



ÉCOLE CENTRALE LYON

PROJET D'ÉTUDES ENTRANTS 2015
PROJET D'ÉTUDES N°73

Mise en réseau de plusieurs piles à
combustible microbiennes pour la
production d'énergie dans une station
d'épuration

Noms des élèves :

Louis CALOT
Théo CHARMARANDE
Oussama HOURIRA
Pierre LECHEVALLIER
Léo PEUZIAT
Jacques ZWAR

Commanditaire et Tuteur scientifique :

Naoufel HADDOUR

Conseiller en communication :

Sarra DAHMANI / Baptiste CELLE

Conseiller en gestion de projet :

Olivier DESSOMBZ

Département d'accueil :

AMPÈRE

10 juin 2016

Résumé

La récente prise de conscience des conséquences environnementales des activités humaines pousse la science à trouver des nouvelles sources d'énergies vertes. Ainsi, il a été récemment découvert que certaines bactéries utilisées pour traiter l'eau en station d'épuration pouvaient générer de l'énergie. Ces bactéries sont exploitées dans une nouvelle technologie pour valoriser les eaux usées en produisant de l'électricité. Cette technologie appelée piles à combustible microbiennes n'est pas encore au point, c'est pourquoi des précédents projets d'étude l'ont déjà étudiée.

Cette année, nous avons traité le problème de la mise en réseau de plusieurs piles, qui avait été mis en valeur pendant le précédent projet. Nous avons aussi essayé d'améliorer les performances de la pile. Notre démarche consistait d'abord en une phase de recherches et tests pour déterminer les dimensions et matériaux de la pile. Ensuite, nous avons conçu le modèle numérique de la pile pour pouvoir enfin créer les différentes pièces à l'aide d'une imprimante 3D. La dernière étape a permis de tester le fonctionnement de notre prototype. Le problème de la mise en série a été résolu grâce à un vérin et une trappe permettant d'isoler les piles, mais permettant de changer les effluents pour une utilisation continue de la pile. Les résultats obtenus sur ce système sont très concluants et les piles ont pu être utilisées en série. Néanmoins, nous n'avons pas obtenu les mêmes performances énergétiques que l'année dernière. La résolution des problèmes de mise en série est tout de même un grand pas pour l'avenir de cette technologie en station d'épuration.

Abstract

The recent awareness of the environmental consequences caused by humans pushes science to find new sources of renewable energy. Furthermore, it has lately been discovered that certain bacteria, that are used to treat sewage, are able to generate electric energy. The technology of microbial fuel cells is not in an advanced state yet, therefore previous research projects (PE) have already studied this technology.

This year's focus was on the usage of multiple fuel cells in the same electrical network, where a problem has been detected during the previous project. We also wanted to improve the performance and efficiency of the cell. Our first approach was an investigative research on the performance of the fuel cells to determine their optimal dimensions and materials. Then we designed CAD models to subsequently create these parts using a 3D printer. Then the last step was to analyse the functionality of our prototype. The problem of serialisation was solved by a closing device, consisting of a cylinder and a trap, allowing us to isolate the cells among each other. This system has been tested successfully so we could improve the performance of multiple cells in one environment. However, although our cells were slightly less efficient individually than the last year's, our solution to combining multiple cells connected in series is a great step for the future of this technology and its use in wastewater treatment plants.

Remerciements

Notre projet d'étude sur la mise en série des piles à combustible microbiennes n'aurait pas pu voir le jour sans de nombreuses personnes que nous souhaitons tout particulièrement remercier pour leur temps et leur expertise.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre tuteur, mais aussi commanditaire Naoufel Haddour, qui a su nous apporter ses connaissances sur le sujet tout en nous laissant le champ libre pour explorer de nouvelles idées.

Nous souhaiterions également remercier le Laboratoire Ampère et l'Ecole Centrale de Lyon pour la mise à disposition des locaux et du matériel et pour le financement du projet.

La réalisation de nos piles n'aurait pas été possible sans l'aide apportée par Richard Barthollet, qui nous a très souvent aidé et qui nous a mis à disposition ses outils sans lesquels nos piles n'auraient pas pu voir le jour.

Merci à Olivier Dessombz, Sarra Dahmani et Baptiste Celle, notre conseiller en gestion de projet et conseillers en expression et organisation, pour leur regard extérieur sur notre travail. Nous les remercions pour leurs remarques et leurs conseils lors des Tds et de nos deux rendez-vous de pilotage.

Merci à Agathe Paitier, doctorante au laboratoire Ampère, pour son aide lors de nos manipulations.

Nos remerciements vont aussi à Sébastien Cecillon, qui nous a dispensé la formation sécurité du Laboratoire Ampère et qui nous a aidé à réparer l'imprimante.

Les essais de nos piles n'auraient pas pu être possibles sans la coopération des chercheurs de la station expérimentale de la Feyssine, notamment Didier Coupet technicien de la plateforme et Jean-Pierre Canler, ingénieur-chercheur à l'IRSTEA (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) que nous remercions tous deux.

Finalement, nous remercions Bertand Houx et Damien Constant du département Mécanique des solides de l'Ecole Centrale de Lyon pour leur aide sur la fabrication des pièces.

Table des matières

Résumé	1
Remerciements	2
Glossaire	7
Introduction	10
1 Présentation du cadre théorique	11
1.1 Fonctionnement d'une station d'épuration	11
1.2 Fonctionnement d'une biopile	12
1.3 Problème de la conduction ionique	13
2 Principe retenu pour la pile	15
3 Détermination expérimentale de certaines caractéristiques de la pile	16
3.1 Expérience 1 :Choix du matériau de l'anode	16
3.2 Expérience 2 :Choix du rapport de surface cathode/anode	16
3.3 Expérience 3 :Choix du volume de la pile	17
4 Conception des piles	19
4.1 Cahier des charges pour la conception	19
4.2 Avantages/inconvénients de l'impression 3d	20
4.3 Choix du matériau	20
4.4 Vérin pneumatique	22
4.4.1 Structure	23
4.4.2 Dimensionnement	24
4.5 Première Pile (pile bleue)	25
4.6 Deuxième Pile (pile verte)	27
5 Fabrication des piles	28
5.1 Principe de l'impression 3D	28
5.1.1 Principe général	28
5.1.2 Paramètres d'impression	28
5.2 Impression de nos pièces	30
5.3 Préparation et imperméabilisation des pièces	30
5.4 Fabrication de la cathode	31
5.5 Piston	32
5.5.1 Fabrication	32
5.5.2 Rendu final du vérin	32
5.6 Assemblage des pièces	33
5.7 Bilan de la fabrication des piles	33
5.7.1 Rendu final	33
5.7.2 Coût de la pile	33
6 Caractérisations et tests des piles	34
6.1 Développement du biofilm	34
6.2 Tests unitaires	36
6.2.1 Analyse des caractéristiques	37
6.2.2 Lecture des valeurs de tension à vide et résistance interne	37

6.2.3	Obtention d'une puissance maximum	38
6.2.4	Comparaison avec la pile de l'année dernière	38
6.3	Mise en série des piles	38
6.4	Aération des bassins d'essais	41
6.5	Conclusion des essais	42
7	Perspectives	43
8	Conclusion	44
	Références	46
A	Cahier de Charges	48
B	Rapport de l'expérience de détermination du matériau de l'anode	49
B.1	Objectifs et présentation du contexte	49
B.2	Matériaux	49
B.3	Protocole	49
B.4	Résultats	49
B.5	Conclusion	50
C	Rapport de l'expérience de détermination du rapport Cathode/Anode	51
C.1	Objectifs	51
C.2	Installation	51
C.3	Protocole expérimental	51
C.4	Résultats	52
D	Rapport de l'expérience d'autonomie de la pile	53
D.1	Matériel	53
D.2	Protocole	53
D.3	Résultats	53
D.4	Calcul de l'autonomie	54
E	Manuel d'utilisation de l'imprimante 3d appliqué à la pile à combustible	55
E.1	Paramètres	55
E.2	Défauts courants et solutions	56
F	Prix de la pile	58
G	Protocole de caractérisation des piles	60
H	Vérin et pistons	61
H.1	Calcul de la force du piston (si il est parfait)	61
H.2	Calcul des constantes du ressort	61
I	Appendice de gestion de projet	62

Table des figures

1.1	Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration[5]	11
1.2	Schéma d'une pile [7]	12
1.3	Pile à combustible	12
1.4	Geobacter à l'oeuvre[10]	12
1.5	Schéma de principe d'une pile microbienne [3]	13
1.6	Schéma représentant les courants de fuite ioniques qui se produisent en cas de non isolation des piles (cas du PE précédent)	14
2.1	Schéma de principe du fonctionnement des piles en configuration ouverte	15
2.2	Schéma de principe du fonctionnement des piles en configuration fermée	15
3.1	Les deux piles utilisées au cours de l'expérience de test d'anode	16
3.2	Pile utilisée lors de l'expérience du rapport anode/cathode	17
3.3	Pile du PE précédent utilisée lors de l'expérience de consommation	17
3.4	Courbe représentant l'évolution de la tension au cours du temps pour l'expérience de consommation	18
4.1	Cube de test du PLA dans des effluents	22
4.2	Schéma du vérin à simple effet utilisé. La pression fait sortir le piston (image de droite) et le ressort le fait rentrer en l'absence de pression (image de gauche). [17]	22
4.3	Modèle 3D du vérin	23
4.4	Test d'un vérin d'essai grâce à un compresseur et une balance	25
4.5	Vue en coupe de la première Pile	26
4.6	Vue en coupe de la deuxième Pile	27
5.1	Principe de l'impression 3D	28
5.2	Défaut d'impression sur une cathode dû à une mauvaise température du lit	29
5.3	Cheminée équipée de sa jupe d'impression pour éviter le décollement	29
5.4	structure alvéolaire lors de l'impression des pièces	29
5.5	Pose du PDMS sur une pièce de la pile verte	30
5.6	formule chimique de PDMS	31
5.7	Application de la couche de PTFE pour imperméabiliser le tissu.	31
5.8	La cathode assemblée de la première pile	31
5.9	Vérin N°1	32
5.10	Piston N°1	32
5.11	Pile bleue après un séjour de 2 semaines dans les effluents (le réglet mesure 20cm)	33
5.12	Pile verte après un séjour de 2 semaines dans les effluents (le réglet mesure 20cm)	33
6.1	Bassin d'essai avec agitateur	34
6.2	Schéma électrique du montage expérimental pour le développement du biofilm	35
6.3	Puissance fournie lors du développement du biofilm. La ligne bleue correspond à l'ajout d'acétate.	35
6.4	Courbes de polarisation des piles	36
6.5	Caractérisations en puissance des deux piles	36
6.6	Schéma électrique équivalent d'une pile	37
6.7	Dispositif d'essais avec les piles isolées	39
6.8	Dispositif d'essais avec les piles dans le même bassin	39
6.9	Schéma électrique équivalent des deux piles en série	40
6.10	Caractérisation en puissance des piles en série dans trois configurations différentes	40
6.11	Essais avec injection d'air dans les effluents	41
6.12	Caractérisation en puissance de la pile verte pour la configuration fermée et ouverte lors de l'injection d'air.	42
B.1	Tension (en Volts) en fonction du temps (en jours)	50

B.2	Piles aux début de l'expérience	50
B.3	Anode en cuivre après expérience,pas de biofilm	50
B.4	Pile avec anode en cuivre après expérience	50
B.5	Pile avec anode en tissu de carbone après expérience	50
C.1	Schéma de principe de l'expérience	51
C.2	Montage pour trouver le meilleur Rapport anode/cathode	51
D.1	Evolution de la tension de la première expérience	54
D.2	Évaluation de la tension de la deuxième expérience	55
D.3	Schéma électrique	55
E.1	Défauts pendant l'impression	56
G.1	Potentiostat	60
	Trombinoscope	62
I.1	Un échec cuisant d'impression	62
I.2	L'équipe du projet sur le terrain d'opération en tenue réglementaire	63

Glossaire

<i>ABS</i>	Matériau plastique utilisé pour l'impression 3D (voir partie 4.3).
<i>Aérobic</i>	Le terme aérobic s'applique à un être ou à un objet qui a besoin de dioxygène pour vivre ou fonctionner.
<i>Anaérobic</i>	Le terme anaérobic s'applique à un être ou à un objet qui a besoin de l'absence de dioxygène pour vivre ou fonctionner.
<i>Anode</i>	Électrode où la réaction d'oxydation a lieu. Des électrons sont arrachés aux espèces à la surface de cette électrode.
<i>Bactérie</i>	Organisme vivant microscopique unicellulaire dépourvu de noyau et le plus souvent unicellulaire.
<i>Biodégradable</i>	Se dit des produits industriels et des déchets qu'une action bactérienne, naturelle ou induite, décompose assez rapidement et les fait disparaître de l'environnement en les convertissant en molécules simples utilisables par les plantes.
<i>Biofilm</i>	Un biofilm est une communauté multicellulaire plus ou moins complexe de micro-organismes (bactéries, champignons, algues ou protozoaires), adhérant entre eux et à une surface. Il se forme généralement dans l'eau ou en milieu aqueux.
<i>Biopile</i>	Pile utilisant des organismes vivants pour produire de l'énergie électrique.
<i>Boues activées</i>	Boues issues de la décantation des effluents lors du traitement en station d'épuration et renvoyé dans le bassin d'aération.
<i>CAO</i>	Conception Assistée par Ordinateur : ensemble des techniques informatiques utilisables dans le processus de conception d'un produit nouveau.
<i>Cathode</i>	Électrode où la réduction a lieu. Des électrons sont fournis, dans ce cas, à des espèces oxydantes à la surface de l'électrode.
<i>Combustible</i>	Matières susceptibles de fournir de l'énergie.
<i>Conduction ionique</i>	La présence d'ions dans un solide ou le plus souvent dans une solution permet de conduire un courant électrique.
<i>Demi-pile</i>	Lieu physique où se déroule l'une des deux demi-réactions d'oxydo-réduction. Dans la pile Daniell, une demi-pile correspond un béccher (ustensile creux en verre utilisé en chimie).

<i>Effluent</i>	Désigne les eaux usées domestiques et urbaines et par extension les eaux usées issues des procédés industriels.
<i>Électrode</i>	Conducteur d'électrons (donc dans lequel peut circuler un courant) qui est le siège d'une réaction d'oxydation (anode) ou de réduction (cathode) dans une demi-pile.
<i>Électrolyte</i>	Un électrolyte est une substance conductrice, car elle contient des ions mobiles. Il existe des électrolytes liquides et solides.
<i>Électron</i>	Porteur élémentaire de charge électrique négative.
<i>Enceinte thermorégulée</i>	Caisson fermée autour de l'imprimante 3D permettant de contrôler la température à l'intérieur de celle-ci tout au long de l'impression.
<i>Énergie fossile</i>	Énergie issue de la combustion de matière organique fossilisée et contenue dans le sous-sol terrestre comme le pétrole, le charbon ou le gaz naturel.
<i>Impression 3D</i>	L'impression tri-dimensionnelle permet de produire un objet réel : un opérateur dessine l'objet sur un écran en utilisant un outil de Conception assistée par ordinateur (CAO). Le fichier 3D obtenu est envoyé vers un logiciel spécifique qui le découpe en tranches et l'envoie à l'imprimante qui dépose ou solidifie de la matière couche par couche pour obtenir la pièce finale.
<i>Ion</i>	Espèce chimique de charge non nulle dont la charge est un multiple de la charge élémentaire.
<i>Lit chauffant</i>	Le lit correspond à la plaque sur laquelle la buse de l'imprimante 3D dépose les couches successives de plastique.
<i>Matière organique</i>	La matière organique est la matière fabriquée par les êtres vivants (végétaux, animaux, champignons et autres décomposeurs dont micro-organismes).
<i>Microbiologie</i>	Ensemble des disciplines biologiques (bactériologie, mycologie, virologie et parasitologie) qui s'occupent des micro-organismes.
<i>Micro-organisme</i>	Être vivant microscopique tel que les bactéries, les virus, les champignons unicellulaires (levures), et les protistes.
<i>Oxydation</i>	Réaction lors de laquelle un composé chimique va perdre des électrons.
<i>Oxydoréduction</i>	Action chimique d'un corps oxydant sur un corps réducteur, avec à la fois une oxydation du réducteur et une réduction de l'oxydant.

<i>Pile microbienne</i>		Une pile microbienne ou pile à bactérie est une pile basée sur le principe des piles à combustible : la cathode est alimentée en oxygène (en général par l'air) et l'anode est constituée d'une électrode placée au sein d'une chambre contenant des bactéries et de quoi les nourrir.
<i>PLA</i>		Matériau plastique utilisé pour l'impression 3D (voir partie 4.3).
<i>Polymère</i>		Substance composée de molécules caractérisées par la répétition, un grand nombre de fois, d'un ou de plusieurs atomes ou groupes d'atomes.
<i>Proton</i>		Porteur élémentaire de la charge électrique positive.
<i>Réaction chimique</i>	<i>biochi-</i>	Phénomène de transformation chimique d'une substance à l'intérieur d'un être vivant.
<i>Réduction</i>		Réaction lors de laquelle un composé chimique va gagner des électrons.

Introduction

Le début du XXIème s'accompagne d'une prise de conscience de l'importance des enjeux environnementaux, notamment de la nécessité de régler le problème des énergies fossiles. Il resterait entre 40 et 60 ans de réserves de pétrole, 70 ans de réserves de gaz, 200 ans de réserves de charbon et 50 ans de réserves d'uranium selon les prévisions [1]. La raréfaction de ces énergies pourrait entraîner une montée des tensions géopolitiques dans le monde. De plus, les rejets de CO₂ provenant de l'utilisation de ces énergies (sauf uranium) mènent aux changements climatiques que nous connaissons actuellement, pouvant à terme mener à des déplacements de population, des famines, et une destruction de l'environnement [2]. Il est donc important de réduire la consommation des énergies fossiles d'une part en réduisant notre consommation globale d'énergie et d'autre part en utilisant des énergies renouvelables. Une source d'énergie renouvelable pourrait être les eaux usées qui arrivent dans les stations d'épuration. En effet, certaines bactéries, par un processus électrochimique, sont capables de transformer les matières organiques présentes dans ces eaux usées en électricité. Selon les estimations, convertir seulement 20% des matières organiques arrivant en station couvrirait l'ensemble des besoins énergétiques de la station [3]. La technologie qui pourrait produire cette énergie est appelée pile à combustible microbienne et peut être placée directement dans les bassins de stations d'épuration. Cette technologie est encore très peu efficace en terme de production d'énergie et beaucoup de problèmes sont à résoudre pour penser à son utilisation industrielle. Ces piles sont étudiées au laboratoire Ampère où deux précédents Projets d'Etudes ont déjà eu lieu, le dernier donnant lieu à une amélioration conséquente de performance par rapport au PE précédent. Cependant comme nous allons le voir, un problème est apparu quant à l'utilisation de ces piles microbiennes.

Un point d'amélioration de cette technologie en général est que l'on constate des pertes d'échelle pour les piles microbiennes, par exemple une pile deux fois plus grande ne produit pas deux fois plus d'énergie [11]. Ainsi, pour réduire ces pertes, il est préférable de construire des petites piles, et ensuite choisir de les mettre en réseau. Le problème qui survient alors, mis en évidence par le PE de l'année dernière est que la mise en réseau des différentes piles se trouvant dans le même bassin entraîne des problèmes de courts-circuits ioniques empêchant l'addition des puissances fournies par les différentes piles. Ceci est problématique pour l'obtention de grandes puissances nécessaires à l'exploitation de l'énergie produite. Une solution consiste alors à isoler ioniquement les piles les unes des autres. C'est l'objectif du projet d'études de cette année : concevoir et fabriquer un modèle de pile permettant la mise en réseau avec d'autres piles placées dans le même bassin.

Pour définir un cahier des charges précis pour la pile nous avons premièrement rassemblé toutes les données utiles sur le sujet, pour après pouvoir choisir un principe général de fonctionnement de la pile. Nous avons ensuite mené à bien des expériences pour déterminer certaines caractéristiques de la pile (notamment sa contenance). Une fois ceci fait, nous avons pu passer à une phase de conception précise de la pile, que nous avons choisi de fabriquer par impression 3D. Nous avons alors pu fabriquer la pile pour ensuite la tester et vérifier que l'objectif du PE était bien atteint. Ce présent rapport présente les différentes parties de ce travail en rappelant d'abord le cadre théorique nécessaire à la compréhension du projet, pour ensuite présenter le principe général de fonctionnement de la pile. Sont ensuite rapportées les expériences faites, la conception de la pile, sa fabrication, les tests effectués et leurs résultats. Un bilan du PE conclut ce rapport.

1 Présentation du cadre théorique

1.1 Fonctionnement d'une station d'épuration

Dans ce PE, nous cherchons donc à produire de l'énergie avec une pile dans une station d'épuration. Il est alors nécessaire de bien comprendre le fonctionnement d'une station. Cette partie explique son fonctionnement, tel que nous avons pu le voir en visitant la station de la Feyssine, située au nord de Lyon, et en rencontrant Jean-Pierre Canler, directeur du laboratoire de l'IRSTEA (Institut national de recherche en science et technologies pour l'environnement et l'agriculture) situé à côté de la station. Ce laboratoire réalise des recherches sur le sujet et dispose de réacteurs de tests simulant le fonctionnement d'une station d'épuration.

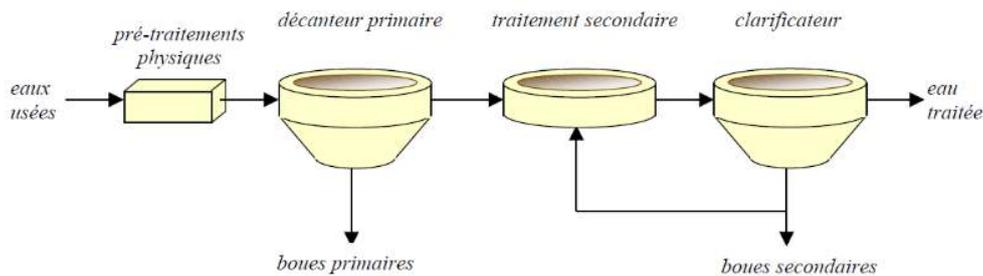


FIGURE 1.1 – Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration[5]

Dans une station d'épuration les eaux usées, aussi appelées effluents ou boues, subissent différents traitements (Figure 1.1)[6] :

Le prétraitement permet d'éliminer les grosses particules solides principalement à l'aide de grilles et de dessabler et déshuiler les effluents par décantation et injection d'air (pour faire remonter les graisses à la surface).

Traitement primaire : dans le décanteur primaire, les particules les plus lourdes se déposent au fond par décantation. On obtient alors un effluent assez propre (absence d'impuretés) mais qui n'est pas chimiquement et biologiquement apte à être rejeté dans la nature.

Traitement secondaire : ce traitement biochimique permet de nettoyer les eaux usées de la pollution biodégradable, par l'action de différentes bactéries. Dans cette phase, les effluents passent par le bassin d'aération où des quantités importantes de boues dites activées sont présentes. Ces boues sont en fait composées de multiples micro-organismes qui dégradent les matières organiques et des produits de cette dégradation, dont les nitrates. Il y a alors deux phases de traitement. Dans la phase de dégradation des matières organiques les bactéries ont besoin d'oxygène. Il y a donc une première phase où l'aération est activée, dite aérobie. Cependant, pour supprimer les nitrates, il y a ensuite une phase sans aération, dite anaérobie, où les bactéries et micro-organismes, privés d'oxygène, consomment les nitrates. C'est dans ce bassin que le taux de bactérie est le plus élevé, et donc ici que le placement d'une pile microbienne est le plus conseillé. Selon Mr Canler les cycles aérobie/anaérobie sont d'environ 1h/1h, ce qui nous sera utile dans la suite.

Enfin, les boues passent dans un dernier décanteur, appelé clarificateur, qui sert à éliminer les particules les plus fines dont les bactéries provenant du bassin d'aération.

L'ensemble des particules solides récupérées pendant les différentes phases du traitement des eaux usées sont ensuite séchées puis évacuées.

1.2 Fonctionnement d'une biopile

Il est aussi nécessaire de comprendre le fonctionnement d'une biopile, et voici ci-après des éclaircissements sur le sujet.

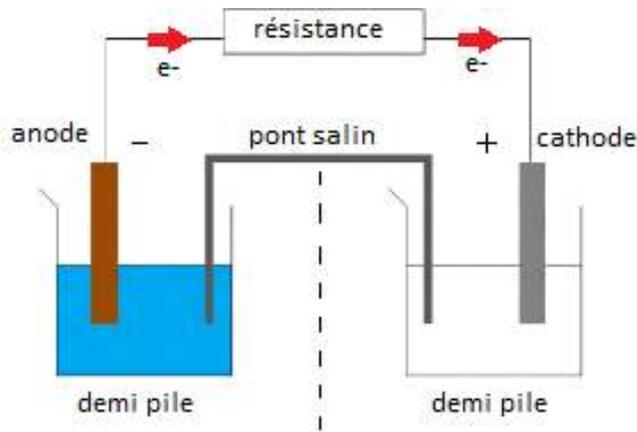


FIGURE 1.2 – Schéma d'une pile [7]

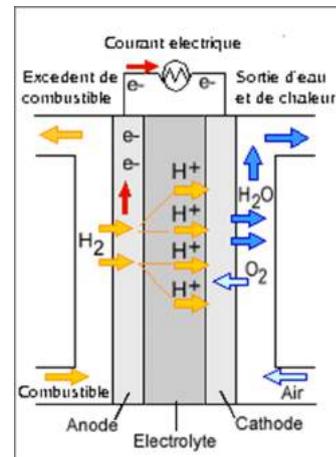


FIGURE 1.3 – Pile à combustible

Une pile est un système qui convertit de l'énergie chimique en énergie électrique, grâce à une réaction chimique d'oxydoréduction. On peut décomposer une pile en 2 demi-piles (Figure 1.2). La première demi-pile contient l'anode, pôle -. Il s'y passe une réaction d'oxydation : des électrons sont produits. La cathode se trouve dans la seconde demi pile (pôle +), où entre en jeu une réaction consommant des électrons : une réduction. Ainsi, si on relie les deux demi-piles par un composant (ici une résistance), les deux réactions se produisent et un courant apparaît. Pour assurer la neutralité des 2 demi-piles, un courant ionique va traverser le pont salin.

Une pile « classique » s'arrête quand une demi-pile a épuisé tout ses réactifs. Dans le cas d'une pile à combustible, le problème est écarté car les réactifs sont l'air et le dihydrogène (combustible), qui sont injectés dans la pile pendant son fonctionnement. Sur la figure 1.3, on retrouve les éléments caractéristiques d'une pile (anode, cathode...). Les demi-piles sont reliées par l'électrolyte (équivalent du pont salin) qui ne laisse traverser que les protons H^+ produits pendant l'oxydation (anode) et consommés pendant la réduction (cathode). L'avantage de ces piles est qu'elles ne consomment que du dihydrogène et de l'air, et qu'elles ne rejettent que de l'eau. Elles sont donc relativement propres. Leur principal défaut est que le dihydrogène est très dangereux à conserver et à transporter : il est instable et explosif.

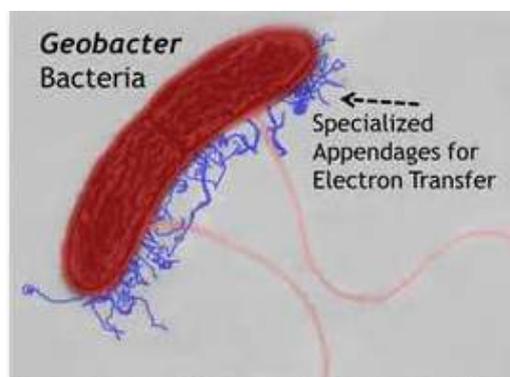


FIGURE 1.4 – Geobacter à l'oeuvre[10]

Les piles microbiennes, ou piles à bactérie, fonctionnent selon le même principe qu'une pile à combustible. Dans les effluents, de nombreuses molécules carbonées sont présentes (matières

organiques) et peuvent être oxydées par des bactéries telles que *geobacter*. Cette espèce bactérienne a de plus la capacité de céder des électrons à un métal (par des nanowires, sorte de fils, visibles en bleu sur la Figure 1.4).

La réaction de réduction est alors identique à une pile à combustible traditionnelle, mais la réaction d'oxydation ne fait plus intervenir de combustible H_2 . Ce sont les bactéries qui donnent des électrons à l'anode en digérant des molécules organiques. L'anode est plongée dans un liquide contenant *geobacter* en condition anaérobie et des molécules carbonées pour les nourrir (effluents). Sur l'anode, un biofilm, réseau de bactéries *geobacter*, se crée au cours du temps pour faciliter la réaction. Les protons H^+ produits par cette réaction migrent vers la cathode pour réagir avec l'air (Figure 1.5). En condition aérobie, les bactéries cèdent préférentiellement les électrons à l'oxygène dissous plutôt qu'à l'anode. La pile produit alors moins de courant qu'en condition anaérobie.

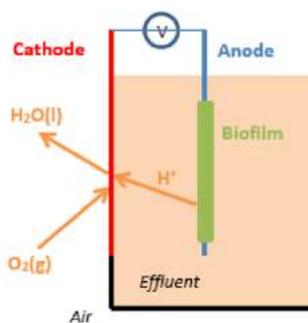


FIGURE 1.5 – Schéma de principe d'une pile microbienne [3]

On peut déjà retenir, pour cette partie, que les piles microbiennes fonctionnent mieux en milieu anaérobie car, en présence d'air, les bactéries donnent directement leurs électrons à l'oxygène sans passer par la filière anaérobie. De plus, pour que les réactions soient possibles, il faut que la cathode soit reliée à l'air libre.

1.3 Problème de la conduction ionique

Pour produire des quantités d'énergie conséquentes, de grandes surfaces d'électrodes sont indispensables. Cependant, des pertes d'échelles sont constatées ; une pile possédant une électrode deux fois plus grande qu'une autre ne produit pas deux fois plus d'énergie [11]. Ainsi, il est dans notre intérêt de mettre plusieurs petites piles en réseau. Néanmoins, un problème apparaît.

L'an passé, le groupe travaillant sur les piles à combustibles microbiennes avait mis en relief, en essayant de mettre en réseau deux piles, un problème lorsque plusieurs piles fonctionnent dans le même bassin. Premièrement, si on met en série ou en parallèle deux piles, on ne double pas l'énergie électrique totale récupérée. Il semblerait que des couplages électriques interviennent et, du fait que les deux piles ne sont pas strictement identiques, un phénomène de décharge électrique d'une pile vers l'autre entraîne des pertes de courant [3].

D'autre part, et surtout, un phénomène de conduction ionique intervient entre les deux piles. Ceci est dû au fait que les effluents sont conducteurs et dans le cas de piles non isolées, un courant peut alors se produire entre la cathode d'une pile et l'anode d'une autre, par exemple. Dans ce cas, des court-circuits apparaissent, le courant dans les fils est diminué, et la tension aux bornes des deux piles aussi (Figure 1.6).

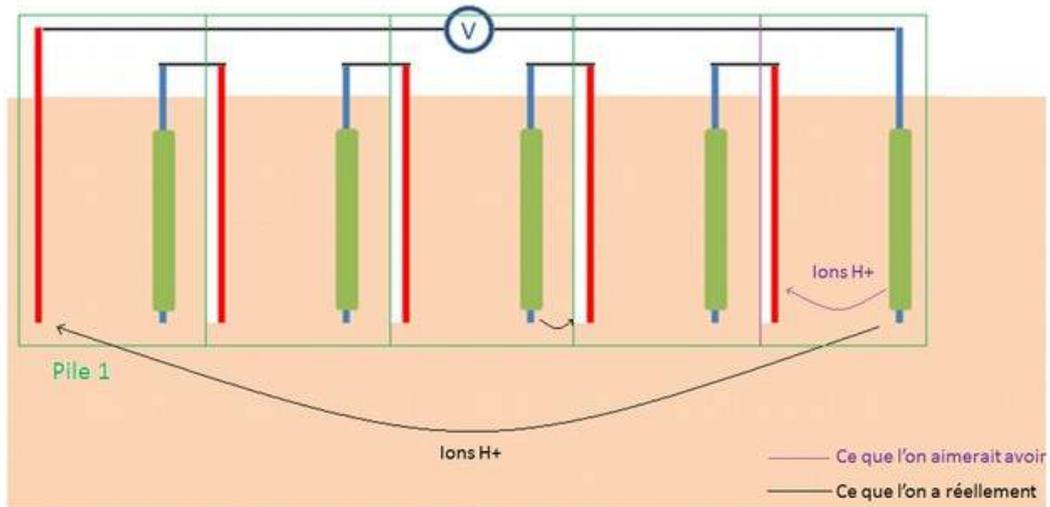


FIGURE 1.6 – Schéma représentant les courants de fuite ioniques qui se produisent en cas de non isolation des piles (cas du PE précédent)

Ainsi, cette année, notre principal objectif est de contourner ce problème pour permettre une augmentation de l'énergie récupérée en mettant en réseau des piles isolées ioniquement (Cahier des charges disponibles en annexe A).

2 Principe retenu pour la pile

L'objectif de cette année était donc de concevoir un système d'isolation ionique qui permettrait de mettre en réseau des piles. Nous avons alors pensé, pour réaliser cette isolation, à un système d'ouverture/fermeture qui nous permettrait d'isoler les piles une certaine partie du temps pour produire de l'énergie mais aussi de les ouvrir pour renouveler l'effluent, nécessaire au fonctionnement biochimique de la pile.

Lors de la visite à la station, nous avons pris la décision d'installer la pile dans le bassin d'aération, où l'activité organique est la plus forte et la plus propice au bon fonctionnement de la pile. L'aération y est faite périodiquement par un compresseur, et nous avons pensé utiliser cette pression à disposition pour fermer ou ouvrir la pile. Nous avons aussi pensé à un système électrique. Le système pneumatique, plus simple à mettre en place, ne nous obligeait pas à prévoir une alimentation externe pour la pile, ce qui aurait été quelque peu aberrant.

Ainsi, lors de l'aération la pile se ferme grâce à la pression du circuit d'air comprimé. Les piles produisent alors du courant en étant isolées ioniquement et dans des conditions anaérobies (Figure 2.2). Lorsque l'aération s'arrête, les piles s'ouvrent et les effluents se renouvellent grâce à l'agitation en continu du bassin (Figure 2.1). Le cycle total d'ouverture et de fermeture dure environ 2 heures.

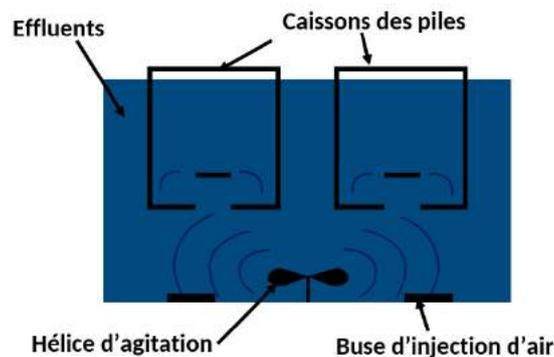


FIGURE 2.1 – Schéma de principe du fonctionnement des piles en configuration ouverte

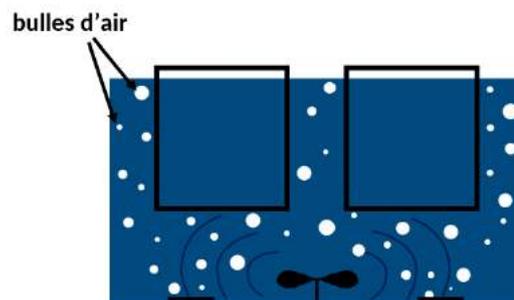


FIGURE 2.2 – Schéma de principe du fonctionnement des piles en configuration fermée

Pour des raisons d'économie (le budget étant limité), de facilité de transport et de rendement (une petite pile produisant plus en proportion), nous avons choisi de faire une pile plus petite que l'année dernière. Celle-ci aura une anode de taille 12,5x12,5 cm ce qui représente un peu moins du quart d'une feuille A4. Cela nous permettra de faire plusieurs piles dans l'année et de pouvoir ainsi tester la mise en réseau de piles. Pour faciliter la mise en réseau nous avons pensé à un système d'accroches mécaniques entre piles.

3 Détermination expérimentale de certaines caractéristiques de la pile

Pendant la phase de conception de la pile plusieurs inconnues nous sont apparues : quel matériau retenir pour l'anode ? Quel rapport de surface choisir entre l'anode et la cathode ? Quel volume définir pour la pile ? Dans un objectif d'optimisation de la pile, nous avons mené trois premières expériences pour déterminer au mieux ces inconnues.

3.1 Expérience 1 : Choix du matériau de l'anode



FIGURE 3.1 – Les deux piles utilisées au cours de l'expérience de test d'anode

Un bon matériau pour l'anode nous permettrait d'avoir une bonne efficacité pour la pile tout en diminuant le coût financier de celle-ci. Les projets précédents avaient testé le graphite, l'acier inoxydable et le tissu de carbone. Au vu de leurs résultats nous avons choisi de pré-sélectionner le tissu de carbone, plus stable et productif que les deux autres, bien que plus cher aussi. Cependant, nos recherches bibliographiques nous ont amené à considérer le cuivre comme nouvelle possibilité. Nous avons donc cherché à départager le cuivre et le tissu de carbone.

Grâce à de petites piles présentes dans le laboratoire (Figure 3.1) et aux effluents que nous avons récupéré à la station de l'IRSTEA, nous avons pu mener à bien notre expérience et comparer les performances en laboratoire de deux piles identiques, à ceci près que le matériau pour l'anode était du tissu de carbone dans un cas et du cuivre dans l'autre.

Nos résultats ont montré une tension non négligeable pour le cuivre. Cependant, cette tension n'était due qu'à l'oxydation de celui-ci et aucun biofilm ne s'était formé sur le cuivre. Nous avons donc décidé d'utiliser du tissu de carbone pour constituer l'anode (voir Annexe B pour les résultats complets de l'expérience).

3.2 Expérience 2 : Choix du rapport de surface cathode/anode

La cathode étant constituée de tissu de carbone, matériau très coûteux, il aurait été bon d'optimiser sa taille pour limiter les coûts. Nous avons donc cherché à déterminer quel était le rapport optimal de surface entre la cathode et l'anode pour diminuer la surface de la cathode (à taille d'anode constante), tout en préservant les performances de la pile. Le rapport choisi par l'équipe de l'année dernière était d'un quart, nous avons donc testé des rapports du même ordre de grandeur.

Pour cela, nous avons utilisé une ancienne pile du laboratoire (Figure 3.2) que nous avons adaptée pour que l'on puisse changer sa surface au cours de l'expérience et ainsi relever les



FIGURE 3.2 – Pile utilisée lors de l’expérience du rapport anode/cathode

performances de celle-ci pour différents rapports de surfaces.

Après avoir testé des rapports de surface compris entre 1/10 et 1/3, nous avons choisi de garder le plus petit rapport testé, de 1/10, pour lequel les performances initiales (ie pour un rapport de 1/3) de la pile étaient préservées. Un rapport plus petit que 1/10 pourrait peut-être convenir cependant nous avons choisi de ne pas tester une nouvelle gamme de rapports, au vu du temps limité que nous avons. Les détails de cette expérience sont disponibles dans l’annexe C.

3.3 Expérience 3 : Choix du volume de la pile

Pour produire le plus d’énergie possible, il est bon d’avoir un volume de pile petit pour une surface d’électrode donnée, permettant ainsi de mettre plus de piles dans un bassin donné et de produire plus d’énergie. Nous avons donc cherché à minimiser le volume de la pile. Malgré cela nous devons tout de même avoir des performances correctes pour cette pile, sachant que les performances dépendent de la taille de l’anode et de la cathode. De plus, la pile devait pouvoir contenir suffisamment d’effluents (et donc de charge organique) pendant sa fermeture pour pouvoir continuer à débiter du courant jusqu’à la prochaine ouverture. Sachant qu’une phase de fermeture de la pile pendant le cycle d’aération du bassin dure environ une heure, pour connaître le volume d’effluents dont nous avons besoin, nous devons avoir une idée de la consommation de la pile en charge organique pendant cette même durée.

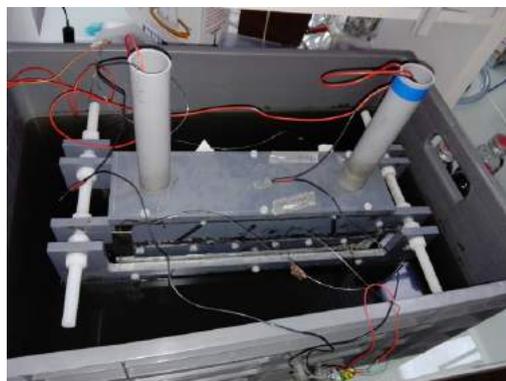


FIGURE 3.3 – Pile du PE précédent utilisée lors de l’expérience de consommation

En utilisant la pile fabriquée l’année dernière (Figure 3.3) qui présente la même structure et les mêmes matériaux que notre future pile, nous avons pu mesurer le temps que cette pile mettra à consommer toute la charge organique contenue dans un volume d’effluents fixé au début de l’expérience. C’est-à-dire le moment où la pile ne débitera plus de courant.

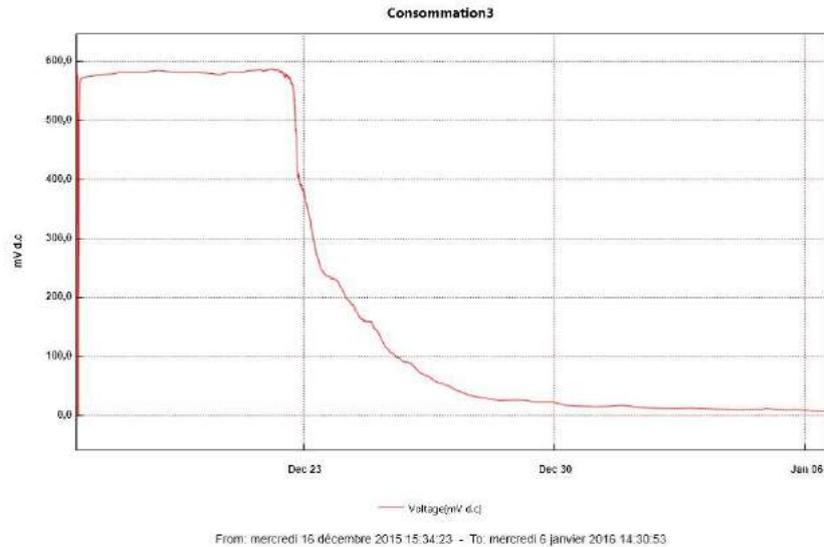


FIGURE 3.4 – Courbe représentant l'évolution de la tension au cours du temps pour l'expérience de consommation

Après 6 jours à débiter du courant, la pile avait vidé la charge organique contenue dans les 18L d'effluents dans lesquels elle baignait (Figure 3.4).

Nous avons ainsi calculé la consommation de cette pile et en se ramenant aux dimensions de l'anode et de la cathode de notre future pile (150cm^2 de surface d'anode), nous avons conclu que nous avons besoin d'au moins 0,6L d'effluents à l'intérieur de celle-ci. Pour avoir une marge de sécurité sachant que nos calculs de consommation étaient variables en fonction des conditions expérimentales et que le temps de fermeture est susceptible d'être modifié, nous avons finalement déterminé pour la pile un volume d'au moins 1,4L.

En conclusion, nous avons déterminé, grâce aux diverses expériences sus-citées, les caractéristiques suivantes pour la pile : une anode en tissu de carbone, un rapport de surface anode/cathode de 10 et un volume de 1,4L au moins compte tenu des dimensions retenues pour les électrodes.

4 Conception des piles

4.1 Cahier des charges pour la conception

Élément à prendre en compte	Caractéristiques
Distance inter-électrodes	2cm [12] Cette distance doit pouvoir être modifiée pendant les essais.
Surface de l'anode	12.5 x 12.5 cm Cette surface a été choisie de telle sorte à limiter les chutes de tissu lors de la découpe
Surface de la cathode	La surface doit être égale à environ 10% de la surface de l'anode (partie 3.2)
Volume total	1.4L (partie 3.3)
Système d'ouverture/ fermeture	Le système doit être mis en mouvement grâce à l'air comprimé provenant de la station d'épuration. La pression disponible est de 0.3 bar.
Circulation des effluents à l'intérieur de la pile	La diffusion de la matière organique dans la pile doit être optimisée. Contrairement aux années précédentes où la pile était alimentée en effluents en continu, l'apport d'effluents dans notre pile est discontinu. Ainsi, cette fois ci, les problèmes de diffusion de la charge organique doivent être pris en compte. Si la diffusion est trop lente, le bio-film va rapidement consommer la matière organique à proximité mais il va laisser la matière dans la région opposée de la pile. La production de courant va alors chuter alors qu'il reste de la matière organique à consommer.
Coût	Le coût d'une pile doit être faible pour pouvoir en construire plusieurs avec notre budget.
Modification et entretien simple de la pile	Dans l'optique d'une amélioration continue de la pile nous souhaitons que la pile soit entièrement démontable pour pouvoir inter-changer les pièces. Les pièces doivent aussi être fabriquées facilement.

Deux techniques de fabrication était à notre disposition pour la construction des piles : l'utilisation de l'atelier de fabrication du laboratoire H9 ou l'utilisation de l'imprimante 3D du même bâtiment. Le choix de la méthode de fabrication était déterminant pour la manière dont la pile serait conçue.

L'utilisation de l'atelier permettait d'économiser du temps car la fabrication est assurée par le personnel technique. En effet, ceux-ci gère la fabrication à partir de plans des pièces. L'équipe de l'année dernière avait décidé d'utiliser l'atelier pour réaliser sa pile.

Pour sa part, l'impression 3d nécessite de prendre en main l'ensemble de la chaîne de fabrication depuis la conception jusqu'à la finition des pièces en passant par la programmation des fichiers de commande numérique de l'imprimante. Le personnel du bâtiment H9 n'ayant pas les compétences pour utiliser l'imprimante, nous devons par nous-même prendre en main l'impression 3D.

Un raisonnement sur les avantages et inconvénients de l'impression 3d par rapport aux

méthodes de fabrication traditionnelles permet de trancher la question.

4.2 Avantages/inconvénients de l'impression 3d

Avantages de l'impression 3d	Inconvénient de l'impression 3d
Elle permet une réalisation autonome de pièces complexes. La fabrication traditionnelle rend l'équipe dépendante de l'atelier du bâtiment H9 ou de fournisseurs extérieurs. Du fait de l'ajout d'un intermédiaire, le temps de réalisation des pièces est bien plus important qu'avec une imprimante. Ainsi le cycle de conception-fabrication-amélioration est plus efficace avec l'imprimante	L'impression 3d nécessite une conception entière de la pile sur un logiciel de CAO. Cependant, cela permet une meilleure conception et notamment une visualisation de la pile avant sa fabrication. Cela permet de simuler le fonctionnement mécanique (absence de collision entre les pièces, simulation d'assemblage). Il est aussi possible de simuler le renouvellement de l'effluent pour mieux dimensionner les pièces.
L'impression 3d permet de modifier une pièce et de la réimprimer en quelques minutes. Les pièces des piles peuvent être testées et améliorées plusieurs fois avant d'être assemblées.	Il est nécessaire de prendre en main la fabrication 3d. Sachant qu'il y a en moyenne une dizaine de paramètres à adapter aux caractéristiques de la pièce, de nombreux essais sont nécessaires pour trouver la bonne combinaison de paramètres.
La fabrication en série est facilitée. En effet, le choix des paramètres de l'impression n'est à faire que pour la première pile. Pour les piles suivantes il suffit de reprendre les mêmes paramètres, déjà enregistrés.	L'imprimante utilise majoritairement du plastique de type PLA, qui est connu pour mal résister à l'humidité et aux variations de températures. Des essais pour analyser les performances du plastique dans les conditions d'utilisation finale de la pile doivent être impérativement menés. Certaines formes de pièces (en porte-à-faux par exemple) sont difficiles à obtenir avec une imprimante. Il faut donc prendre en compte ces contraintes dès la conception des pièces.

En pesant les avantages et les inconvénients nous avons choisi d'utiliser l'imprimante 3d. Le fait que les piles doivent être des prototypes appelés à être modifiés régulièrement est l'élément majeur de ce choix.

4.3 Choix du matériau

Différents matériaux s'offraient à nous pour la fabrication de la pile (tous des polymères thermoplastiques) et voici leurs caractéristiques [13, 14] :

ABS (acrylonitrile butadiène styrène) : Utilisé pour les briques Lego notamment, l'ABS possède une très bonne résistance aux chocs et est stable dans une gamme étendue de températures (-20°C à 80°C). Néanmoins, son impression est souvent compliquée car sa

température de fusion est assez élevée. Il est ainsi nécessaire d'avoir un lit chauffant pour éviter que le plastique ne se rétracte et se déforme au contact de l'air. Par ailleurs, son extrusion dégage de nombreux composés toxiques. Avec une enceinte thermo-régulée son impression est par contre plus facile. L'ABS est donc adapté à la fabrication professionnelle de pièces de très bonne qualité.

Prix indicatif : 20-30 €/kg

PLA (acide polylactique) : Polymère biodégradable fabriqué le plus souvent à partir de matières organiques (amidon de maïs), le PLA fond facilement et dégage beaucoup moins de polluants que l'ABS lors de l'impression. On note cependant une tenue à la température très mauvaise (se ramolli et se déforme dès 50°C), et une résistance à l'eau là aussi assez mauvaise. Le PLA est possiblement perméable car certaines sources [15] parlent d'une absorption jusqu'à 6 % en masse à 30 jours. Cependant il permet d'obtenir des pièces précises bien plus facilement que l'ABS.

Prix indicatif : 40-50 €/kg

Nylon (polyamide) : Autre polymère qui présente une bonne résistance à l'eau, aux chocs, et en général une bonne stabilité. Les impressions peuvent avoir un grand niveau de détail. Cependant, tout comme l'ABS, ses conditions de bonne impression sont plus difficiles à atteindre (température d'extrusion de 250°C environ).

Prix indicatif : 60-70 €/kg

Le PLA ne semble pas être un matériau adapté à la fabrication d'une biopile. En effet celui-ci est biodégradable et peu résistant à l'eau et sera justement placé dans l'eau au milieu d'une forte activité organique. Cependant, les essais effectués avec l'ABS n'ont pas été du tout concluants (l'imprimante utilisée ne possédant pas d'enceinte thermo-régulée) et il nous semblait aventureux de le choisir alors que le projet devait être effectué dans un laps de temps imparti. De plus, d'après certaines sources [15] la biodégradation du PLA n'est pas si immédiate que cela et prend 2 ans environ, surtout pour des grosses structures comme notre pile. Pour vérifier ces informations, un cube de PLA d'arête 2cm a été placé dans le même milieu que celui de la station d'épuration (figure 4.1). Au bout de 2 mois dans ces conditions, aucun signe de dégradation a été remarqué. Cela conforte les informations des sources. D'autant plus que dans une phase de prototypage, la longévité de la pile n'est pas l'objectif premier.

Pour maintenir les cathodes en dehors de l'eau une partie de la pile doit impérativement être étanche. Des tests d'étanchéité du PLA ont donc été réalisés pour analyser ce paramètre. Un cube creux de 3cm d'arête a été imprimé avec une épaisseur différente pour chaque paroi (de 1mm à 3mm). Certaines parois étaient creuses alors que d'autres étaient pleines. Le cube a été rempli d'eau pendant une semaine. Au bout de cette durée il a pu être observé que les parois creuses ont tendances à se remplir d'eau. Les défauts d'impression permettent à l'eau de s'infiltrer dans la structure creuse de la paroi. Même en ce qui concerne les parois pleines, l'humidité arrive à franchir les 3mm d'épaisseur de PLA. Pour garantir l'étanchéité de la pile, il a été décidé de l'imperméabiliser en utilisant un polymère (le PDMS) à appliquer au pinceau avant l'assemblage des pièces. Cette technique permet de rendre totalement étanche une pièce en PLA.

Le nylon quant à lui était trop cher et trop difficile à imprimer avec notre imprimante (mais pourra s'avérer utile pour fabriquer une pile plus robuste par la suite).

Finalement, c'est le PLA que nous avons retenu comme plastique pour nos impressions.



FIGURE 4.1 – Cube de test du PLA dans des effluents

4.4 Vérin pneumatique

Un vérin pneumatique est un actionneur qui permet de transformer l'énergie de l'air comprimé (la pression) en de l'énergie mécanique. C'est ce type d'actionneur qu'il nous fallait réaliser pour notre pile (rappelons nous que l'air comprimé devait nous permettre de fermer une trappe).

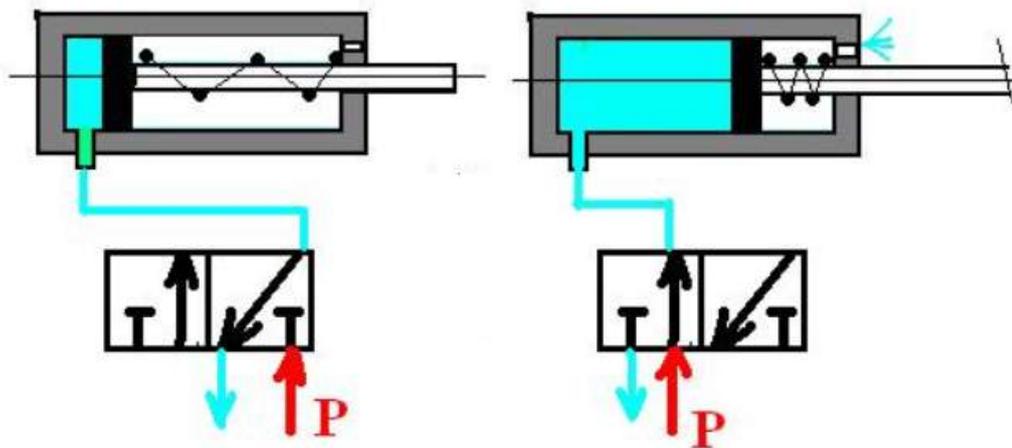


FIGURE 4.2 – Schéma du vérin à simple effet utilisé. La pression fait sortir le piston (image de droite) et le ressort le fait rentrer en l'absence de pression (image de gauche). [17]

Pour le vérin, différentes solutions s'offraient à nous. Nous n'avons pas été en mesure de trouver un vérin qui pouvait convenir aux spécifications dont nous avons besoin. Nous avons donc pris la décision de le fabriquer nous même, comme nous disposions d'une imprimante 3D. Un bon vérin requiert des surfaces parfaitement lisses et complémentaires entre le cylindre et le piston, en plus d'être parfaitement étanche. Ceci peut se faire assez rapidement avec un tour (par exemple), cependant nous ne disposons pas directement d'un technicien pouvant le faire. De plus, imprimer le piston par impression 3D permettait de l'adapter parfaitement à notre

architecture de pile, en le vissant simplement sur des trous déjà prévus. Ceci permettait de diminuer le temps d'assemblage de la pile, et aussi de choisir les dimensions que l'on souhaitait, même si la précision des pièces par impression 3D est assez limitée. Nous avons ainsi choisi l'impression 3D pour la fabrication du vérin.

4.4.1 Structure

Le vérin fabriqué a une structure assez simple, celle du vérin à simple effet : un piston glisse dans un cylindre. D'un côté, on injecte la pression, de l'autre, un ressort permet de faire revenir le piston dans sa position initiale quand il n'y a plus de pression de l'autre côté (Figure 4.2).

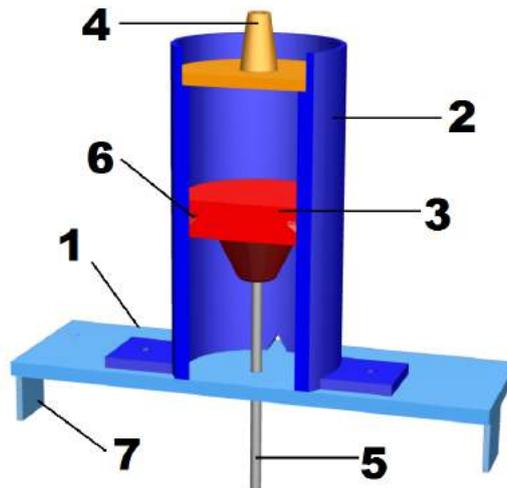


FIGURE 4.3 – Modèle 3D du vérin

Numero	Nom	Remarque
1	Support du vérin	Celui-ci est aussi une partie du couvercle de la pile. Il s'attache facilement à la pile grâce aux ergots (7) qui s'insèrent dans des ouvertures prévues à cet effet dans le corps de la pile.
2	Le cylindre	Celui-ci s'attache facilement au support du vérin grâce à un système de languettes qui permettent de visser le cylindre sur le support du vérin. Le cylindre a un diamètre intérieur légèrement plus grand que le diamètre du piston pour que les deux coulissent correctement. Nous conseillons un écart d'au moins 0,2mm, voire 0,4mm, comme de toute façon nous rajoutons du joint ensuite. Cela évite de perdre du temps à poncer.
3	Le piston	Il possède une gorge (6) dans laquelle du joint silicone est ajouté pour l'étanchéité. Il coulisse à l'intérieur du cylindre grâce à la pression appliquée.
4	Le couvercle	Pour éviter que celui-ci ne saute sous l'effet de la pression, des goupilles métalliques qui traversent le cylindre de part en part, le maintiennent en place. C'est par celui-ci que l'air arrive.
5	La tige du piston	Celle-ci est reliée à la trappe et le ressort vient s'enrouler autour d'elle.

4.4.2 Dimensionnement

Vérin

Nous disposions donc d'une pression de 0,3 bars pour l'aération qui devait nous servir à l'ouverture et à la fermeture de la trappe. Celle-ci pèse entre 100 et 200 grammes avec le piston et la tige, et nous avons choisi d'appliquer une force de 10N (équivalent à environ 1kg) sur la trappe pour la fermer. Cette force aurait permis de fermer correctement la trappe même si il y a du courant et de parer aux frottements qui se font entre la trappe et le corps de la pile. Cependant comme nous faisons le vérin nous-mêmes, des défauts de fabrication pouvaient apparaître et nous avons donc prévu une marge de manœuvre sur la force que peut fournir le piston. En effet, il valait mieux fournir plus de force que pas assez (et avoir une trappe qui ne se ferme pas). Les dimensions finales du vérin permettraient de transmettre une force de 36N si le piston était parfait. Cela correspond aux dimensions d'un cylindre de 4cm de diamètre d'une hauteur de 9 cm.

Ressort

Le ressort du vérin doit à la fois permettre au piston de remonter une fois qu'il n'y a plus de pression injectée (vaincre les frottements et le poids de la trappe), et en même temps ne pas être trop raide pour laisser le piston descendre lorsque qu'une pression est appliquée. De plus, le ressort doit avoir la bonne taille pour rentrer dans le vérin, avoir un diamètre suffisant pour pouvoir s'insérer autour de la tige du piston et avoir une course (la distance que parcourt le piston entre le moment où aucune pression n'est appliquée et où la pression maximale est appliquée) de 2-3 cm (nous avons choisi cette valeur de manière à ce que les effluents se renouvellent convenablement dans la pile). Cela donne donc une valeur de raideur et de taille de ressort qu'il faut trouver.

Pour le premier vérin construit, par exemple, des tests effectués avec une balance (Figure 4.4) ont montré que le vérin fournissait une force de 30 N environ mais que les frottements lors de la remontée étaient de 5N (0,5 kg). En tenant compte du fait que la taille maximale du ressort (liée à la taille du vérin fabriqué) était de 5 cm et que la course voulue était de 2 ou 3 cm nous avons pu déterminer les dimensions du ressorts (les calculs sont disponibles en annexe) :

$$R=0,1 \text{ N/mm (constante de raideur)}$$

$$L=50 \text{ mm (taille du ressort)}$$

$$D>6\text{mm (diamètre du ressort)}$$

Ainsi, nous avons dû déterminer les caractéristiques du ressort après avoir testé le vérin, car les caractéristiques précises de celui-ci nous étaient inconnues avant les tests (notamment pour les frottements).



FIGURE 4.4 – Test d'un vérin d'essai grâce à un compresseur et une balance

4.5 Première Pile (pile bleue)

La conception des piles a été réalisée en parallèle de leur modélisation 3D. Celle-ci a été réalisée sur le logiciel de modélisation NX de la marque Siemens. Ce travail couplé conception/modélisation a permis de détecter très tôt d'éventuels problèmes lors de la fabrication ou de l'utilisation. Il est en effet bien plus facile de se représenter la pile finale lorsque l'on dispose d'une modélisation 3d que l'on peut virtuellement observer sous tous les angles.

Pour répondre au cahier des charges, de nombreux paramètres étaient à prendre en compte lors de la conception (distance inter-électrodes, volume total...). Il fallait aussi penser à la fabrication mais aussi vérifier que l'assemblage soit possible. Il y a donc eu des choix à faire, beaucoup d'alternatives étant possibles, et voici présenté le modèle retenu pour la première pile.

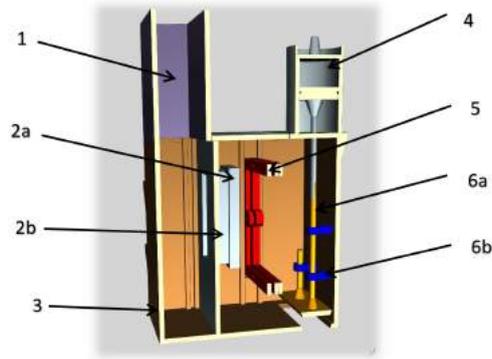


FIGURE 4.5 – Vue en coupe de la première Pile

Numero	Nom	Remarque
1	Cheminée	La cheminée permet de maintenir un des cotés des cathodes en dehors de l'eau même si des effluents et de la mousse sont projetés lors de l'agitation. La grande hauteur de la cheminée nous permet d'assurer que l'eau n'entre pas dans la pile.
2	Cathode	Le cadre des cathodes comporte 2 emplacements permettant d'emboîter des cathodes. Les cathodes sont situés de tel sorte à optimiser le passage des ions dans l'effluent de la pile. Une cathode est constituée d'un cadre (2a) sur lequel est tendu du tissu de carbone traité chimiquement (partie 5.4). La cathode est fixée par un couvercle (2b) qui est collé sur le cadre.
3	Vérin	Dans le vérin, l'air comprimé de la station d'épuration met en mouvement le piston. Un joint d'étanchéité, garantie l'étanchéité de la chambre du vérin. Un ressort assure l'ouverture de la trappe lors de l'arrêt de l'injection d'air comprimé.
4	Caisson de la pile	Le caisson est la pièce maîtresse de la pile. A l'intérieur se trouvent des guides pour assembler facilement les pièces. Elle comporte aussi des attaches à l'extérieur, qui permettent de coupler deux piles. Les attaches sont placés de telle sorte à garantir la stabilité des couples de pile dans les bassins même en cas d'agitation.
5	Anode	L'anode est constituée de 3 cadres sur lesquels est tendu du tissu de carbone. Le tissu est placé sur 2 niveaux pour mettre une diffusion rapide de la matière organique entre les deux côtés de l'anode.
6	Système ouverture / fermeture	La trappe est guidée en translation par des guides(6b) implantés sur la paroi de la pile. Elle est directement fixée au piston. La trappe comporte deux tiges cylindriques pour être stable en rotation.

4.6 Deuxième Pile (pile verte)

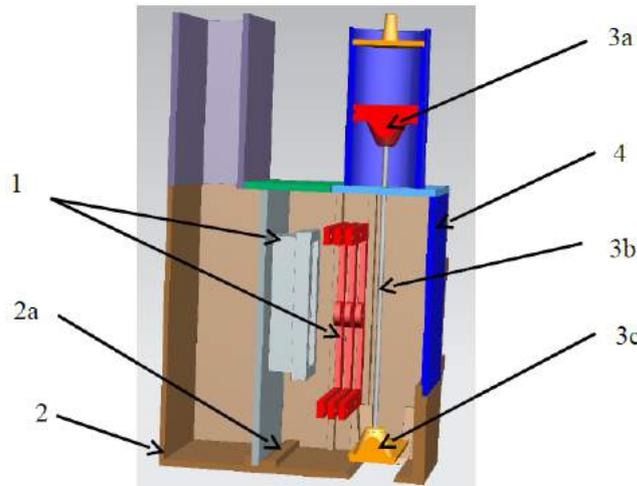


FIGURE 4.6 – Vue en coupe de la deuxième Pile

Numero	Nom	Remarque
1	Electrodes	Les électrodes ne sont pas modifiées par rapport à la première pile.
2	Caisson	<p>Un support de quelques millimètres sur le fond du caisson (2a) a été créé pour faciliter le montage tout en garantissant l'étanchéité.</p> <p>De plus, le guidage de la trappe se trouve maintenant directement dans le caisson et n'est plus séparé du système. Non seulement cela facilite le guidage, mais de plus, ils n'existent plus de trous dans la surface de la boîte qui peuvent avoir un impact sur l'étanchéité.</p>
3	Système ouverture/fermeture	<p>Le système de guidage a été modifié par rapport à la première pile. Une tige métallique fait maintenant la liaison entre la trappe et le piston.</p> <p>Ainsi, le système constitué d'un piston (3a), de la trappe (3c) et d'une tige métallique (3b) est maintenant démontable et facile à réparer en cas de défauts. La trappe n'est plus guidée par des guides, mais par des épaulements, qui se trouvent directement au fond du caisson.</p> <p>Le vérin a été déplacé de quelques centimètres pour ne plus avoir d'épaulement à l'extérieur de la pile. Ainsi, il est maintenant possible d'accrocher une pile à l'avant et une pile à l'arrière sans difficultés.</p>
4	Ouverture pour la simplification de l'installation	Sur la paroi du caisson, du côté du vérin, une grande ouverture a été placée pour faciliter le montage. L'ouverture se ferme avec une plaque qui est attachées par des vis de l'extérieur.

5 Fabrication des piles

Une fois la conception des piles terminées, vient l'étape de la fabrication. Celle-ci se décompose en plusieurs phases. Une première phase concerne la modélisation des pièces, déjà réalisée en parallèle de la conception, et leur impression en 3D. Les pièces sont ensuite préparées et imperméabilisées dans une seconde phase. Finalement, dans une troisième phase, les pièces sont assemblées entre elles.

5.1 Principe de l'impression 3D

5.1.1 Principe général

Le principe de l'impression 3d est de fabriquer une pièce en plastique à partir d'un modèle numérique créé sur ordinateur. L'impression se déroule en deux principales étapes : la préparation des fichiers d'impression et l'impression en elle-même. Lors de l'impression une buse chauffante mobile vient déposer un fil de plastique fondu sur un plateau (appelé aussi le lit). L'impression se fait par couches successives depuis la base jusqu'au sommet de l'objet avec une épaisseur de couche de l'ordre de 0.1 mm.

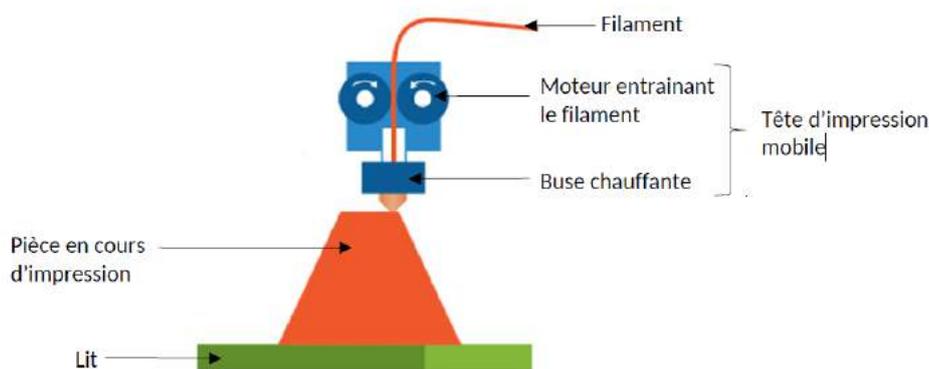


FIGURE 5.1 – Principe de l'impression 3D

Le dépôt de plastique ne pouvant se faire dans le vide, la réalisation de parties en porte-à-faux est impossible sans l'impression de supports. Ces supports sont de petites pièces de plastique ajoutés par l'imprimante pour avoir une base sur laquelle imprimer les parties en porte-à-faux. Ceux-ci doivent être retirés manuellement par l'utilisateur en fin d'impression. L'impression de supports entraîne une surconsommation de plastique et un allongement des durées d'impressions. Pour toutes ces raisons, il a été choisi dans le cadre de ce projet de concevoir des pièces sans porte-à-faux.

L'imprimante utilisée est celle disponible au laboratoire Ampère : une Creatr HS de la marque Leapfrog. Cette imprimante est robuste mais n'est pas très sophistiquée (pas d'enceinte thermo-régulée par exemple).

5.1.2 Paramètres d'impression

L'impression 3D nécessite d'adapter les paramètres d'impressions en fonction de la pièce et de ces caractéristiques. Les paramètres principaux sont :

- La vitesse d'impression : une impression à faible vitesse permet d'obtenir une grande précision lors de la dépose du filament. Le remplissage de la pièce nécessitant une précision plus faible, on peut choisir une vitesse interne plus rapide. La vitesse moyenne sur notre imprimante est de 9m par minutes.
- La densité de remplissage : pour économiser du plastique l'intérieur de la pièce est rempli par une structure en quadrillage ou en nid d'abeille. Le choix de la structure interne joue sur la densité de la pièce et sur sa résistance mécanique. Une densité élevée assurera une bonne résistance au prix d'une grande consommation de plastique et un long temps d'impression (Figure 5.4).
- La température du lit : pour que la pièce colle au lit, celui-ci est chauffée par une résistance électrique. Sous l'effet de la température le plastique se déforme. Il faut donc choisir au mieux cette température pour éviter les écarts due à la dilatation (Figure 5.2).
- La forme de la pièce : comme expliqué précédemment, il est difficile d'imprimer une pièce en porte-à-faux. De plus, si la surface de contact entre la pièce et le lit est trop faible, la pièce peut se décoller lors de l'impression et entraîner l'échec de la fabrication. Une forme conçue pour l'impression 3D permet de limiter les échecs d'impression(Figure 5.3).

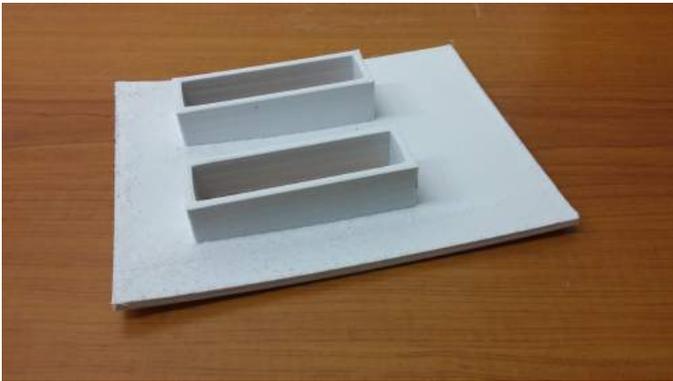


FIGURE 5.2 – Défaut d'impression sur une cathode dû à une mauvaise température du lit



FIGURE 5.3 – Cheminée équipée de sa jupe d'impression pour éviter le décollement

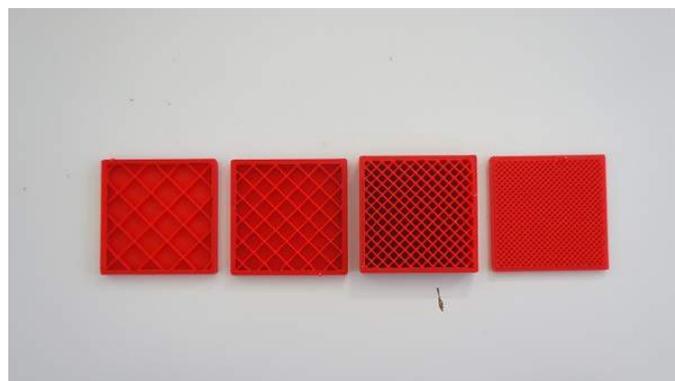


FIGURE 5.4 – structure alvéolaire lors de l'impression des pièces

5.2 Impression de nos pièces

Les pièces de la pile ont été classées en 3 catégories selon leurs contraintes d'utilisation :

- la précision : ces pièces doivent avoir un très bon état de surface et de très faibles erreurs de dimensionnement. C'est le cas des pièces du vérin, qui doivent coulisser parfaitement l'une dans l'autre. Pour atteindre ce cahier des charges les pièces sont imprimés très lentement pour garantir une précision optimale. En contrepartie de la précision, la densité de remplissage de ces pièces est très faible (environ 25%) pour limiter le temps d'impression.
- l'étanchéité : ces pièces doivent être étanches à l'eau jusqu'à 30 cm de profondeur pendant plusieurs semaines. Le caisson et la cathode sont les parties les plus critiques en termes d'étanchéité car elles délimitent l'eau et l'air. Comme dit précédemment, le PLA ne peut pas garantir l'étanchéité à long terme d'une pièce. Cependant, une densité de remplissage de 100% limite les fuites en empêchant la formation de poches d'eau internes à la structure.
- sans contraintes : les couvercles et la cheminée n'ont pas de contraintes concernant la précision et l'étanchéité. Ils sont donc imprimés à grande vitesse et à moyenne densité pour gagner du temps et économiser de la matière première.

En fonction de ces caractéristiques et de la taille de la pièce le temps d'impression s'échelonne de 15 minutes (couvercle du piston) à 26 heures (caisson).

5.3 Préparation et imperméabilisation des pièces

Comme expliqué précédemment (partie 4.3) le PLA (le matériau utilisé pour imprimer les pièces) est légèrement poreux. Les pièces brutes ne peuvent donc pas garantir l'étanchéité de la pile.

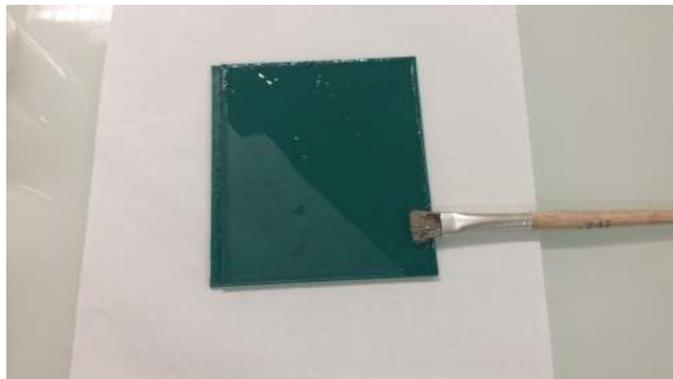


FIGURE 5.5 – Pose du PDMS sur une pièce de la pile verte

Suite à cela, nous avons aussi décidé d'imperméabiliser la pile à l'aide d'une couche de PDMS. Parmi l'ensemble des vernis et substances imperméabilisantes vendues sur le marché et adaptées à une application sur une surface plastique, c'est ce polymère (Figure 5.6) qui a retenu notre attention. Il est simple d'emploi, peu coûteux, possède des propriétés hydrophobes et était directement disponible au laboratoire Ampère. Après avoir mélangé le monomère avec un agent réticulant, on obtient un liquide visqueux qui s'étale au pinceau sur la surface à imperméabiliser (Figure 5.5). Le PDMS va ensuite s'infiltrer dans tous les défauts de surface du matériau, avant de réticuler pour former une couche résistante à l'eau.

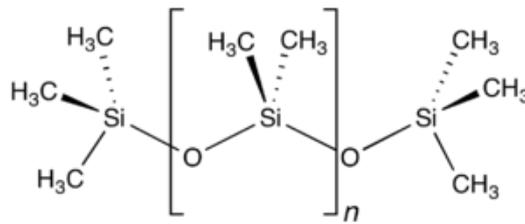


FIGURE 5.6 – formule chimique de PDMS

5.4 Fabrication de la cathode



FIGURE 5.7 – Application de la couche de PTFE pour imperméabiliser le tissu.

Pour la fabrication des cathodes, nous avons suivi un protocole trouvé sur internet [4]. C'est ce procédé qui a été suivi les années précédentes. Il s'agit de recouvrir le tissu de carbone d'un côté d'une couche de carbone et de 4 couches de PTFE (un polymère imperméabilisant), et de l'autre côté d'une couche de carbone enrichie en platine, le catalyseur. Le procédé est relativement long car chaque couche doit être étalée au pinceau puis être cuite au four ou séchée pendant plusieurs heures. Sur la figure 5.7, la première couche de carbone venait d'être étalée au pinceau sur le tissu de carbone.

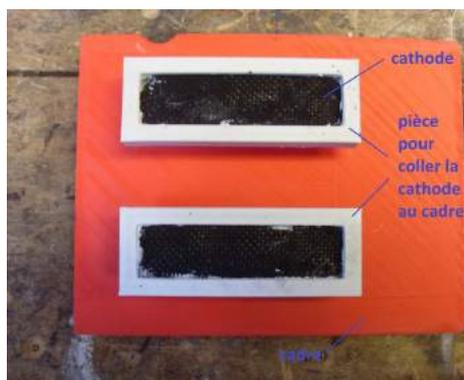


FIGURE 5.8 – La cathode assemblée de la première pile

Ensuite, le tissu est découpé dans la forme adaptée pour être collé sur son cadre, construit avec l'imprimante 3D (figure 5.8). La colle utilisée est un joint à base de silicone. Avant de coller les cathodes, il faut aussi passer un fil électrique pour les futures connections.

5.5 Piston

5.5.1 Fabrication

Le vérin se compose de 5 pièces différentes, comme nous l'avons déjà vu : le support du vérin qui forme aussi une partie du couvercle de la pile, le corps du vérin (le cylindre), le piston, le couvercle du vérin et le ressort.

Les 4 premières pièces sont imprimées grâce à l'imprimante 3D. Les pièces qui demandent le plus de travail sont le cylindre et le piston. En effet, ceux-ci doivent coulisser sans laisser passer d'air. Étant donné la précision de l'imprimante 3D, nous n'avons pas réussi à imprimer des pièces précises au dixième de millimètre près, comme l'exigeait les contraintes précédemment citées. Ainsi, il nous a fallu poncer les deux surfaces pour les laisser le plus lisse possible.

Après un travail de ponçage (qui peut aussi se faire avec du D limonène pour dissoudre superficiellement le PLA), les surfaces du piston et du cylindre sont rendues parfaitement lisses. Cependant, si on ne travaille pas sur tour il est difficile (voire impossible) d'obtenir un vérin étanche (même dans les applications industrielles un joint d'étanchéité est toujours présent [17]). Il est donc nécessaire de rajouter un joint d'étanchéité : on utilise pour cela du joint silicone que l'on met dans la gorge prévue à cet effet. On étanchéifie aussi le couvercle de cette manière. Pour assurer le bon fonctionnement du vérin il est alors nécessaire de le lubrifier.

5.5.2 Rendu final du vérin

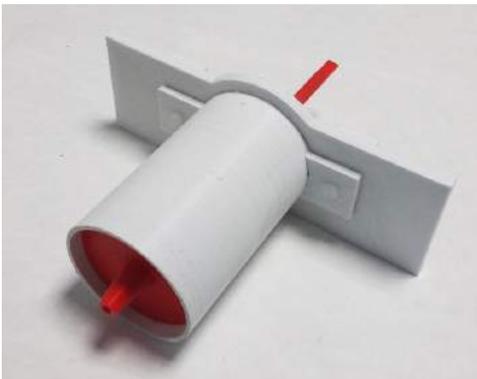


FIGURE 5.9 – Vérin N°1



FIGURE 5.10 – Piston N°1

Le premier piston, après tests, remplit parfaitement la fonction qui lui était demandé (ouverture et fermeture de la trappe). La force qu'il transmet est proche de 30N, ce qui donne un rendement assez bon (pour un vérin parfait on aurait 38N). Cependant, l'installation du piston a été malaisée et la tige est très fragile. Il sera donc difficile de changer le piston pour la première pile.

De plus, nous remarquons un dégagement d'air au niveau de la base du piston, ce qui prouve qu'il n'est pas parfaitement étanche, ce qui diminue son efficacité énergétique, primordiale étant donné les faibles puissances produites par la pile. L'amélioration du piston est donc une piste de développement pour l'amélioration de la pile. Dans une phase de prototypage, ce piston remplit correctement sa tâche.

Nous n'avons pas eu le temps de tester le deuxième piston, cependant, ces caractéristiques devraient être similaires.

5.6 Assemblage des pièces

Les pièces sont assemblées entre-elles de différentes manières. Les assemblages qui doivent subir des efforts importants sont réalisés grâce à des vis en plastiques (pour éviter l'oxydation). La plupart des pièces s'assemblent cependant sans vis du fait de la prise en compte de l'assemblage lors de la conception. Ainsi, la cathode et l'anode s'intègrent dans le caisson en se glissant dans des rainures. La cheminée et le caisson sont assemblés grâce à un système d'ergots. Pour assurer l'étanchéité, du joint silicone est placé entre le caisson et la cathode.

La partie finale de l'assemblage consiste à vérifier l'étanchéité de la pile en la plaçant dans un bac d'eau claire pendant 24 heures pour repérer d'éventuelles fuites.

5.7 Bilan de la fabrication des piles

5.7.1 Rendu final

Les figures 5.11 et 5.12 montrent les deux piles assemblées après un séjour dans les effluents. On remarque sur les photos que le PDMS semble se décoller des parois. Il s'agit en fait du surplus de polymère qui se décolle avec le temps. Le PDMS servant à étanchéifier la pile reste bien quant à lui fixé sur les piles. Les piles sont restées étanches même après être restées plusieurs semaines dans les effluents. Aucun problème de dégradation du PLA n'a été observé.



FIGURE 5.11 – Pile bleue après un séjour de 2 semaines dans les effluents (le réglet mesure 20cm)



FIGURE 5.12 – Pile verte après un séjour de 2 semaines dans les effluents (le réglet mesure 20cm)

5.7.2 Coût de la pile

Une estimation du coût de la pile nous donne environ 120€. Cela est dû en très grande partie au tissu de carbone pour les anodes (60€ pour seulement 155cm^2). Une amélioration possible consisterait donc à trouver un matériau moins cher pour l'anode. Une analyse détaillée des prix et une comparaison par rapport à la pile de l'année dernière est disponible en annexe F.

6 Caractérisations et tests des piles

Après la phase de fabrication, les piles ont été testées en laboratoire pour analyser leurs performances et vérifier qu'elles répondent à la problématique du PE. Les essais sont réalisés au laboratoire de microbiologie du bâtiment H9 à partir d'effluents provenant de la station d'épuration de la Fessine. Ces effluents ont été collectés à l'aide du laboratoire de recherche de l'IRSTEA, attenant à la station d'épuration. Les piles sont plongées dans des bacs contenant des eaux usées issues de la sortie du décanteur primaire. Un agitateur et un bulleur, placés dans les bacs, permettent de simuler au plus près les conditions réelles d'utilisation de la pile (Figure 6.1). Nous avons étudié chaque pile séparément pour quantifier leur puissance respective et les comparer avec les résultats des années précédentes. Des tests de mise en réseaux des piles nous ont permis de quantifier l'apport de nos piles vis-à-vis de la problématique.



FIGURE 6.1 – Bassin d'essai avec agitateur

Pour faciliter la manipulation lors des tests, les parties non essentielles au fonctionnement en laboratoire des piles sont retirées. Ainsi, les cheminées, les couvercles et le vérin de la pile verte sont retirés. Le vérin de la pile bleue est conservé pour les essais d'ouverture et de fermeture de la trappe. De plus, les piles ne sont pas non plus fixées entre elles pour pouvoir mener les expérimentations dans deux bacs séparés. Les piles n'étant plus fixées ensemble, ni attachées au bassin, un poids de 2kg est nécessaire pour garantir leur stabilité.

6.1 Développement du biofilm

Avant d'être opérationnelles les piles doivent être mises en culture pour qu'un biofilm se développe. C'est ce biofilm, constitué de bactéries, qui va produire du courant. Pour entamer cette croissance bactérienne on plonge les piles dans les effluents en reliant la cathode et l'anode par une résistance de $1k\Omega$ (Figure 6.2). Cette valeur de résistance est choisie pour être environ égale à la résistance interne de chaque pile. Une résistance trop faible correspondrait à la mise en court-circuit de la pile alors qu'une résistance trop grande empêcherait le développement des bactéries en bloquant le flux d'électrons. La tension aux bornes de la résistance est mesurée toutes les minutes par un voltmètre autonome. Le développement se fait sans agitation et sans bulleur pour ne pas gêner la colonisation des électrodes par les bactéries. La tension aux bornes de la résistance permet de calculer la puissance délivrée par la pile. La courbe de puissance est représentative de l'état du biofilm et donc de l'activité des bactéries. Plus la puissance est importante plus le biofilm est développé et de bonne qualité.

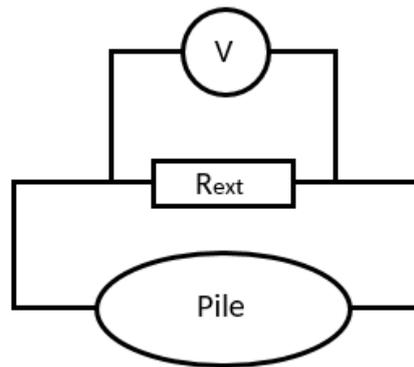


FIGURE 6.2 – Schéma électrique du montage expérimental pour le développement du biofilm

De nombreuses espèces de bactéries sont présentes dans les effluents alors que seule la bactérie « geobacter » est capable de relâcher des électrons. Une des techniques pour sélectionner cette bactérie et favoriser son développement est d'ajouter des ions acétates dans le milieu. Sur la courbe de développement du biofilm on remarque bien que c'est après avoir ajouté de l'acétate dans les effluents que le biofilm commence sa croissance. La quantité d'acétate ajoutée est identique pour les deux piles et est égale à 1 gramme par litre d'effluents dans les bassins d'essais.

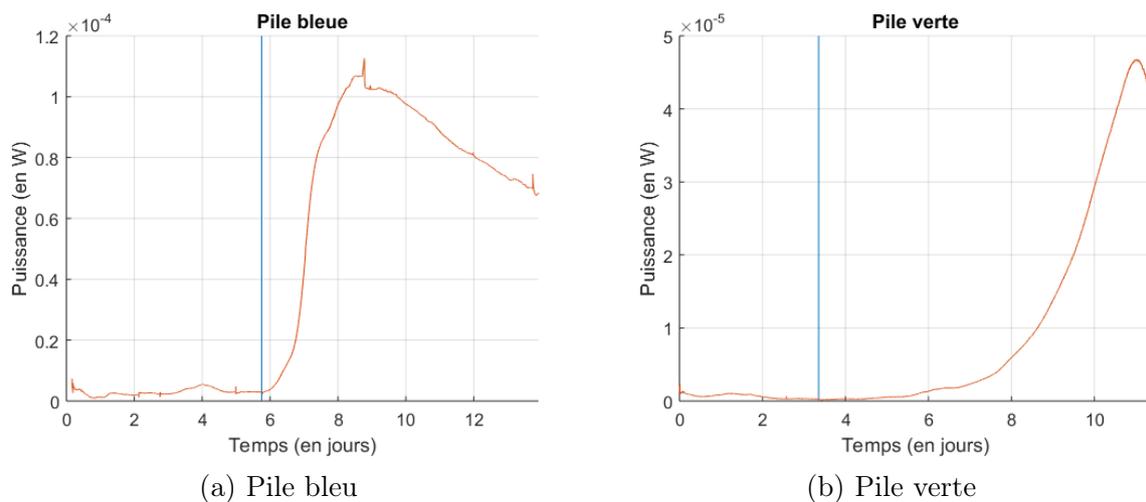


FIGURE 6.3 – Puissance fournie lors du développement du biofilm. La ligne bleue correspond à l'ajout d'acétate.

Comme on peut l'observer sur les courbes (Figure 6.3), le biofilm met de 3 à 8 jours après l'ajout d'acétate pour se développer. Après avoir atteint un pic de puissance, la production de la pile diminue. C'est le signe que le biofilm a consommé tout l'acétate des effluents. On rentre alors dans une phase de fonctionnement normal de la pile, où les bactéries consomment la charge organique des eaux usées.

Alors que les deux piles et les conditions expérimentales sont identiques, la pile verte est, à son pic de puissance, deux fois moins productive que la pile bleue. Comme expliqué par la suite, cet écart de puissance s'explique par des points de fonctionnement optimum différents pour les deux piles.

Son biofilm a aussi été beaucoup plus lent à se développer. Cet élément peut être dû à la rivalité bactérienne qui s'opère pendant le développement du biofilm. Une autre souche de

bactérie se serait développée en parallèle de *geobacter* sur le tissu de carbone. Cela aurait ralenti la colonisation de l'anode.

Par les tests unitaires on caractérise plus finement les piles pour comprendre les phénomènes en jeu.

6.2 Tests unitaires

On caractérise maintenant chaque pile pour notamment connaître la puissance maximum qu'elle peut délivrer. Les deux piles sont caractérisées chacune dans un bassin pour éviter leurs interactions mutuelles. On agite le bassin pour reproduire les conditions réelles du bassin d'agitation.

La caractérisation se fait grâce à un potentiostat, qui va permettre de tracer la caractéristique en tension et en intensité des piles. Lors d'une mesure, l'appareil réalise un balayage en tension aux bornes de la pile. Il fixe alors le point de fonctionnement pour chaque tension. Des détails sur la caractérisation des piles sont disponibles en annexe G. Afin de mesurer la puissance maximale de chaque pile, on peut tracer les caractéristiques $U = f(i)$ (Figure 6.4) de celles-ci puis les courbes de puissances $P = f(i)$ correspondantes (Figure 6.5).

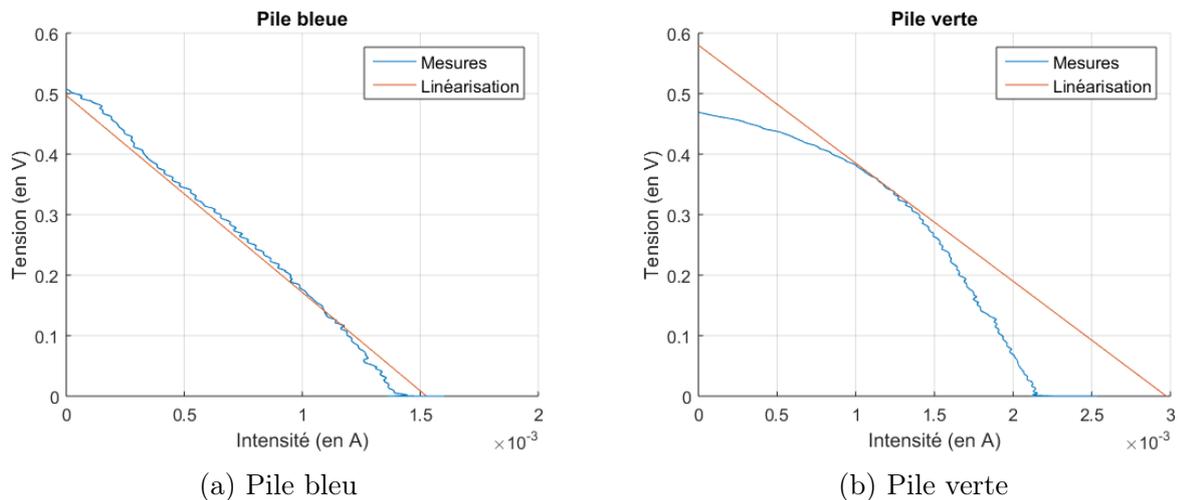


FIGURE 6.4 – Courbes de polarisation des piles

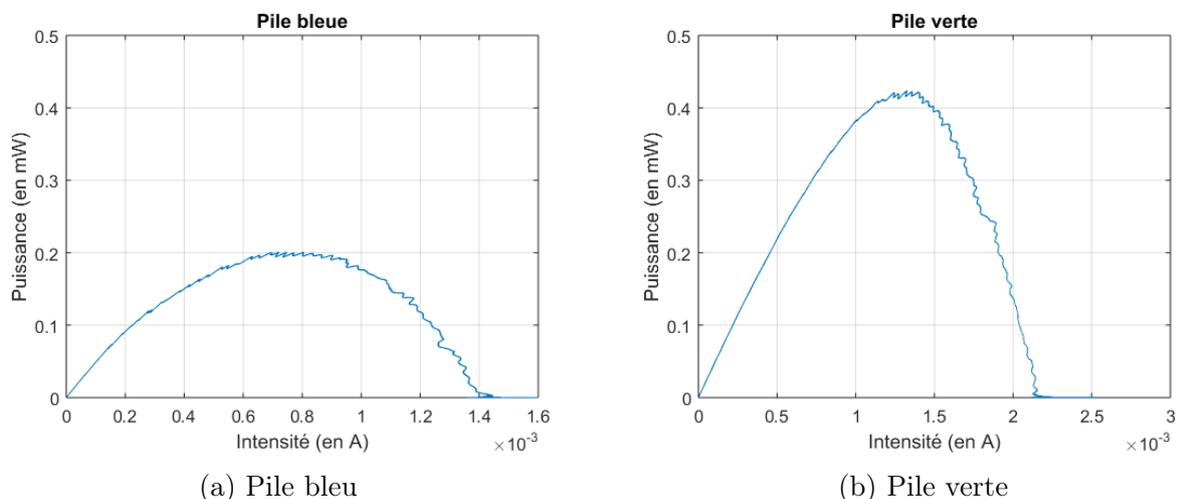


FIGURE 6.5 – Caractérisations en puissance des deux piles

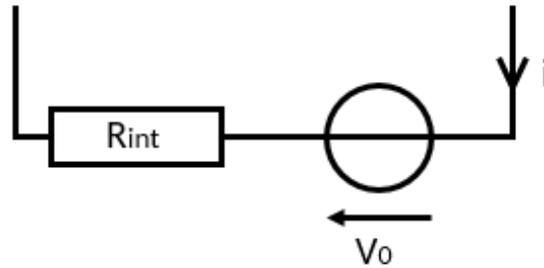


FIGURE 6.6 – Schéma électrique équivalent d'une pile

6.2.1 Analyse des caractéristiques

Sur les caractéristiques courant/tension des deux piles on remarque que la pile bleue présente une caractéristique linéaire. On modélise donc la pile par la mise en série d'un générateur de tension V_0 et d'une résistance interne R_{int} (Figure 6.6). La caractéristique de la pile verte, quant à elle, n'est pas linéaire. Pour faciliter les calculs ultérieurs on propose de linéariser la caractéristique autour du point de fonctionnement optimum. D'après les courbes de puissance, l'optimum de production électrique pour la pile verte est obtenue pour une intensité comprise entre 1 et 1.5 mA. On linéarise donc la courbe entre ces deux valeurs.

Sur les courbes de puissance, on observe que la puissance maximale délivrée par la pile verte est deux fois plus importante que celle délivrée par la pile bleue (respectivement 0.42mW et 0.20mW). Les deux pics de puissance ne sont pas non plus obtenus pour la même valeur d'intensité.

6.2.2 Lecture des valeurs de tension à vide et résistance interne

Pour les deux piles la tension à vide V_0 est proche (0.485 V pour la pile verte et 0.520 V pour la pile bleue). Ce paramètre n'explique donc pas les différences de puissance entre les deux piles.

Dans la modélisation de la pile par un générateur et une résistance, la valeur de la résistance interne est égale à la pente de la courbe au signe près. On obtient donc de cette manière les valeurs de résistance interne. Du fait que, pour la pile verte, la valeur de la résistance provienne de la linéarisation de la courbe autour d'un point de fonctionnement, une seconde technique est utilisée pour trouver une valeur plus précise de la résistance. La modélisation générateur/résistance interne permet de trouver la valeur théorique de puissance maximale.

$$P_{max} = \frac{1}{4} \frac{V_0^2}{R_{int}} \quad (1)$$

Cette équation permet de calculer un nouveau couple de résistances internes. Pour la pile bleue les résistances obtenues avec les deux techniques sont très proches alors qu'elles diffèrent d'environ 40% pour la pile verte. Pour la suite on adopte le second jeu de valeur comme valeurs de résistances internes.

	Pile verte	Pile bleu
Tension à vide (en V)	0.485	0.520
Résistance interne (en Ohm) (par régression linéaire)	environ 195 au point de fonctionnement optimum	326
Puissance maximum (en mW)	0.42	0.20
Résistance interne par la formule de puissance maximum (en Ohm)	140	338

6.2.3 Obtention d'une puissance maximum

Toujours selon la modélisation générateur/résistance interne la puissance délivrée par une pile est maximale quand l'on branche à ses bornes une résistance de même valeur que sa résistance interne.

Pour $R_{int} = R_{ext}$ on a $P = P_{max}$

Lors du développement du biofilm la résistance externe ($1k\Omega$) était le plus proche de la résistance interne de la pile bleue. C'est pourquoi cette pile produisait la puissance la plus forte.

En conclusion, c'est la différence de résistance interne entre les piles qui entraînent l'écart de puissance maximale. De plus, du fait de cette différence, la valeur de puissance maximale n'est pas atteinte au même point de fonctionnement pour les deux piles. C'est pourquoi, lors du développement du biofilm, la pile bleue était plus productive que la pile verte.

6.2.4 Comparaison avec la pile de l'année dernière

Pour comparer nos performances avec celles du groupe de l'année dernière on ramène la valeur de la puissance à celle pour $1m^2$ d'anode. La surface effective des anodes de nos piles est de $91.4cm^2$. On obtient donc une puissance de $46mW/m^2$ pour la pile verte et de $29mW/m^2$ pour la pile bleue. Ce sont des valeurs faibles comparées aux résultats de l'année dernière ($110mW/m^2$) mais cela peut s'expliquer par les différences d'utilisation des deux piles. Le biofilm de la pile de l'année dernière était alimenté en continue en effluents alors que, pour nos piles, le caisson diminue la circulation des effluents sur les biofilms. De plus, contrairement à l'année dernière notre but principal était la mise en réseau de piles et non la recherche de la performance énergétique. Les résultats obtenus restent donc plutôt bons.

6.3 Mise en série des piles

L'objectif premier du projet d'étude était de mettre en série plusieurs piles pour augmenter la puissance totale produite. La mise en série posait problème avec les géométries traditionnelles de piles, c'est-à-dire les géométries ouvertes où les électrodes sont baignées directement dans

le bassin de la station. En effet, il se produisait un effet de court-circuit ionique qui diminuait la puissance totale produite par les piles en série. Il était alors inefficace de mettre en série les piles, ce qui rendait impossible les applications réelles du fait de la faible puissance d'une pile unitaire.



FIGURE 6.7 – Dispositif d'essais avec les piles isolées



FIGURE 6.8 – Dispositif d'essais avec les piles dans le même bassin

Nous avons testé la mise en série de nos piles dans différentes configurations. La première, lorsque les piles sont totalement isolées ioniquement. Pour cela on sépare les piles dans deux bassins d'essais différents (Figure 6.7). Dans la deuxième configuration, les piles sont placées dans le même bassin avec leur trappe ouverte (Figure 6.8). Il s'agit de la disposition qui se rapproche le plus des géométries traditionnelles de piles et de la configuration en station d'épuration.

Finalement, pour le dernier essai les piles sont aussi dans le même bassin mais cette fois les trappes sont fermées. Pour chaque essai un agitateur reproduit les conditions réelles dans le bassin d'aération de la station d'épuration.

Théoriquement, les piles séparées produisent plus de puissance que les deux autres configurations du fait de leur isolement total. Les piles fermées doivent aussi être plus productives que les piles ouvertes grâce à l'isolement ionique des trappes. Selon l'hypothèse de modélisation des piles par un générateur de tension et une résistance interne (Figure 6.9), on peut calculer la puissance maximale délivrée par les piles si elles sont totalement isolées.

$$P_{max} = \frac{1}{4} \frac{(V_{0(bleue)} + V_{0(verte)})^2}{R_{int(bleue)} + R_{int(verte)}} \quad (2)$$

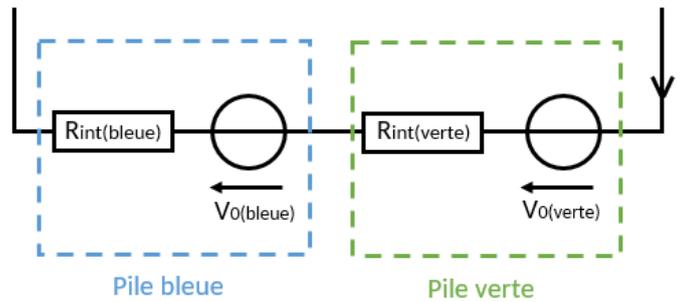


FIGURE 6.9 – Schéma électrique équivalent des deux piles en série

On trace les courbes de puissances dans les trois configurations (Figure 6.10) et l'on compile les résultats dans un tableau récapitulatif.

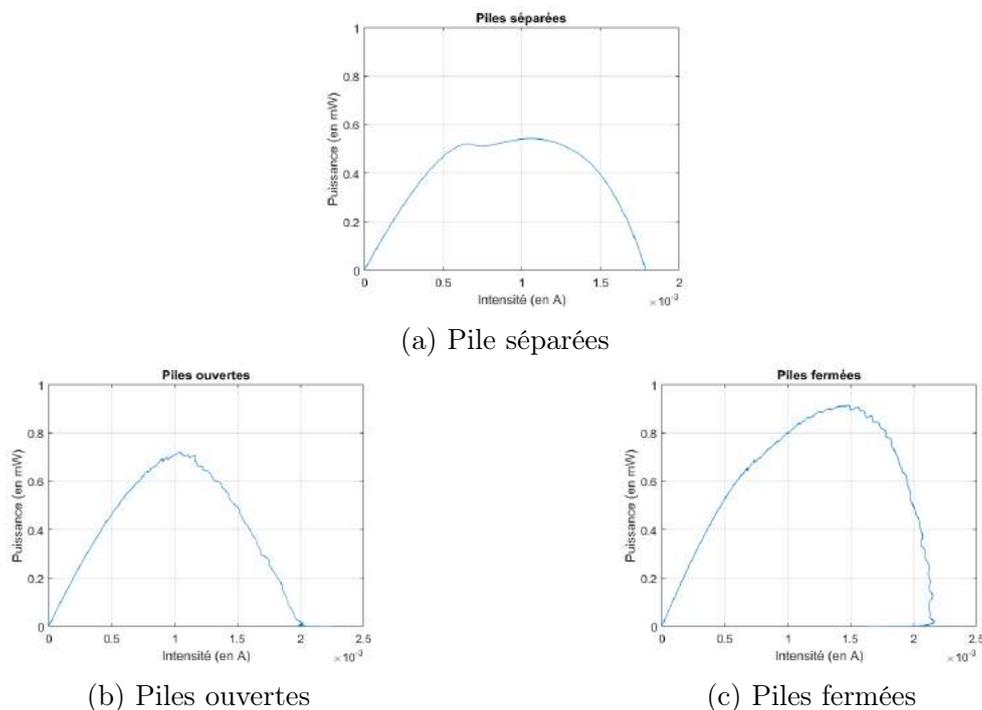


FIGURE 6.10 – Caractérisation en puissance des piles en série dans trois configurations différentes

	Piles séparées	Piles ouvertes	Piles fermées
Puissance maximum théorique (en mW)	0.53		
Puissance max (en mW)	0.54	0.72	0.91

Le résultat du calcul théorique pour les piles séparées est très proche du résultat réel. Cela permet de valider le modèle de pile utilisé.

La comparaison entre la puissance des piles séparée et des piles fermées donne des résultats non conformes à la théorie. En effet, la puissance a augmenté lorsque les deux piles ont été placées dans le même bassin. Ce résultat est peut être explicable par le changement de milieu pour la pile bleue. En effet, pour mettre les deux piles dans le même bassin, la pile bleue a

été transférée depuis son bassin vers celui de la pile verte. Le biofilm a alors baigné dans un effluent différent de l'effluent de son bassin initial. Pour le moment les détails du phénomène sont encore à expliquer.

Cependant la comparaison entre les piles ouvertes et fermées donne de très bons résultats. Lors que les piles sont fermées la puissance augmente de 26% par rapport à la configuration ouverte. Par ce résultat on montre que les piles construites répondent au cahier des charges du projet d'étude. L'isolation des piles dans des caissons permet d'augmenter la puissance par rapport à l'architecture traditionnelle lors de la mise en série des piles.

6.4 Aération des bassins d'essais

On teste cette fois l'influence de la présence d'air dans les effluents sur la pile et l'efficacité du système de fermeture de celle-ci. En effet, la pile doit pouvoir continuer à produire de l'électricité lorsque le bassin est en phase d'aération. C'est là que se trouve un des apports majeurs du projet de cette année par rapport à l'année dernière. En effet, l'équipe passée a construit une pile destinée à être placée en sortie du décanteur primaire, dans le bassin d'aération. Cependant, l'équipe passée n'a pas pris en compte le fait que le bassin d'aération est aéré à intervalle régulier par l'injection d'air dans les effluents. Or cela a pour effet de détériorer le biofilm et donc de réduire la puissance de la pile. Le caisson de nos piles permet de contrer cet effet.



FIGURE 6.11 – Essais avec injection d'air dans les effluents

Pour tester l'efficacité de l'isolement aux bulles de nos piles, on simule le fonctionnement du bassin d'aération en envoyant de l'air dans l'effluent grâce à un compresseur(Figure 6.11). On réalise les tests sur la pile verte en commençant par le cas où la pile est fermée pour éviter d'endommager le biofilm dès le premier test. La pile est laissée une demi-heure avec la trappe fermée et l'injection d'air avant de réaliser la caractérisation. De même, elle est ensuite laissée une demi-heure avec la trappe ouverte avant la caractérisation.

On trace les courbes de puissances pour la pile fermée et la pile ouverte (Figure 6.12).

	Sans injection d'air	Injection d'air avec la trappe fermée	Injection d'air avec la trappe ouverte
Puissance maximum (en mW)	0.42	0.36	0.17

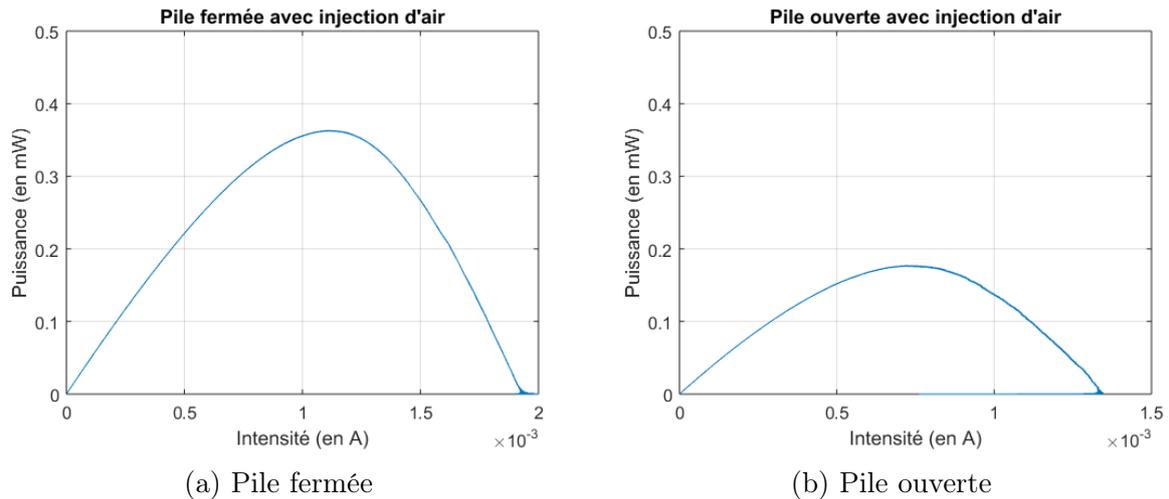


FIGURE 6.12 – Caractérisation en puissance de la pile verte pour la configuration fermée et ouverte lors de l'injection d'air.

Dans le cas de l'injection d'air avec la trappe fermée, la pile atteint une puissance de 0,36mW. On a donc une perte d'environ 15% alors que dans le cas de la pile ouverte, on observe une perte de puissance de 60%. Et qui peut augmenter avec le temps où l'on oxygène la pile. On peut donc dire que le système de fermeture est efficace par rapport au problème de l'aération du bassin.

6.5 Conclusion des essais

Les piles conçues devaient répondre à plusieurs exigences. Elles devaient limiter la perte de puissance lors de leur mise en série et lors de l'aération des bassins. Des essais ont permis de montrer que la nouvelle architecture permettait d'augmenter de 26% l'efficacité des piles en série par rapport à l'architecture traditionnelle. Ils ont aussi mis en évidence une conservation des performances des piles lors de l'aération contrairement aux piles précédentes qui perdaient 60% de leur efficacité dans ce cas.

7 Perspectives

Tout d'abord, avec plus de temps, nous aurions pu réaliser d'autres expériences sur nos piles. De plus, certains points à améliorer ou à réaliser se sont présentés à nous. En voici une liste.

Test de la pile en conditions réelles Il aurait été intéressant de tester le fonctionnement de la pile en condition réelle, dans un des bassins d'essais de l'IRSTEA. Cela aurait permis, par exemple, de vérifier que le dimensionnement de la pile était suffisant pour qu'elle puisse fonctionner parfaitement pendant les différents cycles que subissent les effluents : aérobie (pile fermée) et anaérobie (pile ouverte avec un renouvellement des effluents à l'intérieur).

Amélioration du vérin Celui-ci fuit légèrement lors de son utilisation et pour augmenter son efficacité énergétique, importante pour notre dispositif peu puissant, il faudrait l'améliorer. Sa fabrication est aussi assez longue et mériterait d'être raccourcie.

Amélioration du compartiment de la cathode Celui-ci est assez grand et rempli d'air, ce qui fait que la pile, si elle n'est pas attachée à une autre pile ou à autre chose, se retourne lorsqu'on la place dans l'eau, ce qui ne rend pas son installation très aisée. On pourrait facilement réduire la taille de ce compartiment où alors l'adapter de façon à ce que la pile flotte à la bonne hauteur.

Amélioration du rapport anode/cathode En comparant notre pile à celle réalisée l'an dernier, on remarque que le rapport cathode/anode que nous avons choisi peut sûrement être optimisé pour obtenir des meilleures performances, étant donné que le rapport puissance/taille d'anode de notre pile est deux fois moins élevé que celui de l'année dernière.

Ajout d'un système de gestion de l'énergie Le système pensé n'a pas une production d'énergie constante à cause des cycles d'ouverture/fermeture. Il faudrait pouvoir lisser cette production et stocker de l'énergie pour pouvoir la redistribuer plus tard. Un système de gestion de l'énergie, comme des condensateurs pourrait donc transformer cette source d'énergie intermittente en source d'énergie stable.

Amélioration de la technologie L'analyse des coûts de la pile montre que cette technologie est encore loin de rivaliser avec les autres énergies renouvelables. Il faudrait donc trouver des nouveaux matériaux ou une nouvelle architecture de pile pour améliorer le rendement.

Construction d'une pile entièrement modulable Une pile dont on pourrait facilement modifier les caractéristiques (distance anode-cathode, rapport anode-cathode, matériau de l'anode et de la cathode etc...) serait très utile dans une phase de recherche comme l'est celle du développement des piles microbiennes. Cela permettrait de facilement pouvoir optimiser une autre pile et pourrait aussi permettre de tester facilement d'autres matériaux.

8 Conclusion

L'objectif premier du projet d'études était de réussir, par la conception et la fabrication d'une pile microbienne adaptée, à mettre en réseau des piles de telle manière à ce que les puissances fournies s'additionnent. En passant par une phase d'appropriation du sujet et de compréhension des différents éléments sous-tendant la production d'énergie par des piles microbiennes, nous avons dans un premier temps pu déterminer un concept de pile pouvant répondre à ce cahier des charges : une trappe permet d'ouvrir la pile à intervalles de temps réguliers, pour renouveler les effluents à l'intérieur et permettre à la pile de continuer à produire du courant, et de la fermer en temps normal pour l'isoler ioniquement des autres piles et pouvoir cumuler les puissances. Quant au système permettant d'ouvrir et de fermer cette trappe, la solution retenue fût d'utiliser le flux d'air provenant de l'aération des bassins de station pour actionner un vérin pneumatique. Ceci permettait en outre d'augmenter le rendement de la pile en préservant un milieu anaérobie lors de l'aération sans lequel la puissance produite chute. Par diverses expériences, nous avons ensuite pu déterminer les caractéristiques nécessaires à la pile pour son bon fonctionnement, comme sa contenance, et ainsi écrire un cahier des charges.

Il nous a ensuite fallu choisir une méthode de fabrication pour la pile, et celle retenue fût l'impression 3D, qui nous permettait de concevoir les pièces nécessaires au bon fonctionnement de la pile de manière libre. Nous sommes alors passés à la phase de conception de la pile proprement dite où nous avons déterminé et choisi de façon précise, par modélisation 3D, les différentes parties de la pile. Celle-ci consiste en une pile de dimensions 12x15x18 cm, composée de 15 pièces à assembler. En parallèle de la conception, nous avons commencé à imprimer certaines pièces pour ne pas manquer de temps par la suite. Une fois toutes les pièces imprimées et préparées, nous avons alors pu assembler la première pile, puis la deuxième. Nous avons ensuite pu procéder à différents tests sur les piles pour vérifier que les piles fabriquées correspondaient bien au cahier des charges et si elles répondaient à l'objectif du projet d'études. Ainsi, nous avons constaté que le système d'ouverture/fermeture d'une trappe était très satisfaisant. Les piles, lorsque mises ensemble fermées dans le même bassin et reliées électriquement, fournissent de façon presque parfaite la somme de leurs puissances respectives, ce qui n'est pas du tout le cas pour des piles non isolées ioniquement. De plus, les tests pratiqués montrent que le système d'ouverture/fermeture actionné par un vérin pneumatique est tout à fait fonctionnel. Nous avons aussi pu constater l'efficacité de la fermeture de la trappe lors de la phase d'aération de la pile, permettant de maintenir une puissance délivrée constante, ce qui n'est pas le cas pour une pile ouverte en permanence.

Il reste cependant des points à poursuivre ou à améliorer à la suite de ce projet d'études. Premièrement, nous n'avons pas été en mesure d'effectuer tous les tests que nous aurions souhaité faire, par exemple le test d'autonomie de la pile, ou encore le test des piles en situation réelle à l'IRSTEA. De plus, même si ce projet d'études consistait surtout en la création d'un prototype pour vérifier le concept de pile proposée, certains points peuvent être améliorés. Par exemple, le vérin fabriqué, qui, même s'il remplit parfaitement sa fonction, n'est pas parfait et fuit ce qui diminue son efficacité énergétique, qui est pourtant cruciale étant donné les faibles puissances fournies par la pile. L'efficacité énergétique de la pile a aussi diminué par rapport à la pile de l'année dernière, ce qui peut être dû à la diminution du rapport cathode/anode qui demande donc à être vérifié.

Pour la suite, un rendez-vous avec Jean-Pierre Canler avec un test éventuel en station pourrait se faire dans les prochaines semaines, ce qui permettrait de vérifier la tenue des piles en conditions réelles. De plus, divers autres sujets de recherche sont encore à explorer sur le thème, par exemple le rapport anode-cathode optimal ou encore améliorer les matériaux des électrodes. Bien que les pièces de notre pile soient facilement modifiables, un élément qui pourrait aider

dans ces études serait la construction d'une pile entièrement paramétrable (distance anode-cathode, rapport anode-cathode, matériau de l'anode et de la cathode) pour pouvoir effectuer des tests aisément et rapidement, chose qui nous aurait été utile en début d'année lors des expériences.

Références

- [1] AMOES, Les énergies fossiles [en ligne]. Disponible sur [http ://www.energiepositive.info/fr/pourquoi/energies-fossiles.html](http://www.energiepositive.info/fr/pourquoi/energies-fossiles.html) (Consulté le 08/06/2016)
- [2] Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, Effets du réchauffement climatique [en ligne]. Disponible sur [http ://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-constat-des-scientifiques-du.html](http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-constat-des-scientifiques-du.html) (Consulté le 08/06/2016)
- [3] Ecole Centrale de Lyon, Rapport de soutenance du PE n°88 : Piles à combustible microbienne (2014).
- [4] Middaugh J., How to make cathodes with a diffusion layer for single-chamber microbial fuel cells [en ligne]. Disponible sur [http ://www.engr.psu.edu/ce/enve/logan/bioenergy/pdf/Cathode_093008.pdf](http://www.engr.psu.edu/ce/enve/logan/bioenergy/pdf/Cathode_093008.pdf) (consulté le 02/12/2016)
- [5] Moussaoui S., Les boues d'épuration [en ligne]. Disponible sur [http ://www.memoireonline.com/11/13/7708/m_Etude-sur-la-fermentation-methanique-des-boues-actives-de-la-station-d-epuration-de-Boumerdes-en4.html](http://www.memoireonline.com/11/13/7708/m_Etude-sur-la-fermentation-methanique-des-boues-actives-de-la-station-d-epuration-de-Boumerdes-en4.html) (Consulté le 09/06/2016)
- [6] Wikipedia, Traitement des eaux [en ligne]. Disponible sur [https ://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_des_eaux_us%C3%A9es](https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_des_eaux_us%C3%A9es) (Consulté le 09/06/2016)
- [7] Intellego, Pile chrome argent [en ligne]. Disponible sur [http ://www.intellego.fr/soutien-scolaire-terminale-s/aide-scolaire-chimie/exercice-revision-bac-chimie-42-corrige-pile-chrome-argent-ag-cr-18017](http://www.intellego.fr/soutien-scolaire-terminale-s/aide-scolaire-chimie/exercice-revision-bac-chimie-42-corrige-pile-chrome-argent-ag-cr-18017) (Consulté le 27/03/2016)
- [8] Wikipedia, Pile à combustible à membrane d'échange de protons [en ligne] Disponible sur [https ://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_à_combustible_à_membrane_d'échange_de_protons](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_à_combustible_à_membrane_d'échange_de_protons) (Consulté le 27/03/2016)
- [9] Wikipedia, Geobacter [en ligne]. Disponible sur [https ://en.wikipedia.org/wiki/Geobacter+](https://en.wikipedia.org/wiki/Geobacter+) (Consulté le 13/12/2015)
- [10] Oberg L., Observation [en ligne]. Disponible sur [http ://www.odec.ca/projects/2011/guptas/observati](http://www.odec.ca/projects/2011/guptas/observati) (Consulté le 13/12/2015)
- [11] Dewan A., Beyenal H., Lewandowski Z., Scaling up Microbial Fuel Cells, pp 7643–7648 (2008)
- [12] Martin E., Étude de la Performance de piles à combustible microbiennes et l'effet des matériaux d'électrodes (2011). Disponible sur [https ://publications.polymtl.ca/573/1/2011_EdithMartin.pdf](https://publications.polymtl.ca/573/1/2011_EdithMartin.pdf)

- [13] Additiverse, Comment choisir son filament [en ligne]. Disponible sur [http ://www.additiverse.com/comment-choisir-son-filament-pour-son-imprimante-3d/](http://www.additiverse.com/comment-choisir-son-filament-pour-son-imprimante-3d/) (Consulté le 16/12/2015)
- [14] 3Dnatives, Les plastiques [en ligne]. Disponible sur www.3dnatives.com/materiaux-impression-3d-abs-pla-polyamides-alumide/ (Consulté le 30/05/2016)
- [15] RepRage, 3D printing filament and moisture damage [en ligne]. Disponible sur [https ://3dprint.com/tag/reprage/](https://3dprint.com/tag/reprage/) (Consulté le 16/12/2015)
- [16] Baudler A.; Schmidt I., Langner M., Greiner A. and Schröder U., Royal Society of Chemistry, Does it have to be carbon? Metal anodes in microbial fuel cells and related bioelectrochemical systems (2015)
- [17] Wikipédia, Vérin [en ligne]. Disponible sur [https ://fr.wikipedia.org/wiki/Vérin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Vérin) (Consulté le 01/06/2016)
- [18] Sodemann, Comment calculez-vous la constante d'un ressort de compression?[en ligne] Disponible sur [http ://www.ressorts-sodemann.fr/faq-wiki-ressorts/ressorts-de-compression/comment-calculez-vous-la-constante-dun-ressort-de-compression](http://www.ressorts-sodemann.fr/faq-wiki-ressorts/ressorts-de-compression/comment-calculez-vous-la-constante-dun-ressort-de-compression) (Consulté le 05/06/2016)
- [19] Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, Tarifs d'achats [en ligne]. Disponible sur [http ://www.developpement-durable.gouv.fr/Quels-sont-les-tarifs-d-achats.html](http://www.developpement-durable.gouv.fr/Quels-sont-les-tarifs-d-achats.html) (Consulté le 01/06/2016)

A Cahier de Charges

- **Contexte**
 - Environnement : bassin station d'épuration.
 - Limite du système : plusieurs piles
 - Situation de vie : alternance d'états, avec ou sans aération.
 - Eléments du milieu : *effluents* (bactéries, charge organique, corps étrangers, bulles, remous, mousse...) dont les caractéristiques varient dans le temps (acidité, température, composition chimique...) // *air*.
 - **Fonction principale** : Production d'énergie électrique à partir de la charge organique de la station d'épuration.
 - **Fonctions complémentaires** :
 - * La mise en série (sans contact ionique) en vue d'augmenter l'énergie produite.
 - * L'accès facile pour la maintenance.
- **Contraintes** :
 - Créer une architecture afin de permettre de :
 - * Produire plus d'énergie qu'elle n'en consomme.
 - * Limiter les coûts de production pour fabriquer plusieurs piles.
 - * Résister au milieu.
 - * Ne pas gêner le fonctionnement normal de la station d'épuration.

B Rapport de l'expérience de détermination du matériau de l'anode

B.1 Objectifs et présentation du contexte

Nous recherchons le meilleur matériau pour l'anode, afin d'augmenter si possible l'efficacité de la pile et de diminuer son coût . Les matériaux courants et testés par le projet précédent sont l'acier inoxydable, le tissu de carbone et le graphite . Nous appuyant sur leur résultats, nous pouvons d'ores et déjà éliminer l'acier, jugé trop instable et moins bon en densité de courant, et le graphite, encore moins bon. Nous avons testé le cuivre, présenté dans un article comme un matériau intéressant du fait de sa grande conductivité (permettant d'en mettre une très fine couche seulement et réduisant donc les coûts) .

Néanmoins, le cuivre est oxydé par l'air, ce qui n'en fait pas un matériau adapté pour l'anode à priori, sans compté ses propriétés antibactériennes .

Dans cet article, l'oxydation était empêchée par le biofilm qui se créait, et la pile obtenue fonctionnait alors parfaitement . Cependant pour créer ce biofilm, les chercheurs imposaient un potentiel à l'anode pendant un certain temps pour empêcher l'oxydation. Nous avons cherché à voir si un biofilm pouvait se créer sans imposer de potentiel, pour pouvoir l'utiliser dans des conditions simples (et sans nécessiter d'apport d'énergie extérieur) .

L'expérience n'a pas conclu en faveur de l'utilisation du cuivre.

B.2 Matériaux

Les matériaux testés pour le anodes sont le cuivre et le tissu de carbone (anode témoin). Les dimension des anodes sont identiques pour les deux expériences (1,9 cm x 7,3 cm) avec la même longueur immergée.

B.3 Protocole

- Placer les anodes dans deux bocaux différents avec effluents en anaérobie avec une résistance de 1kOhms en charge .
- Grâce au dispositif informatisé de mesure de la tension disponible au laboratoire, suivre la tension aux bornes des deux piles pendant une durée d'au moins 8 jours (5 jours pour laisser le temps au biofilm de se former puis 3 au moins pour pouvoir comparer les performances des deux anodes).

B.4 Résultats

Nous remarquons qu'une tension non négligeable est directement présente aux bornes de la pile (Figure B.1) avec l'anode en cuivre, et qu'elle décroît en fonction du temps. Aux bornes de la piles avec l'anode en tissu de carbone, la tension monte d'abord progressivement avant de décroître, ce qui correspond bien à un cycle création du biofilm, consommation de la matière organique. De plus, à la fin de l'expérience, l'électrolyte (les effluents ici) dans le cas du tissu carbone était transparent (Figure A.5) mais verdâtre dans le cas du cuivre (Figure A.4) . De plus à la surface du cuivre, aucun biofilm n'a pu être observé (Figure A.3). Cela signifie donc que dans le cas du tissu de carbone il y a bien consommation de la matière organique pour produire du courant, alors que la tension observée dans le cas du cuivre ne résulte que de l'oxydation du cuivre par l'air, puisque la couleur verdâtre s'explique par la présence d'ions cuivreux dans

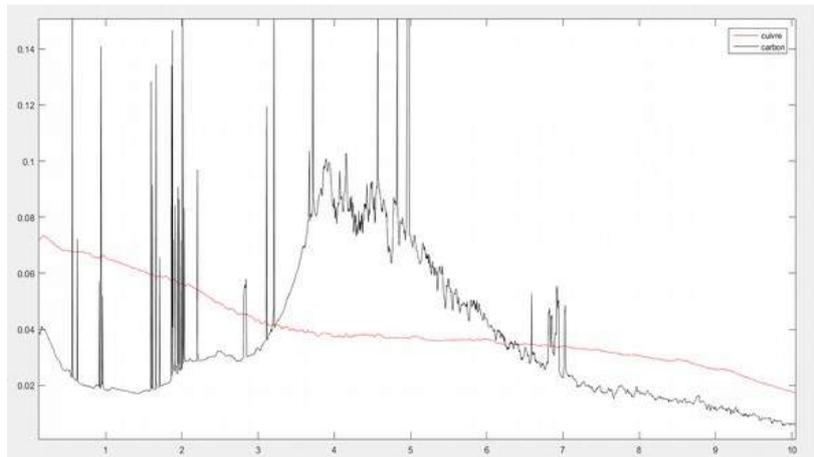


FIGURE B.1 – Tension (en Volts) en fonction du temps (en jours)

l'électrolyte. Il n'y a donc aucun biofilm créé et le profil de tension observé correspond à une oxydation du cuivre et non des matières organiques .



FIGURE B.2 – Piles au début de l'expérience



FIGURE B.3 – Anode en cuivre après expérience, pas de biofilm



FIGURE B.4 – Pile avec anode en cuivre après expérience



FIGURE B.5 – Pile avec anode en tissu de carbone après expérience

B.5 Conclusion

Le cuivre ne peut donc pas permettre à une biopile de fonctionner (aucun biofilm n'est formé, le cuivre s'oxyde). Le cuivre n'est pas une anode convenable pour une pile à combustible microbienne et nous ne retenons donc pas ce matériau pour l'anode .

C Rapport de l'expérience de détermination du rapport Cathode/Anode

C.1 Objectifs

Le but de cette expérience est de déterminer le meilleur rapport Cathode/Anode pour diminuer les coûts de la pile (notamment la taille de la cathode qui est la partie la plus onéreuse) sans diminuer les performances de celle-ci.

C.2 Installation

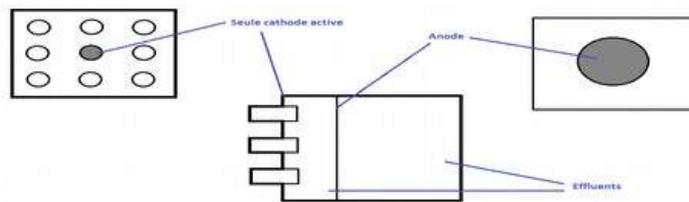
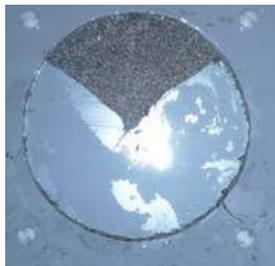


FIGURE C.1 – Schéma de principe de l'expérience

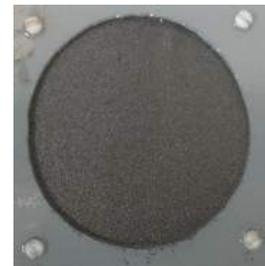
On dispose d'une pile composée d'une cathode à air ronde de $3,6\text{cm}^2$ et d'une plaque sur laquelle on peut placer une anode ronde en tissu de carbone. Des rails sont disposés à différentes distances de la cathode pour guider la plaque. Le réacteur peut se fermer pour éviter au maximum un contact entre le biofilm et l'air.



(a) Rapport 1/3



(b) Rapport 1/4



(c) Rapport 1/10

FIGURE C.2 – Montage pour trouver le meilleur Rapport anode/cathode

C.3 Protocole expérimental

On utilise dans un premier temps une anode dont la surface est égale à 10 fois celle de la cathode et pour toute l'expérience on placera la plaque à 2cm de la cathode, ce qui correspond à la distance inter-électrode optimale en statique. On rajoute aux effluents de l'acétate (1 g/L) ainsi que des boues activées pour enrichir le milieu en bactérie et en charge organique.

On branche une résistance d'1 $k\Omega$ aux bornes de la pile et on mesure la tension à ses bornes toutes les minutes jusqu'à atteindre le régime stationnaire. On découpe alors une partie de l'anode pour faire varier le rapport des surfaces et on réitère le processus.

C.4 Résultats

La tension reste la même quel que soit le rapport cathode/anode choisi, on peut donc choisir le rapport le plus petit (1/10) pour minimiser la surface de la cathode sans diminuer les performances de la pile.

D Rapport de l'expérience d'autonomie de la pile

Nous voulons nous assurer que, pendant les cycles où la pile est fermée, le volume d'effluents suffit à assurer le fonctionnement de la pile. Cela correspond à une durée d'environ 1h (intervalle entre 2 cycles d'aération où la pile doit être absolument fermée). Nous commençons par une approche quantitative en raisonnant sur la pile construite l'année dernière : nous allons tester son autonomie dans un volume connu. Nous considérerons d'abord que les performances de l'ancienne pile sont proches de celles de la pile que nous allons construire. Cette hypothèse est assez valable car nous allons utiliser principalement la même structure et les mêmes matériaux pour notre pile.

Cette expérience nous permettra d'estimer le temps d'autonomie de la pile et donc de voir quel volume est nécessaire pour notre pile.

D.1 Matériel

- la pile de l'année précédente en état de marche
- de l'effluent provenant de la station
- un bac pour effectuer nos expériences
- un voltmètre de mesures en continue

D.2 Protocole

Attention : il faut prévoir le temps de création du biofilm sur les électrodes avant de pouvoir réaliser les mesures. Cela prend environ 5 jours. L'expérience consiste à mesurer, dès que la pile fonctionne (biofilm créé), le moment où la tension chute (ie le moment où l'effluent est épuisé) D'abord, nous mettons la pile dans l'effluent pour que le biofilm se forme. Nous mesurons toute les heures la tension entre les électrodes pour savoir quand le biofilm est créé. A partir de ce moment, nous mesurons la tension et l'intensité toute les demi heures jusqu'à observer une chute de tension (effluent épuisé).

D.3 Résultats

Nous avons lancé l'expérience le jeudi 10/12/15. Nous attendons d'abord une semaine que le microfilm se forme. La tension initiale était de 0,2 V. Ce premier résultat est étonnant (trop élevé). Il se peut qu'il restait du biofilm de l'année passée sur les fils de la pile ou qu'une réaction chimique ait eu lieu dans les effluents. Voici la courbe de la tension en fonction du temps (Figure D.1). Un plateau étant atteint à 0,6 V (les valeurs atteintes l'an dernier), on considère que le biofilm est bien créé.

Commentaires sur la courbe :

- on remarque après chaque agitation une brève chute de tension, sûrement due à une légère oxygénation du milieu. Par exemple entre le 15 et 16 décembre.
- le 14 décembre, on observe une chute plus longue qui remonte que plus tard. Cela est sûrement la conséquence d'un faux contact dans les branchements du voltmètre.

Pour continuer l'expérience, nous avons décidé d'augmenter la distance entre les électrodes de 1 cm pour que l'effluent se renouvelle plus facilement par diffusion.

Nous avons donc lancé la phase suivante d'expérimentation le 16/12. On a restreint le volume d'effluent à 18L. Le 06/01, nous arrêtons l'expérience (tension à 8,2 mV). Voici la courbe obtenue :

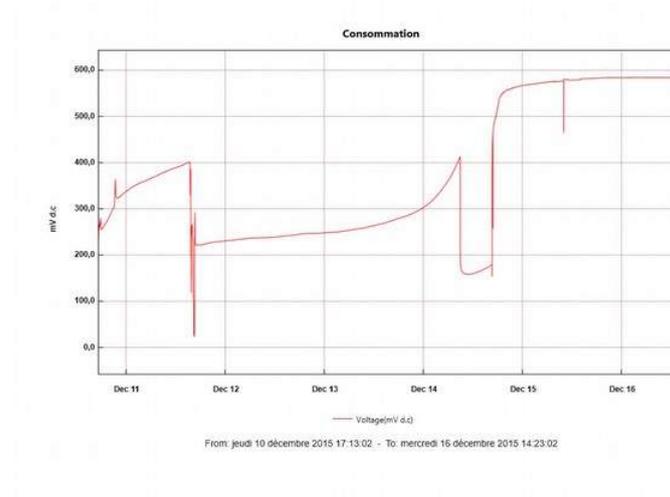


FIGURE D.1 – Evolution de la tension de la première expérience

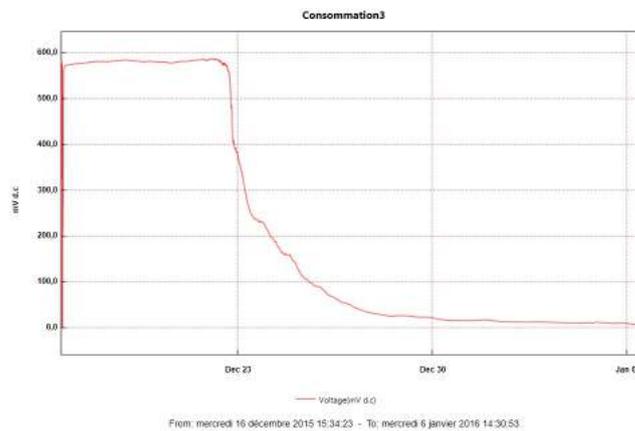


FIGURE D.2 – Évaluation de la tension de la deuxième expérience

La tension finale reste autours de 10mV même après avoir remué. La tension chute au bout du 6ème jour.

D.4 Calcul de l'autonomie

Le test d'autonomie a été réalisé avec comme charge extérieure une résistance de 1k Ohm. D'après les résultats de l'année dernière la pile débite une puissance maximale pour une résistance externe égale à la résistance interne. Pour quantifier la consommation on reprend la modélisation de la pile de l'année dernière : la pile est modélisée par un générateur de tension E (tension à vide) et une résistance interne (Figure D.3). Pour un test avec des effluents provenant du bassin de décantation primaire, sans acétate, sans agitation ils avaient obtenu : $r = 32\Omega$ et $E = 622.8mV$ La surface S de l'anode est de : $S = 0.26 \times 0.15 = 0.0416m^2$

$$P_s = \frac{Ei - ri^2}{S} = \frac{R}{S(r + R)^2 E} \quad (3)$$

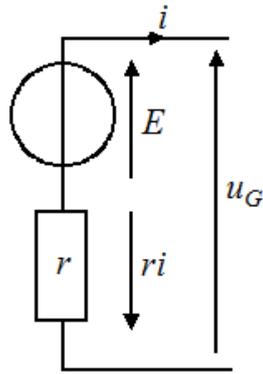


FIGURE D.3 – Schéma électrique

$$P_{max} = \frac{E^2}{4Sr} = 72.6 \frac{mW}{m^2} \quad (4)$$

Avec la résistance $R = 1000\Omega$ on a : $P = 8.75 \frac{mW}{m^2}$ c'est est-à-dire une consommation 8.3 fois plus faible qu'à la puissance maximum. On considère que la consommation en effluent est proportionnelle à la puissance. A la puissance maximum le temps de chute est donc de 17.3h.

$$C = \frac{V}{TS} = \frac{18}{17.30.0416} = 25 \frac{L}{hm^2} \quad (5)$$

E Manuel d'utilisation de l'imprimante 3d appliqué à la pile à combustible

Les caractéristiques souhaitées pour les pièces des piles (précision, étanchéité ou sans contraintes d'impression) imposent de configurer finement l'imprimante en modifiant les paramètres par défaut du fabricant. Cette annexe présente en détails les paramètres utilisés, pour de potentielles impressions dans les prochaines années. Pour obtenir une pièce répondant au cahier des charges il peut être nécessaire de réaliser plusieurs tentatives. Au fil des impressions certains défauts reviennent plus souvent que d'autres. Ce document permet aussi de détailler ces défauts et les corrections à apporter pour les éviter.

E.1 Paramètres

La programmation des impressions se fait grâce au logiciel Simplify3D. Il propose par défaut 3 types d'impression (rapide, moyenne, précise) mais il est recommandé d'utiliser le paramétrage des options avancées pour obtenir des caractéristiques particulières. Voici les caractéristiques utilisées pour la pile (et les onglets dans lesquels elles sont placées) :

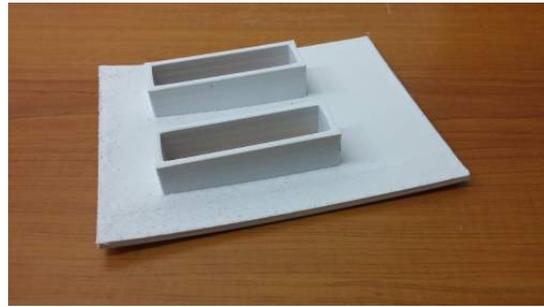
	Onglet	Caractéristique souhaitée		
		Précision	Etanchéité	Sans contraintes
Top solid layer	Layer	3	4	3
Bottom solid layer	Layer	3	4	3
Outline/Perimeter Shells	Layer	2	5	2
Infill percentage	Infill	35%	100%	35%
Heated Bed : Per-Layer Temperature Setpoints	Temperature	45°C durant toute l'impression	45°C durant toute l'impression	45°C durant toute l'impression
Right Extruder : Per-Layer Temperature Setpoints	Temperature	220°C jusqu'à la couche 5 puis 230°C	220°C jusqu'à la couche 5 puis 230°C	220°C jusqu'à la couche 5 puis 230°C
Default Printing Speed	Other	4000 mm/min	9000mm/min	15000mm/min
Outline Underspeed	Other	50%	75%	90%

E.2 Défauts courants et solutions

Les principaux problèmes lors de l'impression des pièces proviennent de la grande taille de certaines pièces. Le caisson, par exemple, est proche des limites de l'imprimante en terme de taille de pièce. La grande taille induit des phénomènes qui auront tendance à faire décoller la pièce du support avant la fin de l'impression. Si cela se produit, la pièce est entraînée par la



(a) Cheminée équipée de sa jupe d'impression



(b) Défaut de la cathode

FIGURE E.1 – Défauts pendant l'impression

buse et le plastique n'est plus étalé sur la pièce. Il forme alors un amas qui vient englober la buse et qui peut endommager l'imprimante. Les phénomènes en cause dans le décollement sont de natures différentes mais une solution peut être apportée à chacun d'entre eux.

Solution générique : vaporiser un spray de fixation sur la plateau avant l'impression

Rétractation thermique du plastique : sur des grandes pièces les contraintes lors du refroidissement du plastique sont très importantes. La pièce s'arc-boute si le plastique n'est pas assez chaud (figure E.1b)

Solution : faire chauffer le plateau pendant toute la durée de l'impression (contrairement aux consignes du fabricant) et bien centrer la pièce sur la zone chauffante.

Surface de contact avec le plateau trop petite : plus la surface de contact entre la base de la pièce et le plateau est grande plus la force d'adhésion est importante. Ainsi, les pièces avec une faible surface de contact se décollent facilement. Cela est d'autant plus vrai si la pièce est très haute (l'effet de levier démultiplie la force).

Solution : création d'une jupe autour de la pièce qui sera détaché après l'impression (figure E.1a)

Mauvaise qualité du contact avec le plateau : la force d'adhésion dépendant de la qualité de pose de la première couche. Il faut que le plastique soit plaqué sur le plateau pour avoir une adhésion maximale. Une mauvaise qualité de pose se détecte par la possibilité de distinguer chaque filament séparément.

Solution : régler manuellement la hauteur du plateau lors de la première couche pour plaquer le filament sur le plateau

F Prix de la pile

pièce	matériau	quantité	unité	prix
Structure de la pile	PLA	700	g	37,33
Piston	PLA	50	g	2,67
	ressort	1		5
	joint			
	ressort			
Anode	tissu de carbone	156,25	cm ²	62,5
Cathode	tissu de carbone	40	cm ²	16
	Poudre de carbone	61	mg	0
	Solution de PTFE 60 %	5	mL	
	Poudre de carbone enrichie en platine(10%)	100	mg	1,43
	Solution à 5 % de Nafion	667	uL	4,71
	Iso-propanol pur (99%)	333	uL	0,05
	Eau déionisée	83	uL	
Total				124,69

Les éléments les plus chers sont l'anode (plus de 60 euros), et le plastique (40 euros). Finalement, la cathode, qui contient tout de même du platine, représente un cinquième du prix de la pile (moins de 25 euros). Il serait donc intéressant de tenter de concevoir une anode avec un autre matériau, pour trouver un meilleur compromis entre le prix et le rendement de la pile. A titre d'exemple, avec une cathode en acier inoxydable, la pile ne coûterait plus que 70 euros. D'après des tests réalisés l'année dernière, le rendement obtenu avec de l'acier inoxydable est deux fois inférieur à celui obtenu avec du tissu de carbone. Une étude plus poussée sur un matériau pouvant substituer le tissu de carbone serait donc intéressante à mener.

Nous pouvons aussi comparer les coûts de la pile avec l'année dernière. En se basant uniquement sur le plastique et la quantité de tissu de carbone que contenait l'ancienne pile, on obtient un coût d'environ 380 euros.

	Cette année	Année dernière
Coût	130 €	380 €
Puissance (mW/m^2) ¹	46	111
Taille de l'anode (cm^2) ²	91,4	416
Rapport anode/cathode	taille 11%	25%
Prix pour fournir 1W	309 200 €	82 294 €
Mise en série	oui	non

Notre pile est donc nettement moins performante que l'année dernière. Cela est dû au fait que nous utilisons des matériaux plus chers : PLA au lieu de PVC, intégration d'un piston, construction d'un caisson autour de la pile. Le rapport anode/cathode n'est peut-être pas optimal pour notre pile. Les tests que nous avons faits en début d'année sur le rapport optimal n'étant pas très concluant, nous avons décidé de prendre la surface minimale de cathode.

1. La puissance est en mW par m^2 d'anode

2. La taille de l'anode est différente de celle prise en compte pour le prix de la pile car nous prenons en compte la taille réellement utile à la pile, une partie de la anode étant recouverte par le cadre.

Finalement, il s'avère que ce n'est pas la cathode l'élément le plus cher de la pile, et qu'on pourrait atteindre un rapport de 25% sans trop augmenter le prix. Néanmoins, il ne faut pas oublier que notre pile est novatrice car nous pouvons les mettre en série, et donc en mettre plusieurs dans le même bassin, contrairement à l'année dernière.

Nous pouvons aussi comparer nos piles à d'autres sources d'énergie du même type. Nous avons donc cherché le prix pour fournir 1W de manière pratiquement illimitée pour des énergies renouvelables. Les panneaux solaires coûtent environ 1.5 €/W, tandis que l'éolien 3 €/W [19]. Notre pile est donc encore loin de pouvoir concurrencer d'autres sources d'énergie renouvelable.

G Protocole de caractérisation des piles

Considérons un dipôle D avec deux bornes $+$ et $-$ (dans ce dipôle peut se trouver une ou plusieurs piles, des résistances etc). Nous voulons tracer les caractéristiques $I=f(V)$ de ce dipôle pour pouvoir en déduire les caractéristiques $P=f(I)$. Pour une pile, cela est en effet la caractéristique souhaitée pour connaître la puissance maximale qu'elle peut délivrer.

Pour cela nous utilisons un potentiostat. Cet appareil possède trois électrodes : référence, auxiliaire et de travail et sert d'ordinaire à caractériser une pile en fonction d'une électrode de référence, placée à un certain potentiel. Ici, seule la différence de potentiel entre les deux bornes de la pile nous intéresse (la tension de la pile). Nous relierons ainsi les électrodes auxiliaire et de référence à la même borne de la pile. L'électrode de travail est elle reliée à l'autre électrode, souvent l'anode.



FIGURE G.1 – Potentiostat

Le potentiostat fait alors varier la tension entre l'électrode de travail et auxiliaire sur une certaine plage de tensions que l'on choisit, et relève pour chaque valeur de tension le courant entre ses bornes. Nous obtenons alors la caractéristique $I=f(U)$ de la pile. Il suffit alors d'utiliser la loi $P = UxI$ pour avoir la caractéristique de la pile $P=f(I)$. Le logiciel utilisé pour contrôler le potentiostat est ici Voltmaster.

Il faut prendre garde à deux choses pour réussir une caractérisation :

- Ne pas faire varier le potentiel trop rapidement, sinon la pile n'a pas le temps d'atteindre son nouvel équilibre et nous avons des phénomènes d'hystérésis qui perturbent les mesures. Une vitesse de quelques mV/s évite cela.
- Attendre un certain temps (une demi heure par exemple) entre le moment où l'on débranche la résistance en série de la pile et où l'on commence les caractérisations. En effet, pendant ce temps, la tension aux bornes de la pile augmente et se stabilise plus tard (phénomène dû à la reconstitution de la charge organique autour du biofilm).

H Vérin et pistons

H.1 Calcul de la force du piston (si il est parfait)

On a $F = S.P$ avec S la surface du piston, P la surpression appliquée et F la force obtenue. Cela donne avec $S = \pi.r^2$ et $r=2\text{cm}$, $P=0,3\text{ bars}$: $F=37,6\text{ N}$.

H.2 Calcul des constantes du ressort

Soit c la course du ressort. On a, avec la loi de Young pour les ressorts :

$F_{ressort} = R.c \gg F_{frottements+masse'trappe} \approx 7\text{N}$ pour que le piston remonte (au moins un peu) et $F_{ressort} = R * c < F_{pression} = 37,8\text{N}$ pour que le piston descende bien. Cela donne cette condition sur R : $7\text{N} \ll R.c \ll 37,8\text{N}$

En prenant de la marge, on choisit : $9\text{N} < R.c < 18\text{N}$. Pour une course de 3 cm cela donne : $0,3\text{N/mm} < R < 0,6\text{N/mm}$.

Le ressort choisi pour le premier piston a une raideur de 0,37N ce qui se situe bien dans cette gamme.

Beaucoup de ressorts vendus le sont sous une certaine longueur (eg :30cm) et c'est ensuite à nous de le dimensionner pour qu'il corresponde à nos attentes. Ainsi, avec les données fournies par le fabriquant (diamètre des fils du ressort, diamètre du ressort, matériau utilisé, nombre de spires) nous sommes en mesure de prévoir la raideur qu'aura le ressort une fois coupé, ce qui est utile pour l'achat des ressorts. Nous avons :

$$R = \frac{G}{8} \cdot \frac{d^4}{D^3 n} \quad (6)$$

et

$$F = \frac{G}{8} \cdot \frac{d^4 \cdot c}{D^3 \cdot n} = R \cdot c \quad (7)$$

avec G le Module de cisaillement en $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, caractéristique du matériau, de l'épaisseur du fil, D le diamètre du ressort extérieur, n le nombre de spires (actives) [18]. Ainsi, moyennant quelques calculs, nous pouvons trouver le ressort qui convient facilement.

I Appendice de gestion de projet

Trombinoscope



Louis Calot



Théo Charmarande



Oussama Hourira



Pierre Lechevallier



Léo Peuziat



Jacques Zwar

Problèmes rencontrés et solutions apportées

- Il a été difficile dans un premier temps de distinguer précisément les différentes tâches à réaliser. Le but du PE était de concevoir et de construire plusieurs piles. Or on ne peut pas définir précisément les étapes de construction de piles qui n'ont pas encore été conçues. Nous avons donc dû redéfinir nos tâches avant la fabrication, une fois la conception terminée.



FIGURE I.1 – Un échec cuisant d'impression

- Avant de définitivement choisir d'utiliser l'imprimante 3D nous avons mené des essais d'impression pour vérifier que nous étions capables de la prendre en main. Ces pièces étaient de dimensions relativement réduites pour économiser de la matière. Les essais étant concluants nous avons décidé d'imprimer toutes nos piles en 3D. Cependant, les premières impressions de pièces en taille réelle furent désastreuses (Figure I.1). En effet, l'imprimante et les paramètres donnés par le fabricant, ne sont pas adaptés à l'impression

de pièces de grandes tailles. Il nous a fallu alors plusieurs semaines d'essais avant de trouver les bons paramètres.

- L'assemblage de la première pile a été très long (près de un mois) car nous avons du mal à boucher les fuites d'eau qui se créaient au niveau de la cathode. On s'est alors rendu compte que les fuites provenaient des joints mais aussi des pièces en elles-mêmes, qui n'étaient pas étanches. Le problème des fuites des joints est récurrent sur ce type de pile mais du fait de la complexité de notre installation, les fuites étaient très difficiles à boucher. A force de persévérance nous sommes arrivés à régler ce problème. Pour éviter les mêmes ennuis avec la seconde pile nous avons modifié la géométrie de la pile. En ce qui concerne le problème d'étanchéité du PLA, les recherches faites sur internet et dans la littérature n'ont rien données. Peu d'articles sont publiés sur l'utilisation du PLA dans l'eau. Après avoir cherché parmi les solutions traditionnelles (auprès de l'atelier du H9, de magasins de bricolage) nous avons décidé de recouvrir la pile de PDMS. En comparaison de la première pile, la deuxième pile a été montée en moins d'une semaine !

Aspects positifs

- La liberté totale qui nous a été donnée, nous a permis de réellement mener notre projet de bout en bout selon nos envies et nos convictions. Nous avons appris à travailler en autonomie, que ce soit pour les choix de conception ou pour la fabrication de la pile. Les choix que nous avons réalisés tout au long du projet se sont finalement avérés être pertinents



FIGURE I.2 – L'équipe du projet sur le terrain d'opération en tenue réglementaire

- Ce projet nous a permis d'avoir une certaine maîtrise de l'impression 3D. Nous avons maintenant les compétences pour imprimer des pièces mais surtout nous connaissons les limites et les avantages de cette technique.
- Le laboratoire nous a apporté son support tout au long du travail. Le personnel, que ce soit de l'atelier ou des laboratoires, a toujours été à nos côtés pour nous aider.

Check-list de rapport de Projet d'Etudes
A remplir par les rédacteurs (élèves)
et à insérer en dernière page du rapport

A développer

Renseigner la case par le nom du responsable, ou la date ou une simple croix lorsque la vérification a été faite.

Vérification présence	Vérification qualité
-----------------------	----------------------

Contenu

Résumé en français	OK	OK
Résumé en anglais	OK	OK
Table des matières	OK	OK
Table des figures	OK	OK
Introduction	OK	OK
Conclusion générale	OK	OK
Bibliographie	OK	OK
Citation des références dans le texte	OK	OK

Forme

Vérification orthographe	OK	OK
Pagination	OK	OK
Homogénéité de la mise en page	OK	OK
Lisibilité des figures	OK	OK