
- [10] Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, et X. C. Adroher, « A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research », *Appl. Energy*, vol. 88, n° 4, p. 981- 1007, avr. 2011.
- [11] J. Andre, « Optimisation des propriétés de conduction électronique et de passivité d'aciers inoxydables pour la réalisation de plaques bipolaires de pile à combustible de type PEMFC ». INP Grenoble, 2007.
- [12] R. Souzy et B. Ameduri, « Functional fluoropolymers for fuel cell membranes », in *Fluorinated Materials for Energy Conversion*, 2005, p. 469- 511.
- [13] K. D. Kreuer, « On the complexity of proton conduction phenomena », *Solid State Ion.*, vol. 136- 137, p. 149- 160, 2000.
- [14] K. D. Kreuer, « On the development of proton conducting materials for technological applications », *Solid State Ion.*, vol. 97, n° 1- 4, p. 1- 15, 1997.
- [15] M. C. Wintersgill et J. J. Fontanella, « Complex impedance measurements on Nafion », *Electrochimica Acta*, vol. 43, n° 10- 11, p. 1533- 1538, 1998.
- [16] K.-D. Kreuer, S. J. Paddison, E. Spohr, et M. Schuster, « Transport in proton conductors for fuel-cell applications: Simulations, elementary reactions, and phenomenology », *Chem. Rev.*, vol. 104, n° 10, p. 4637- 4678, 2004.
- [17] T. H. Yu, Y. Sha, W.-G. Liu, B. V. Merinov, P. Shirvanian, et W. A. Goddard, « Mechanism for Degradation of Nafion in PEM Fuel Cells from Quantum Mechanics Calculations », *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 133, n° 49, p. 19857- 19863, déc. 2011.
- [18] T. Akiki, « Modélisation de la dégradation de la production de puissance d'une pile à combustible suite aux sollicitations mécaniques », thesis, Belfort-Montbéliard, 2011.



- [19] « Caractérisation d'un système pile à combustible en vue de garantir son démarrage et fonctionnement à température ambiante négative ».
- [20] B. Abderezzak et A. Dollet, *Introduction aux phénomènes de transferts dans la pile à combustible PEMFC*. 2018.
- [21] « Le moteur à hydrogène tente un nouveau come-back », 01-févr-2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.letemps.ch/societe/2017/02/01/moteur-hydrogene-tente-un-nouveau-comeback>. [Consulté le: 16-déc-2017].
- [22] « Pourquoi Honda mise sur la voiture électrique à hydrogène », *Challenges*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.challenges.fr/automobile/essais/essai-honda-clarity-fuel-cell-electrique-a-pile-a-combustible-650-km-d-autonomie_472985. [Consulté le: 16-déc-2017].
- [23] « Après un test de cinq ans, CarPostal renonce aux bus à pile à combustible », *rts.ch*, 01-févr-2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rts.ch/info/suisse/8355006-apres-un-test-de-cinq-ans-carpostal-renonce-aux-bus-a-pile-a-combustible.html>. [Consulté le: 08-mai-2018].
- [24] D. TIGREAT, « Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés », INERIS, DRA-08-95313-07833B, juin 2008.
- [25] F. F. Abdi, L. Han, A. H. M. Smets, M. Zeman, B. Dam, et R. van de Krol, « Efficient solar water splitting by enhanced charge separation in a bismuth vanadate-silicon tandem photoelectrode », *Nat. Commun.*, vol. 4, p. 2195, juill. 2013.



Table des annexes

Annexe I. Lien programme – Sujet de T.E.R.....	54
Annexe II. Présentation de l'établissement	55
Annexe II.1. Présentation des services.....	55
Annexe II.2. Emploi du temps.....	55



Annexe I. Lien programme – Sujet de T.E.R

Niveau	Relation pédagogique avec le sujet
Cycle 4	<ul style="list-style-type: none">- Sources d'énergies- Energies renouvelables
Seconde générale	<ul style="list-style-type: none">- Transformations chimiques
Premières S, ES, L	<ul style="list-style-type: none">- Pile à combustible
1^{ère} STI2D	<ul style="list-style-type: none">- Les polymères- Energie chimique
1^{ère} STL	<ul style="list-style-type: none">- Les polymères- L'énergie chimique- Chimie face à l'environnement
1^{ère}, Terminale STD2A	<ul style="list-style-type: none">- Les polymères- Oxydoréduction- Electrolyse
1^{ère}, Terminale ST2S	<ul style="list-style-type: none">- Oxydoréduction
1^{ère}, Terminales TMD	<ul style="list-style-type: none">- Electricité
Terminales S, STI2D, STL	<ul style="list-style-type: none">- Pile à combustible
CAP	<ul style="list-style-type: none">- Risques chimiques- Protéger l'environnement
Brevet des métiers d'arts	<ul style="list-style-type: none">- Oxydoréduction
BAC PRO	<ul style="list-style-type: none">- Oxydoréduction- Piles



Annexe II. Présentation de l'établissement

Le lycée Raoul Dautry est un établissement situé aux bords du centre-ville de Limoges. Il possède plusieurs filières : générale, technologique et professionnelle. Il est également possible d'y poursuivre ses études post-bac car un large panel de formations en BTS (CIRA, traitements de eaux, biotechnologies...) est proposé. Le proviseur du lycée est M. Lacote et la proviseure adjointe est Mme Lemaitre.



Figure 24 : Devanture du Lycée Raoul Dautry

Annexe II.1. Présentation des services

Durant cette année de stage, je suis chargée d'enseignement de Physique – Chimie en tronc commun pour une classe de première STI2D et je les aide en accompagnement personnalisé également. J'ai aussi à charge une classe de seconde pour l'enseignement, et un enseignement d'exploration pour un groupe de classe de seconde (MPS : Méthodes et Pratiques Scientifiques).

Annexe II.2. Emploi du temps

Mon emploi du temps à l'année est présenté en figure 13. Le lundi matin est consacré aux élèves de 1^{ère} STI2D, qui est suivie une semaine sur deux d'une heure d'AP. Les élèves étant 18, il n'y a pas de classes dédoublées. L'après-midi, j'ai donc la classe de seconde entière, comptabilisant 36 élèves. Le mardi est à nouveau avec les premières pendant une heure et demie, et selon le calendrier préétabli avec les collègues j'ai ensuite l'enseignement d'exploration avec un groupe de seconde, d'une vingtaine d'élèves. Le mercredi matin est ensuite consacré aux secondes en classe dédoublées.



J'ai décidé d'utiliser une séance d'une heure et demie pour faire un travail de recherche avec ma classe de première STI2D portant sur la réalisation d'un poster et une présentation orale de 1 à 2 minutes. Il est en effet important pour eux qu'ils s'entraînent à l'oral et construisent parfois leur propre raisonnement avec leurs propres mots.

	lun. 19 nov.	mar. 20 nov.	mer. 21 nov.
08h00			
09h00	PHYSIQUE-CHIMIE 1STIDD3 302		PHYSIQUE-CHIMIE [2DE8-A] 326 (TP Physique)
10h00	PHYSIQUE-CHIMIE 1STIDD3 302		PHYSIQUE-CHIMIE [2DE8-A] 326 (TP Physique)
11h00	ACCOMPAGNEMT. PERSO. 1STIDD3 303		PHYSIQUE-CHIMIE [2DE8-B] 307 (TP Physique)
12h00			
13h00			
14h00		PHYSIQUE-CHIMIE 1STIDD3 313 (TP Chimie)	
15h00			
16h00	PHYSIQUE-CHIMIE 2nde8 303		
17h00		METHOD.PRAT.SCIENTIF ETCHEVERRY-BEITIA J. SUKHDEO S. [2MP-SCGR.B] 122 (TP SVT) 302	
18h00			

Figure 25 : Emploi du temps de l'année 2018/2019



Chimie et conversion d'énergie

« La maire de Paris poursuit son combat contre les voitures à moteur thermique. Après les véhicules diesel qui ne seront plus les bienvenus dans la capitale à partir de 2024, l'édile socialiste souhaite également bannir les voitures à essence de la capitale d'ici 2030. Il s'agit de l'un des éléments clés du plan climat à Paris, présenté mercredi 11 octobre 2017 »

Face à ces mesures, les automobilistes doivent se tourner vers d'autres alternatives plus écologiques. Dans ce travail de recherche, nous nous sommes focalisés sur les voitures fonctionnant avec une pile à combustible à hydrogène. En effet, des voitures prototypes existent déjà mais sont encore en minorité dans le commerce par rapport aux voitures électriques. La prise de conscience collective sur la nécessité de voitures « plus propres » permet donc aux élèves de s'interroger sur le bilan énergétique et de raccrocher leurs connaissances à des notions concrètes.

Mots-clés : **pile à combustible, voiture électrique, chaîne énergétique**

Chemistry and energy conversion

“The mayoress of Paris carries on with her fight against combustion engine based cars. The effective ban of diesel engine based cars in the French capital city will happen in 2024 and now, the socialist town councillor wishes to ban combustion engine based cars by 2030. It is one of the key elements of the Paris climate plan presented on Wednesday the 11th of October 2017”

Facing these strong measures, car drivers will have to opt for more environmentally friendly options. In this research work, we focused on cars using a hydrogen based fuel cell. Even though prototypes of such cars already there are still few that are commercialised compared to electric cars. The collective awareness of the need of environmentally friendly cars allow students to question themselves on the energy efficiency and to use their knowledge on tangible notions

Keywords: fuel cell, electric car, energy chain

