

ÉCOLE CENTRALE DE LYON

PROJET D'ÉTUDES NUMÉRO 89

RÉALISATION D'UNE PILE À COMBUSTIBLE MICROBIENNE INTÉGRABLE  
DANS DES CANALISATIONS D'EAUX USÉES

---

## Rapport de travail du PE 89

---

*Les élèves du groupe de PE89*

Joris CHMIELEWSKI

Damien DOUTEAUX

Bénédicte LENGLET

Benjamin MANIER

Laurène SEGUIN

*Tuteur*

Naoufel HADDOUR

*Conseiller gestion de projet*

Laure FLANDRIN

*Conseiller expression et  
organisation*

Baptiste CELLE



ÉCOLE  
CENTRALE LYON

*Année scolaire 2013/2014*



## Table des matières

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Remerciements</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Introduction</b>   | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Le groupe PE 89</b>  | <b>5</b>  |
| 3.1      | Les encadrants . . . . .  | 5         |
| 3.2      | Les élèves . . . . .  | 5         |
| <b>4</b> | <b>Contexte et objectifs</b>  | <b>6</b>  |
| 4.1      | Motivation du sujet . . . . .   | 6         |
| 4.2      | Objectifs fixés . . . . .   | 6         |
| <b>5</b> | <b>Qu'est-ce qu'une pile à combustible microbienne ?</b>                          | <b>7</b>  |
| 5.1      | Qu'est-ce qu'une pile ? . . . . .   | 7         |
| 5.2      | Qu'est-ce qu'une pile à combustible ? . . . . .                                   | 7         |
| 5.3      | Quelles sont les particularités des piles à combustibles microbiennes ? . . . . . | 8         |
| 5.4      | Grandeurs obtenues en laboratoire pour les MFC . . . . .                          | 9         |
| <b>6</b> | <b>Conception du prototype et planification du travail</b>                        | <b>10</b> |
| 6.1      | Diagramme GANTT . . . . .   | 10        |
| 6.2      | Recherche et assimilation . . . . .   | 10        |
| 6.3      | Réunions administratives . . . . .  | 10        |
| 6.4      | Conception du prototype . . . . .   | 11        |
| <b>7</b> | <b>Confection de la pile</b>  | <b>13</b> |
| 7.1      | Fabrication des cathodes . . . . .  | 13        |
| 7.1.1    | Structure des cathodes utilisées . . . . .  | 13        |
| 7.1.2    | Protocole de fabrication des cathodes . . . . .                                   | 13        |
| 7.1.3    | Réalisation des cathodes . . . . .  | 14        |
| 7.2      | Usinage des pièces du tuyau . . . . .   | 16        |
| 7.2.1    | Les plans définitifs du tuyau . . . . .   | 16        |
| 7.2.2    | Usinage des différentes pièces . . . . .  | 16        |
| 7.3      | Mise en place des éléments sur le tuyau . . . . .                                 | 17        |
| 7.3.1    | Mise en place des cathodes . . . . .  | 17        |
| 7.3.2    | Mise en place de l'anode . . . . .  | 17        |
| 7.3.3    | Résultats pratiques importants pour la suite . . . . .                            | 17        |
| 7.4      | Réalisation du circuit de fonctionnement de la pile . . . . .                     | 17        |
| 7.4.1    | Circuit hydraulique de fonctionnement . . . . .                                   | 17        |
| 7.4.2    | Circuit électrique de fonctionnement . . . . .                                    | 19        |
| <b>8</b> | <b>Tests de la pile et de ses composants</b>                                      | <b>21</b> |
| 8.1      | Evaluation des qualités des cathodes et étanchéité . . . . .                      | 21        |
| 8.2      | Valeurs électriques remarquables de nos composants . . . . .                      | 21        |
| 8.2.1    | Recherche du maximum de puissance . . . . .                                       | 21        |
| 8.2.2    | Résistance interne de la pile . . . . .   | 22        |
| 8.3      | Rapport surfacique cathode/anode . . . . .  | 22        |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>9 Bilan et perspectives</b>   | <b>24</b> |
| 9.1 Enseignements tirés du projet . . . . .  | 24        |
| 9.2 Perspectives de développements futurs du projet . . . . .                        | 24        |
| 9.2.1 Participation aux fêtes de la science . . . . .                                | 24        |
| 9.2.2 Etude de la charge organique en amont et en aval de la pile . . . . .          | 24        |
| 9.2.3 Etude de la puissance débitée pour des solutions tests « parfaites » . . . . . | 24        |
| 9.2.4 Test de la pile en milieu réel . . . . .                                       | 24        |
| <b>10 Conclusion</b>   | <b>25</b> |
| <b>Annexe A - Cahier des charges</b>   | <b>26</b> |
| <b>Annexe B - Diagramme GANTT</b>  | <b>27</b> |
| <b>Annexe C - Tableau des coûts</b>  | <b>28</b> |
| <b>Annexe D - Valeurs expérimentales</b>   | <b>29</b> |

## Table des figures

|  |    |
|--|----|
| 1 Schéma de fonctionnement simplifié d'une pile . . . . .                                | 7  |
| 2 Schéma de fonctionnement simplifié d'une pile à combustible . . . . .                  | 8  |
| 3 Schéma de fonctionnement d'une pile à hydrogène . . . . .                              | 8  |
| 4 Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible microbienne . . . . .                | 9  |
| 5 Schéma avec cotes de notre prototype . . . . .   | 12 |
| 6 Structure des cathodes . . . . .   | 13 |
| 7 Séchage de la première couche avec un pistolet à air chaud . . . . .                   | 14 |
| 8 Aspect des cathodes après séchage de la première couche . . . . .                      | 15 |
| 9 Positions des trous pour fixer les cathodes sur le tuyau . . . . .                     | 16 |
| 10 Fixation d'un anneau sur le tuyau . . . . .   | 17 |
| 11 Anode (fil en acier inoxydable) enroulé autour des renforts . . . . .                 | 19 |
| 12 Circuit de fonctionnement hydraulique de la pile . . . . .                            | 19 |
| 13 Circuit électrique réalisé pour la croissance du biofilm . . . . .                    | 20 |
| 14 Circuit électrique réalisé pour réaliser les courbes de puissance . . . . .           | 20 |
| 15 Alimentation d'une DEL en utilisant la pile réalisée . . . . .                        | 20 |
| 16 Evolution de la puissance fonction de l'intensité à nombre de cathode donné . . . . . | 21 |
| 17 Evolution de la puissance fonction de l'intensité à nombre de cathode donné . . . . . | 22 |
| 18 Puissance débitée en fonction du rapport cathode/anode . . . . .                      | 23 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| 1 Différents problèmes rencontrés et les solutions apportées . . . . .                              | 18 |
| 2 Coûts des différentes pièces du projet . . . . .  | 28 |
| 3 Mesures de puissances réalisées le 15 mai - 9 cathodes . . . . .                                  | 29 |
| 4 Différents relevés de maximum de puissance fonction de la date et du nombre de cathodes . . . . . | 29 |
| 5 Valeurs de puissance maximales pour différents nombres de cathodes branchées . . . . .            | 30 |



# 1 Remerciements

Au terme de cette année de travail, nous souhaitons adresser nos remerciements à tous ceux et celles sans qui ce projet n'aurait pas été possible ou tout du moins pas autant abouti.

Les travaux présentés dans ce livrable ont été réalisés au sein du Laboratoire Ampère, rattaché à l'École Centrale de Lyon. Nous tenons en premier lieu à remercier les membres de ce laboratoire de nous avoir accueillis au sein du laboratoire.

Ce projet d'études a été mené sous la direction de Naoufel Haddour. Nous tenons à lui exprimer notre plus profonde gratitude pour nous avoir encouragé, aidé à rebondir, et nous avoir fait découvrir cette thématique et cet esprit de recherche passionnants. Nous le remercions également pour son investissement remarquable tout au long de notre projet.

Nos remerciements les plus chaleureux vont également à Richard Barthollet pour son implication impressionnante dans le projet, ses idées innovantes, qui nous ont permis d'avancer, et l'excellence de son travail en ce qui concerne toute la réalisation technique de notre prototype. Sur ce dernier point, une pensée particulière pour la clef à molette conçue spécialement à cette occasion (Figure ??).

Nous tenons également à remercier Sébastien Cecillon pour nous avoir formés aux règles de sécurité du laboratoire et permis de manipuler.

Nous ne voulons pas oublier non plus les conseillers en Gestion de projet et en Expression et organisation qui nous ont suivis tout au long de cette année, Laure Flandrin et Baptiste Celle, pour les conseils donnés et les remarques adressées qui nous ont permis de toujours aller de l'avant.

Nous remercions également les membres de l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture de Villeurbanne et en particulier Jean Pierre Canler pour avoir partagé ses connaissances sur le traitement des eaux usées et pour s'être montré ouvert et enthousiaste à l'idée de participer à collaborer avec le laboratoire Ampère.

Enfin, nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance envers le jury Bonus Qualité Projet composé de F. Dalhem, F. Dassenoy, M.A. Galland, J. Penuelas et B. Vilquin pour avoir autorisé un financement partiel de notre demande.



## 2 Introduction

Ce document est relatif à la soutenance finale et concerne Naoufel Haddour (tuteur), Laure Flandrin (conseillère en gestion de projet), Baptiste Celle (conseiller en expression et organisation), le jury de la soutenance du projet ainsi que les élèves formant le groupe de PE 89 et toutes les personnes intéressées par la démarche et les résultats présentés ici.

A l'heure actuelle, notre société cherche à trouver de nouvelles sources d'énergie pour résoudre les enjeux énergétiques liés à sa population. Les bactéries électrophiles sont connues depuis longtemps par les scientifiques mais la production d'électricité grâce à leur capacité reste un sujet de laboratoire. Aujourd'hui, certains laboratoires de recherche dont le laboratoire Ampère sont capables de créer des piles utilisant ces bactéries comme source d'électricité. L'objectif de ce projet d'étude est de réussir à adapter la technologie de pile microbienne développée par le Laboratoire Ampère à un démonstrateur répondant à des conditions précises. Nous avons pour but d'intégrer une pile microbienne à une canalisation semblable à celles présentes dans une station d'épuration. L'enjeu est d'arriver à obtenir une canalisation produisant de l'électricité sans que l'intégration de la pile n'entrave le flux dans la canalisation. Une application à grande échelle sur une station d'épuration permettrait de diminuer la consommation électrique de cette station par la production locale d'une partie de ses besoins. Un autre enjeu possible est d'arriver à alimenter en électricité des sondes en utilisant le milieu dans lequel elles sont plongées plutôt que d'acheminer vers elles l'énergie nécessaire à leur fonctionnement.

Dans ce contexte, ce dossier présente les différents membres de l'équipe, puis s'attarde sur la présentation du contexte de ce projet, ainsi que les objectifs que nous nous sommes fixés. Nous nous intéresserons ensuite au travail réalisé, en insistant en particulier sur l'accomplissement des diverses étapes, la fabrication du prototype, les résultats obtenus et un point sur nos outils de pilotage. Nous en viendrons ensuite pour finir à la mise en place du plan pour la fin de l'exploitation de ce prototype.

## 3 Le groupe PE 89

### 3.1 Les encadrants



Laure Flandrin  
*Conseillère en gestion de projet*



Naoufel HADDOUR  
*Tuteur et commanditaire*



Baptiste Celle  
*Conseiller en expression et organisation*

### 3.2 Les élèves



Joris CHMIELEWSKI  
*Communication*



Damien DOUTEAUX  
*Secrétaire*



Bénédicte LENGLET  
*Gestionnaire*



Benjamin MANIER  
*Conduite de réunion*



Laurène SEGUIN  
*Documentation*



## 4 Contexte et objectifs

### 4.1 Motivation du sujet

Le projet d'études 89 concerne la fabrication et l'intégration d'une pile à combustible microbienne dans une canalisation d'eaux usées. L'objectif est donc de produire de l'énergie à partir de bactéries. Dans ce cadre, nous inscrivons donc notre projet dans une perspective de développement durable, c'est ainsi que nous avons choisi de le nommer Quand recycler rime avec électricité, comme pour signifier que la production d'énergie est disponible tout autour de nous. S'il est vrai que le résultat attendu est plutôt modeste (voir la section suivante), c'est également un état d'esprit qui motive ce sujet : exploiter de nouvelles ressources d'énergie.

Toute notre étude porte donc sur l'adaptation de ce type de pile dans une canalisation. Matériaux, design, forme ont été autant d'arbitrages à prendre en compte.

Nous menons ce projet en parallèle avec les activités du laboratoire Ampère, et sous la conduite de notre tuteur Naoufel Haddour. Par ailleurs, nous avons pris contact avec un centre de recherche lié à une station d'épuration, celle gérée par l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) à la Feyssine (Villeurbanne). Nous avons prévu de rendre compte de l'aboutissement de notre projet en échange de boues utiles pour nos expérimentations.

Nous nous sommes également investis en nous inscrivant à la Fête de la Science 2014 afin d'exposer notre prototype.

### 4.2 Objectifs fixés

Actuellement, ce type de pile microbienne est à l'état de prototype dans plusieurs laboratoires, permettant pour les plus efficaces d'entre eux d'obtenir une tension délivrée de 0,8V.

Nous nous sommes fixés pour objectif d'alimenter une diode, tout en gardant une pile fonctionnelle et facilement réparable. Un exemple d'utilisation de cette pile est d'alimenter les capteurs d'une station d'épuration. Actuellement, de tels capteurs marchent avec des batteries, le remplacement de celles-ci nécessitant l'arrêt de la station et un coût financier certain. L'utilisation d'une alimentation par cette pile, en plus d'économiser une batterie, permettrait de contourner ces écueils, d'où l'intérêt pour ce type d'installations (ou entreprises) rejetant des eaux usées.

Un intérêt tout particulier a du également être porté au prix des différents constituants de cette pile qui nécessite des produits chimiques spécifiques aux prix conséquents.

Grâce à ces objectifs et des discussions avec notre tuteur et les techniciens du laboratoire, nous avons pu établir le cahier des charges présenté en Annexe A.

## 5 Qu'est-ce qu'une pile à combustible microbienne ?

### 5.1 Qu'est-ce qu'une pile ?

Avant d'aborder la notion de pile à combustible microbienne, appréhendons tout d'abord la notion de pile. Une pile est un dispositif dans lequel a lieu une réaction dite d'oxydo-réduction qui permet de générer un courant électrique. Ainsi, une pile convertit une énergie chimique en une énergie électrique.

Au niveau de la réalisation pratique d'une pile, on trouve différentes architectures, ayant quasiment toutes en commun la présence d'électrodes appelées anodes et cathodes. Une électrode est un conducteur d'électrons (elle permet donc de faire passer un courant) qui est le siège d'une réaction d'oxydation ou de réduction dans le cas d'une pile. Dans le cas d'une pile, nous avons donc pour les deux électrodes :

- ▷ L'anode est l'électrode où les électrons ( $e^-$ ) dont le flux forme le courant électrique sont produits. On parle ici de réaction d'oxydation.
- ▷ La cathode est l'électrode où les électrons sont consommés. On parle ici de réaction de réduction.

A titre d'exemple, le fonctionnement d'une pile est illustré sur la Figure 1, on peut en particulier y observer le chemin des électrons et le rôle des différentes électrodes.

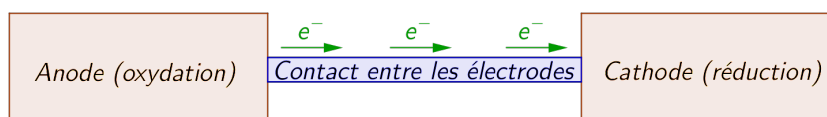


FIGURE 1 – Schéma de fonctionnement simplifié d'une pile

### 5.2 Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?

**Les piles à combustibles** Si les piles traditionnelles présentées dans la section précédente se révèlent très efficaces, elles souffrent de leur durée de vie. En effet, une fois que les réactifs employés pour la réaction viennent à manquer, la pile devient inutilisable. L'originalité des piles à combustible est donc de proposer « un système où l'énergie chimique d'un composé – stocké de façon indépendante et renouvelable – est convertie directement en énergie électrique. Ce composé, ou combustible, ne fait pas partie du système. » [1] Il en résulte donc que la pile à combustible pourra produire de l'électricité de manière « illimitée » à condition de rester approvisionnée en réactifs. La pile fonctionnera donc en continu tant que l'approvisionnement en réactif est continu, et l'évacuation des produits se fera elle aussi en continu. Un moyen commode de visualiser le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est représenté Figure 2.

**Les piles à hydrogène** Un cas particulier de pile à combustible qui va nous intéresser est la pile à hydrogène. La réaction d'oxydoréduction fait ici intervenir un couple d'oxydant et de réducteur qui est le couple hydrogène/oxygène (on peut également trouver le couple méthane/oxygène, mais il ne nous intéressera pas ici). Dans le cas de ces piles, nous pouvons préciser quels réactifs sont utilisés au niveau de quelles électrodes :

- ▷ L'anode : la production d'électrons se fait à partir de molécule de dihydrogène  $H_2$  qui vont se « décomposer » en électrons ( $e^-$ ) et protons ( $H^+$ ). Les électrons vont ensuite passer dans



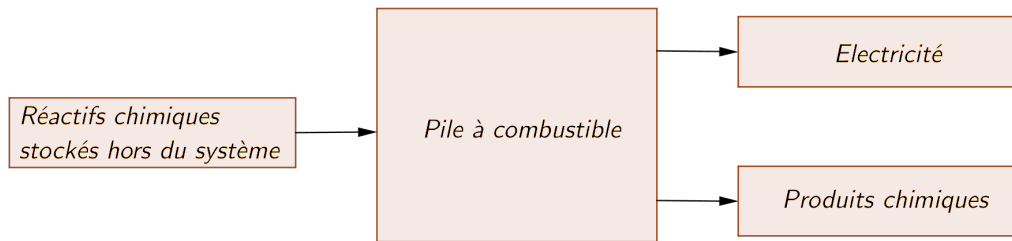


FIGURE 2 – Schéma de fonctionnement simplifié d'une pile à combustible

le circuit électrique, tandis que les protons vont se diriger vers la cathode en passant par l'électrolyte (partie assurant le contact entre les deux électrodes).

- ▷ La cathode : la consommation des électrons provenant de l'anode se fait via une réaction entre le dioxygène ( $O_2$ ), les électrons ( $e^-$ ) et les protons ( $H^+$ ). Cette réaction possède comme seul produit de l'eau ( $H_2O$ ), ce qui est une propriété remarquable des piles à hydrogène.

Comme nous l'avons précisé, le contact entre les deux électrodes est assuré par l'électrolyte, qui permet également le passage des protons  $H^+$ , tandis que les électrons vont quant à eux circuler dans le circuit électrique. L'électrolyte possède une autre fonction importante, dans la mesure où il évite que l'oxygène diffuse jusqu'à l'anode et réciproquement que l'hydrogène ne diffuse pas vers la cathode. Cette partie de la pile joue donc un rôle clé, puisqu'elle empêche les réactifs de rentrer en contact entre eux, ce qui court-circuiterait la pile.

Tous les points de fonctionnement qui viennent d'être abordés sont visualisables sur la Figure 3.

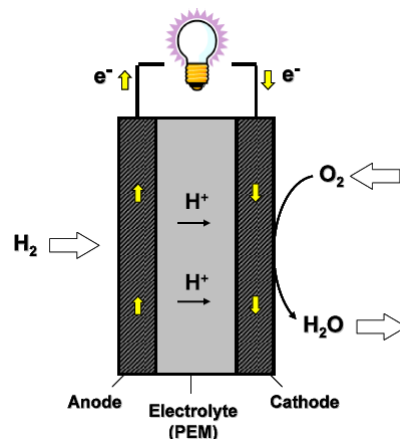


FIGURE 3 – Schéma de fonctionnement d'une pile à hydrogène

### 5.3 Quelles sont les particularités des piles à combustibles microbiennes ?

Les piles à combustibles à microbiennes ou MFC (*Microbial Fuel Cell*) sont construites sur le modèle des piles à hydrogène. Une architecture possible de fonctionnement d'une MFC est représentée sur la Figure 4. Nous allons détailler les différences avec une pile à combustible usuelle :

- ▷ La cathode (où électrons et protons sont utilisés pour consommer le dioxygène), ne subit pas de grande modification. Le seul point remarquable ici est le matériau qui est utilisé. Dans le cas de notre pile, il s'agit d'un tissu de carbone sur lequel a été réalisé un traitement chimique.

- ▷ L'anode où les électrons vont être émis subit quant à elle plus de modifications. En effet, on peut observer qu'il n'y a plus de dihydrogène en entrée, mais des boues (eaux usées issues du traitement des eaux). C'est donc au niveau de l'anode que se trouve la grande originalité des MFC, dans la mesure où le réactif utilisé n'est plus chimique mais biologique ! C'est en effet sur cette anode que vont se développer les films bactériens (principalement des bactéries de type *geobacter* dans notre cas), qui vont consommer des nutriments présents dans les boues, et en échange libérer électrons et protons.

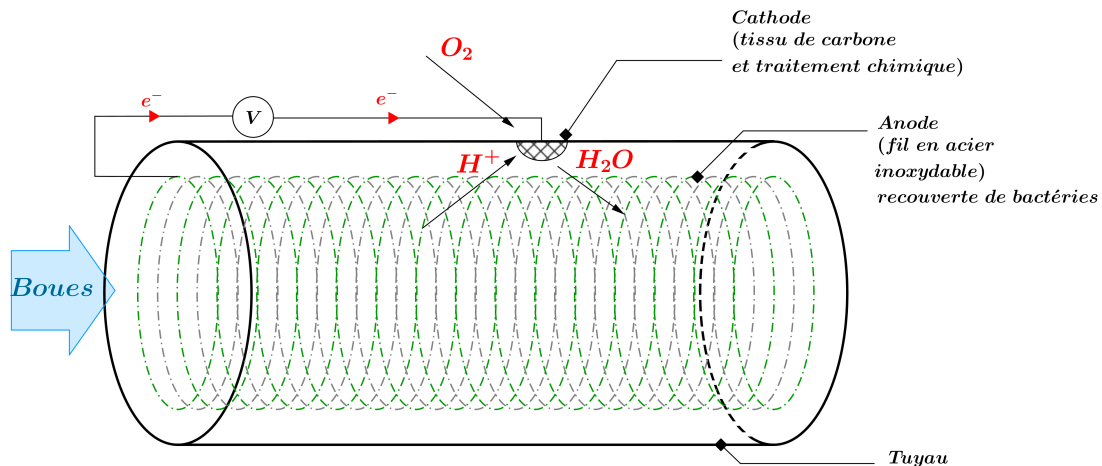


FIGURE 4 – Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible microbienne

On peut remarquer ici l'importance de rejeter les boues en sortie de la pile : les bactéries vont consommer les nutriments des boues, et la réaction va produire de l'eau. Il est donc important de renouveler les boues présente dans la pile pour que les bactéries aient toujours de quoi se nourrir. Dans une certaine mesure, ces consommation de nutriments dans les boues permettent d'en améliorer la qualité en sortie.

## 5.4 Grandeurs obtenues en laboratoire pour les MFC

## 6 Conception du prototype et planification du travail

### 6.1 Diagramme GANTT

A partir du cahier des charges précédemment proposé, nous avons pu élaborer un diagramme GANTT présenté Annexe B sur lequel nous nous sommes reportés tout au long de ce projet pour notre organisation. Il a surtout été très utile pour anticiper les tâches et ne pas prendre de retard qui aurait pu s'accumuler. A noter que ce diagramme a été modifié de temps à autre, dans la mesure où nous avons du reculer dans le temps plusieurs fois des tâches liées aux commandes. Cependant, le plus grand écart noté entre notre état d'avancement et où nous avions prévu d'être à ce moment et ce d'après le GANTT n'a pas dépassé deux semaines.

*Dans la suite de cette section, nous reprenons l'ensemble des tâches présentées dans le diagramme GANTT de l'Annexe B.*

### 6.2 Recherche et assimilation

*Toutes les tâches associées à la recherche documentaire et à la rédaction du cahier des charges ont pu être menées dans les temps. Les résultats ont été ceux escomptés, avec en particulier la découverte d'un article fort intéressant qui nous a servi de base pour nos recherches sur les différents composants de la pile.*

**Etat de l'art** Découverte du sujet et des réalisations d'autres laboratoires sur le sujet. Ces recherches nous ont conduits à décomposer notre pile en cinq composantes principales.

**Recherche sur les cinq composantes** Suite au découpage effectué lors de la tâche précédente, nous nous sommes chacun acquittés de la recherche concernant une des composantes. Cela nous a ainsi permis de cerner au mieux les différentes caractéristiques et contraintes de notre pile.

**Cahier des charges** Suite à ces recherches, nous avons pu rédiger notre cahier des charges présenté précédemment en pleine connaissance des difficultés qui risquaient de se présenter à nous.

### 6.3 Réunions administratives

*Les tâches menées pour les activités de réunion ont elles aussi été menées dans les temps. Elles ont été l'occasion pour notre groupe de présenter ses résultats et de travailler son expression et sa communication auprès d'un public connaisseur ou non.*

**RVP1 (préparation et évaluation)** Pour ce premier rendez-vous de pilotage, nous avons réalisé un livrable résumant nos premières approches sur le sujet. Un des points les plus importants a été la rédaction des outils de pilotage pour gérer la suite de notre projet. Cette réunion a été l'occasion pour le groupe de présenter pour la première fois son sujet à des personnes ne travaillant pas au laboratoire (différents conseillers). Une vulgarisation du sujet a donc été nécessaire afin de se mettre à la portée de tous, effort qu'il a fallu poursuivre et améliorer ensuite.

A l'issue de cette première organisation de réunion, les retours sur la conduite de celle-ci et le feu vert nous ont permis de poursuivre notre projet en tenant compte des remarques et conseils.

**Bonus Qualité Projet** L'établissement du budget nous a conduits à déposer une demande de budget supplémentaire afin de pouvoir commander les différents produits nécessaires à la réalisation de la pile. Si le laboratoire fournissait une partie du matériel (conduit en plastique, et autres pièces non techniques), nous avons pris à notre charge les composants plus spécifiques de la pile. Auparavant, une recherche sur les solutions qui s'offraient à nous (comme récupérer plutôt qu'acheter un tuyau en plastique) et un arbitrage précis sur les choix de matériaux ont été menés avec l'aide de notre tuteur et d'un technicien. En définitive, la commission du BQP nous a accordé une hausse de budget de 350 euros, avec nécessité de faire figurer sur notre démonstrateur le logo de l'Ecole Centrale de Lyon.

**RVP2 (préparation et évaluation)** Pour ce second rendez-vous de pilotage, nous avons réalisé un livrable résumant notre état d'avancement et nos objectifs ultérieurs. Un des points les plus importants a été la reformulation des aspects les plus scientifiques pour contenter tout niveau de connaissances dans ce domaine. C'est pourquoi nous nous sommes efforcés de vulgariser nos propos afin que le fonctionnement de la pile et nos démarches soient des plus accessibles possibles. Une entrée dans le vif du sujet a pu être réalisée en exposant lors de la réunion le prototype d'à peine une semaine et en explicitant sa fabrication.

**IRSTEA** si a eu lieu

## 6.4 Conception du prototype

*Les tâches de conception ont été l'occasion de mettre en pratique toutes les connaissances acquises lors de nos recherches précédentes. Elles ont également été l'occasion de faire face à certaines difficultés de réalisation sur des questions que nous n'avions pas appréhendées, comme des problèmes de rigidité du fil. Pour plus de détails sur les problèmes rencontrés, vous pouvez vous reporter à la section Problèmes rencontrés. Quoiqu'il en soit, ces tâches ont été menées à bien avec une semaine de décalage sur le planning initial, ce qui est un bon résultat étant donné les problèmes de délai que nous avons eu avec les commandes.*

**Dessin du prototype** Suite aux recherches faites sur notre pile, nous avons pu débiter la phase de conception par le dessin d'un prototype. C'est ici que nous avons dû gérer toutes les difficultés liées à nos matériaux et de trouver des solutions pour rendre notre pile résistante et à la fois fonctionnelle. Nous avons également dû trouver une forme de pile permettant une intégration aisée dans des canalisations, d'où cette forme en tube. Nous avons en définitive abouti aux schémas présentés Figure 5.

On peut observer sur la Figure 5 d'une part la position des cathodes (en haut) et d'autre part la présence de renforts permettant d'éviter que le fil utilisé (qui est assez rigide) ne reprenne sa place (en bas). Le croisillon présent au milieu ayant pour objectif de rigidifier les quatre barres transversales.

**Arbitrage des coûts** Comme nous l'avons évoqué lors de la tâche concernant le BQP, la réalisation de notre pile nécessite des composants aux prix non négligeables. Nous avons donc dû trouver les meilleurs rapports qualité (pour notre pile) et prix.

Ainsi, il nous a fallu jouer sur deux tableaux : un respect des proportions anode/cathode pour avoir un rendement maximal, et un choix parmi des matériaux coûteux :

- ▷ Anode : notre choix s'est tourné vers l'acier inoxydable enrichi au molybdène, qui présente une excellente durée de vie, et une résistance adéquate au milieu utilisé. C'est sur ce fil que sera développé le film bactérien moteur du fonctionnement de la pile.

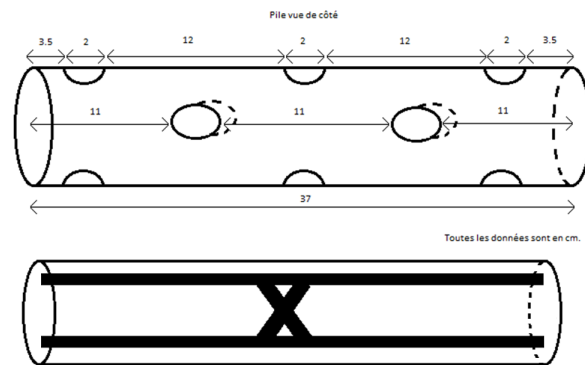


FIGURE 5 – Schéma avec cotes de notre prototype

- ▷ Cathode : nous avons opté pour du tissu de carbone avec traitement chimique et non du graphite. C'est cette pièce qui s'avère être la plus coûteuse, puisque nous utilisons des mélanges carbone/platine et un composant chimique (le Nafion) dont les coûts sont non négligeables, voir l'Annexe C.
- ▷ La structure de la pile : nous avons opté pour des cathodes percées à même le tuyau, et non des cheminées, afin de rapprocher au maximum anode et cathode. A noter l'usage d'un tuyau transparent, qui est un peu plus coûteux qu'un tuyau opaque, mais plus attractif en vue d'une présentation pour les Journées de la Fête de la Science.

Pour le fonctionnement de la pile, nous utiliserons une pompe fournie par le laboratoire Ampère, afin de reproduire les conditions en station d'épuration.

**Etablissement du budget** Nous avons cherché à comparer les offres des différents fournisseurs, et regardé si des réductions de coûts étaient possibles. Nous avons alors divisé les prix entre le laboratoire et nos fonds pour réussir à tenir notre budget. Cependant, nous avons dû demander des fonds supplémentaires, d'où notre demande de BQP.

Un tableau des coûts dressé à partir des factures est présenté en Annexe C, dans la Table 2.

**Préparation des commandes** Suite à l'acceptation de notre augmentation de budget, nous avons pu passer nos commandes juste avant les vacances de mars, et ainsi les réceptionner dès la rentrée pour passer aux tâches suivantes.

## 7 Confection de la pile

Cette section a pour but de vous présenter les différentes étapes de fabrication de notre pile. Ces étapes constituent une des parties les plus importantes de ce projet dans la mesure où elles vont nous permettre d'aboutir au prototype final. Nous verrons cette confection d'une manière linéaire, en débutant avec la fabrication des cathodes, puis en abordant la question de l'usinage des pièces du tube, pour enfin expliquer par quelles méthodes nous avons intégré l'anode et les cathodes sur notre tuyau.

### 7.1 Fabrication des cathodes

#### 7.1.1 Structure des cathodes utilisées

Les cathodes utilisées ont la structure présentée en Figure 6.

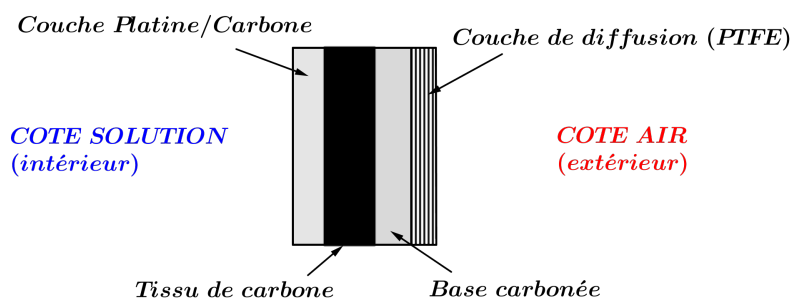


FIGURE 6 – Structure des cathodes

Nous pouvons observer sur la Figure 6 que nos cathodes sont constituées de différentes couches ayant chacune leur utilité spécifique :

- ▷ Le tissu de carbone : il s'agit de la base des cathodes, c'est-à-dire du matériau sur lequel seront déposées les autres couches. Ce tissu a été acheté, cependant les différentes autres couches sont déposées manuellement dessus.
- ▷ La couche platine/carbone : cette couche sert à augmenter la surface de contact (surface spécifique) entre les différents réactifs. L'intérêt d'augmenter cette surface spécifique est de permettre à la réaction d'avoir lieu de manière optimale, avec une rapidité et un rendement satisfaisants.
- ▷ La base carbonée : elle sert de support qui permet de déposer la couche de PTFE, autrement cette dernière n'adhérerait pas.
- ▷ La couche de diffusion en PTFE : cette couche assure la diffusion de l'oxygène et des ions  $H^+$  les uns vers les autres. A noter que cette couche est en fait composée de quatre couches successives et identiques de PTFE.

Cette structure a été proposée par Poshua Middaugh en juin 2006 et remise à jour par Shaoan Cheng et Wenzong Liu en mai 2008 [2]. La version qui vient de vous être présentée est celle de mai 2008.

#### 7.1.2 Protocole de fabrication des cathodes

Après cette présentation de nos cathodes, nous allons aborder la question des protocoles à utiliser. Le détail du protocole de fabrication des cathodes est présenté dans l'annexe XXX. Nous allons dans cette section nous attarder sur les particularités qu'il présente :

- ▷ Nécessité d'utiliser une hotte en raison des produits manipulés (poudre de carbone/platine, PTFE, Nafion®)

- ▷ Pour chauffer nos cathodes à la température voulue, il nous faut également utiliser des fours spécifiques capable de monter à ces températures ( $370^{\circ}\text{C}$ ).
- ▷ Les temps de repos sont assez nombreux, et rendent le protocole long à réaliser. On peut notamment observer dans l'annexe XXX que pour appliquer les quatre couches de PTFE, il faut attendre 5/10 minutes pour que le PTFE sèche, puis laisser au four pendant 10/15 minutes et ce répété quatre fois. De même, la dernière couche (carbone/platine) doit sécher pendant une journée.

Ces différentes caractéristiques font que nous n'avons pas réalisé ce protocole lors des créneaux réservés, notre objectif ayant été d'avoir nos cathodes prêtes pour un créneau balisé du mercredi après-midi. Par conséquent, nous avons mis en œuvre ce protocole un mardi soir, le temps de fabrication ayant été d'environ 3h30.

### 7.1.3 Réalisation des cathodes

*Nous allons vous présenter quelques photos illustrant la fabrication des cathodes, en vous mettant en évidence les étapes clés. Les différentes étapes évoquées coïncident avec celles proposées dans l'annexe XXX où le protocoles sont précisés.*

**Application de la couche de carbone** Après découpe du tissu de carbone, nous avons appliqué un mélange à base de poudre de carbone et de PTFE sur chaque pièce de tissu. Un temps de séchage de 2h était préconisé, cependant nous l'avons écourté en utilisant un pistolet à air chaud pour accélérer le processus, en raison du temps qui nous était imparti. Cette méthode ne provoque normalement pas de différence sur le résultat final, elle était de plus proposée dans les protocoles que nous avons utilisés. La période de séchage avec le pistolet est visible sur la Figure 7. Nous pouvons également voir sur la Figure 8 les cathodes (carrés de tissu de carbone) ainsi que le tube contenant la solution que nous avons appliqué dessus.

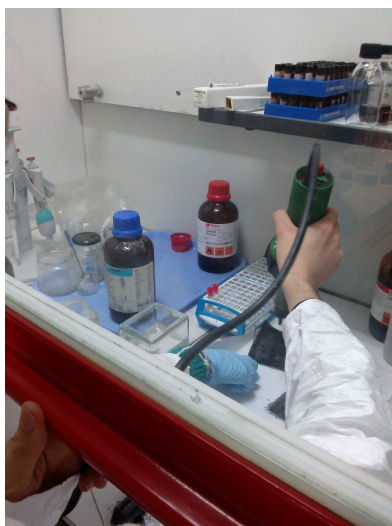


FIGURE 7 – Séchage de la première couche avec un pistolet à air chaud

La dernière étape pour finir cette couche consistait alors à placer nos cathodes dans un four à  $370^{\circ}\text{C}$  pendant 20 à 30 minutes avant de laisser refroidir.

*Durant toute cette étape, nous n'avons rien remarqué d'anormal en ce qui concernait les cathodes, cette étape semble donc s'être déroulée sans accroc.*



FIGURE 8 – Aspect des cathodes après séchage de la première couche

**Application de la couche de diffusion en PTFE** Cette étape était la plus longue du point de vue de la manipulation étant donné les temps de chauffage et de séchage. Pour optimiser notre temps, nous avons travaillé avec deux fours simultanément afin de diviser le temps de fabrication. Dans ce qui suit, nous ne décrirons qu'une seule fois le mécanisme, ce dernier ayant juste été répété le nombre de fois nécessaire à l'identique (quatre fois pour chaque cathode).

Nous commençons par appliquer avec un pinceau sur nos cathodes la suspension de PTFE à 60%. Il faut faire en sorte que l'application de cette couche soit la plus homogène possible, afin que cette couche de diffusion ait les mêmes propriétés de diffusion en chacun de ces points (ou tout du moins qu'il n'y ait pas de trop grandes différences).

Après avoir étalé cette couche, nous la laissons sécher une dizaine de minutes. À noter que le PTFE vire en un léger blanc laiteux lorsqu'il est sec, ce qui nous permet de déterminer visuellement à quel moment ce dernier est sec. Une fois cette couleur atteinte, nous plaçons la cathode dans le même four que précédemment (370°C), pendant un quart d'heure. Après ce passage au four, nous retirons la plaque du four et la laissons sécher. Le PTFE doit alors revêtir un aspect noir brillant. Nous pouvons alors recommencer à l'étape d'application du PTFE.

*À noter que cette étape ne s'est pas exactement déroulée comme nous l'aurions désiré. En effet, les premières couches de PTFE ont un petit peu traversé le tissu de carbone, du fait que les mailles de ce dernier n'étaient pas assez resserrées. Cependant, une fois la troisième couche appliquée, les précédentes avaient imperméabilisé la face de tissu qui nous intéressait. De plus, on peut remarquer sur la Figure ?? que les cathodes se sont enroulées sur elles-mêmes au fur et à mesure des différentes étapes de chauffage. Il s'agit de l'étape qui nous a le plus inquiété en vue du fonctionnement de la pile.*

**Application de la couche de carbone/platine** Cette étape fut relativement rapide à réaliser. Nous avons dans un premier temps préparé la solution à déposer sur l'autre face des cathodes. Pour obtenir une solution la plus homogène possible, nous avons vortexer (mélanger très rapidement) les différents éléments dans un tube en utilisant des billes de verre, comme illustré avec la Figure ???. Nous avons ensuite procédé comme pour la couche de PTFE en déposant notre couche au pinceau sur la face appropriée de nos cathodes. Cependant, les produits manipulés pouvant être dangereux, toutes les manipulations hormis le vortexage ont été réalisées sous hotte. Après avoir appliqué notre couche, nous avons laissé sécher nos cathodes à l'air libre (sous hotte) pendant une journée.

**Mise en forme des cathodes** En accord avec les gabarits des emplacements que nous avons laissés pour les cathodes sur notre tube, il nous faut alors découper des pièces de cathodes dans nos





## 7.3 Mise en place des éléments sur le tuyau

### 7.3.1 Mise en place des cathodes

Les cathodes sont fixées à l'aide d'anneaux dans lesquels ont été pratiqués deux trous aux emplacements des deux cathodes se faisant face. L'idée est alors de fixer les cathodes préalablement découpées sur ces anneaux à l'aide de silicone. Une fois les cathodes fixées sur les anneaux, ces derniers sont collés au tuyau à l'aide de silicone, en prenant soin de placer les cathodes en face des trous des tuyaux pour que ces dernières puissent être en contact avec les eaux usées plus tard. Ces deux étapes de fixation sont représentées sur les figures ?? et 10.

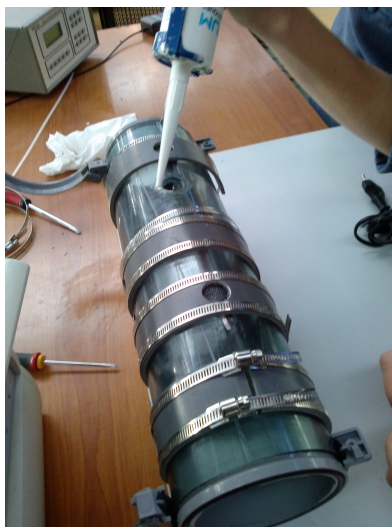


FIGURE 10 – Fixation d'un anneau sur le tuyau

### 7.3.2 Mise en place de l'anode

Une fois les cathodes fixées, l'anode est enroulée autour des quatre tringles liées par les croisillons. Pour que le fil d'acier inoxydable reste à sa place, en plus de sa rigidité naturelle deux petits trous sont prévus afin de le coincer à chaque extrémité de l'ensemble. Après enroulement des 20m de fil (figure 11), ce dernier est placé dans le tuyau qui est alors scellé en y ajoutant les bouchons que l'on silicone au tout. A ce stade, le réacteur est prêt.

### 7.3.3 Résultats pratiques importants pour la suite

Comme nous l'avons vu, nous avons abouti à l'élaboration d'un prototype incluant l'architecture et les dimensionnements que nous avons établi. Cependant, certains problèmes se sont posés à nous et ont pu influencer sur les résultats finaux de notre projet. La Table 1 dresse un inventaire des différents problèmes rencontrés et de leurs incidences sur le projet.

## 7.4 Réalisation du circuit de fonctionnement de la pile

### 7.4.1 Circuit hydraulique de fonctionnement

Le principe premier de fonctionnement de cette pile est l'utilisation de nutriments présents dans les eaux usées pour stimuler la production d'électrons présente chez certaines bactéries. Il nous faut donc assurer le meilleur débit possible au sein de la pile. Ainsi, le circuit de fonctionnement hydraulique

| Etape        | Problèmes rencontrés   | Solutions  |
|--------------|--|--|
| Budget       | Coûts des matériaux pour réaliser la pile par rapport au budget qui nous est alloué  | Les solutions envisagées touchent divers niveaux : <ul style="list-style-type: none"><li>▷ Avec le laboratoire (mise à disposition de pompes, de produits chimiques et de tuyauterie).</li><li>▷ Avec l'IRSTEA qui nous fournit les eaux usées pour les test.</li><li>▷ Avec le BQP qui nous a alloué un supplément de 350€ sur le budget initial.</li></ul> |
| Commandes    | Problème de timing, avec une impossibilité de commander aussi tôt qu'on l'aurait désiré. Puis dans un deuxième temps les démarches pour l'obtention du BQP qui ont entraîné un retard de deux mois pour les commandes. | Changement dans le GANTT, où certaines tâches ont été avancées, et l'étude des protocoles réalisées plus tôt que prévue.   |
| Architecture | Insertion de la pile dans une canalisation d'eaux usées  | Adoption d'une forme cylindrique. Détermination d'une disposition des éléments de la pile à l'intérieur de façon à ne pas perturber le débit, éviter les dépôts, éviter les contacts anode-cathode.  |
| Architecture | Rigidité du fil en acier inoxydable, qui risque de rendre sa répartition inhomogène dans la pile   | On ajoute des renforts tout le long de la pile pour le restreindre dans une zone donnée sous forme de barres transversales. On adjoint également un renfort au milieu pour consolider et rendre solidaires les quatre barres transversales.  |
| Architecture | Optimisation des rapports cathode/anode, sur lesquels reposent la qualité du courant débité.   | Il nous a fallu choisir le nombre de cathodes au nombre de dix, de diamètre 2 cm et disposées en quinconce pour optimiser l'espace qu'elles couvrent. Ces solutions sont visibles Figure XXX. A noter que l'on a également la possibilité de débrancher une cathode indépendamment des autres.   |

TABLE 1 – Différents problèmes rencontrés et les solutions apportées



FIGURE 11 – Anode (fil en acier inoxydable) enroulé autour des renforts

FIGURE 12 – Circuit de fonctionnement hydraulique de la pile

de la pile contient une pompe pour assurer le débit, et un réservoir avec lequel vont se faire les échanges, ce réservoir jouant le rôle de château d'eau ici. Ce circuit est représenté sur la figure 12. Nous pouvons également remarquer la présence de trois éléments supplémentaires sur le circuit :

- ▷ Un point de purge du système : ce point de purge a pour objectif de permettre de renouveler les eaux usées passant dans le système sans avoir à déboucher des tuyaux de manière brutale, ce qui entraînerait des fuites.
- ▷ Un robinet pour aider au remplissage : en raison de la configuration du circuit, si nous n'aidons pas le réacteur, ce dernier ne se remplit qu'aux deux tiers. L'intérêt de ce robinet est donc de forcer la montée des eaux dans le tuyau avant mise en fonctionnement continu du système.
- ▷ Une sortie d'air pour mesurer le développement du film bactérien : cette sortie sert à mesurer la quantité d'hydrogène rejetée par le système (qui est totalement fermé mis à part cet élément). Cela peut ainsi nous permettre de déduire la quantité de film bactérien développé entre deux temps donnés en mesurant une variation de volume sur une jauge présente à côté du système (pour plus de détails concernant cet élément, se référer à la section XXX).

#### 7.4.2 Circuit électrique de fonctionnement

La pile possède en fait plusieurs circuits électriques assurant son bon fonctionnement. Ce sont ces deux circuits qui vous seront présentés ci-après.

**Circuit électrique de poussée du film** Pour assurer que le film grandisse dans des conditions optimales au rapport de l'utilisation future de la pile, il nous faut interposer entre ces deux électrodes une résistance. Une valeur communément prise est  $1k\Omega$ , il s'agit de celle retenue ici. En plus de cette résistance, l'utilisation d'un voltmètre s'avère utile afin de mesurer l'évolution de la tension au cours du développement du film bactérien. Le système total est représenté Figure 13.

**Circuit électrique de fonctionnement de la pile** Une fois le film établi (ce qui se traduit par une stagnation de la valeur de la tension débitée par la pile), le circuit électrique subit deux séries de changement ayant toutes les deux leur utilité spécifique :

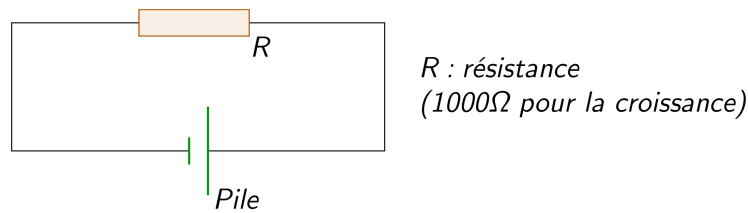


FIGURE 13 – Circuit électrique réalisé pour la croissance du biofilm

- ▷ Une première version permet d'établir les courbes de puissance, et d'étudier le nombre de cathodes optimal. Pour cela, nous reprenons le montage précédent, à la différence que la résistance est désormais variable afin de permettre de se déplacer au long de la courbe de puissance fonction de l'intensité. Ce circuit est représenté Figure 14.

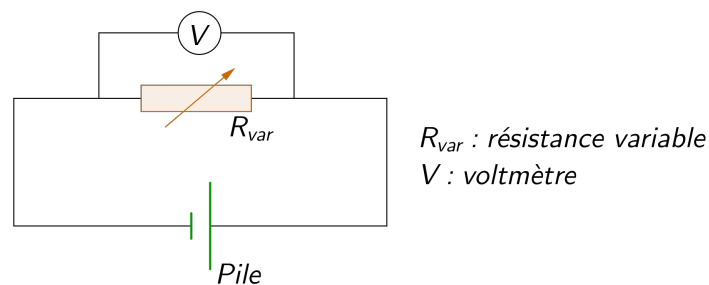


FIGURE 14 – Circuit électrique réalisé pour réaliser les courbes de puissance

- ▷ Cette deuxième version est celle d'un fonctionnement « pratique » de cette pile, dans la mesure où il permet de visualiser la tension créée par la pile en allumant une DEL. Cependant, les puissances délivrées par cette pile ne sont pas suffisantes pour allumer une DEL en continu, d'où la présence d'un condensateur dans ce circuit pour accumuler la puissance nécessaire et allumer la DEL par « à-coups ». Ce circuit est représenté Figure 15.

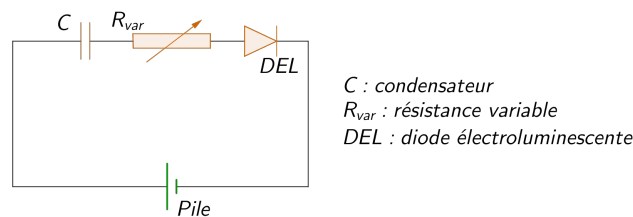


FIGURE 15 – Alimentation d'une DEL en utilisant la pile réalisée

## 8 Tests de la pile et de ses composants

### 8.1 Evaluation des qualités des cathodes et étanchéité

*Pas encore rédigé. Sont prévus pour cette partie : la résistance des cathodes, leur étanchéité, et l'étanchéité de la pile terminée.*

### 8.2 Valeurs électriques remarquables de nos composants

#### 8.2.1 Recherche du maximum de puissance

**Protocole expérimental** Afin de caractériser les performances de notre pile et grâce au matériel à disposition (2 multimètres et une résistance variable), nous avons réalisé des courbes de puissance en faisant varier la tension et l'intensité. Nous avons pour cela utilisé une résistance variable permettant de balayer une gamme de résistances allant de  $10\Omega$  à  $10000\Omega$ . En outre, nous avons tracé ces courbes pour différents nombres (7 et 9) de cathodes branchées entre elles et reliées au circuit pour pouvoir les comparer. Deux tracés de puissance ont été effectués avec neuf cathodes, le premier le 15 mai après avoir ajouté 8g d'acétate la veille et après que la première pompe se soit arrêtée (cf problèmes rencontrés) et le second le 20 mai avec une pompe plus puissante (pompe de machine à laver) Il est important de noter que pas d'acétate na été rajouté entre temps. Deux autres tracés de puissance ont été effectués avec sept cathodes branchées, le premier le 20 mai et le second 24 heures plus tard. Cest donc la même pompe qui a été utilisée et aucun ajout dacétate na été fait.

**Courbes** L'ensemble des valeurs relevées sont répertoriées dans la Table 4 de l'Annexe XXX. La Figure 17 montre un profil d'évolution de la puissance fonction de l'intensité débitée par la pile, et ce à nombre de cathodes constant. Des commentaires sur cette courbe sont proposés au paragraphe suivant.

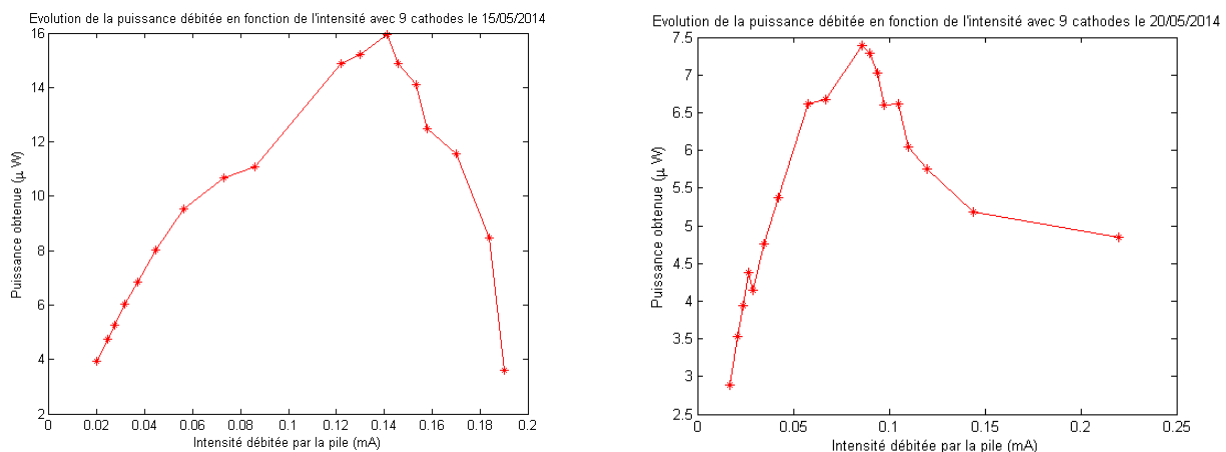


FIGURE 16 – Evolution de la puissance fonction de l'intensité à nombre de cathode donné

**Dépouillement des résultats** Les courbes de puissances ont une allure parabolique que ce soit avec neuf ou sept cathodes.

Avec neuf cathodes le 15 mai, le maximum de puissance se remarque pour une intensité dans le circuit de  $141,3\mu A$  et pour une résistance de  $800\Omega$ . Alors que cinq jours plus tard, le maximum de puissance se situe pour une intensité de  $860\mu A$  et pour une résistance de  $1k\Omega$ . On observe donc en

cela que le dopage des bactéries (via l'ajout d'acétate) permet d'augmenter la production d'énergie puisque dans les heures suivant l'ajout de l'acétate la puissance maximale obtenue est de  $15,96\mu W$  alors que cinq jours plus tard elle est plus faible : la puissance maximale est de  $7,396\mu W$ . Cette diminution de puissance s'explique par le fait que les bactéries ont consommé l'acétate le premier jour et leur métabolisme a plus de difficultés à consommer la matière organique présente dans les boues. Avec sept cathodes, le maximum de puissance s'obtient pour les deux expériences réalisées à

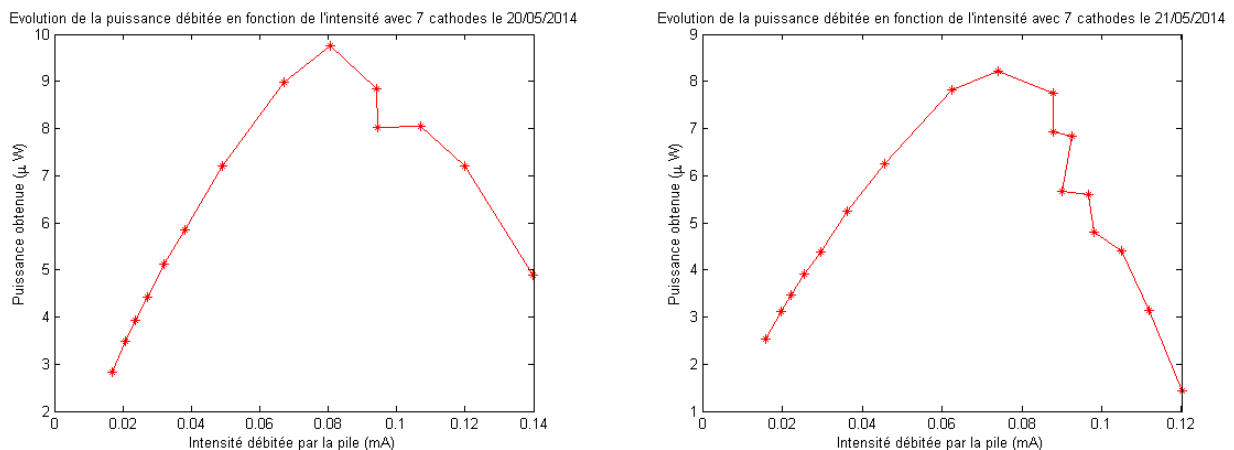


FIGURE 17 – Evolution de la puissance fonction de l'intensité à nombre de cathode donné

une résistance de  $1500\Omega$ . La première expérience indique une puissance maximale de  $9,76\mu W$  pour une intensité de  $80,7\mu A$  alors qu'avec la suivante nous obtenons une puissance de  $8,21\mu W$  pour une intensité de  $74\mu A$ . Cette diminution de puissance peut de la même manière s'expliquer par la consommation de l'acétate.

### 8.2.2 Résistance interne de la pile

Par ailleurs, comme la puissance est maximale lorsque la résistance externe rajoutée est égale à la résistance interne de la pile, la valeur de cette dernière est connue grâce aux expériences.

En réalisant une moyenne sur les deux premiers essais, la résistance interne de notre pile lorsque les 9 cathodes sont branchées peut être estimée à  $900\Omega$  tandis que la résistance interne lorsque 7 cathodes sont branchées est la même sur les deux relevés et vaut  $1500\Omega$ . On observe ainsi, comme attendu, que la résistance interne augmente avec l'augmentation du nombre de cathodes. En effet, chaque réaction cathode-anode est équivalente électriquement à une résistance dans laquelle passe une intensité témoin d'un transfert d'électrons. Le branchement de 9 cathodes entre elles crée donc une résistance équivalente aux 9 résistances mises en parallèle et donc, moins il y a de cathodes branchées au circuit, plus la valeur de la résistance équivalente ou résistance interne augmente.

## 8.3 Rapport surfacique cathode/anode

**Protocole expérimental** Un des objectifs que nous nous sommes fixés est de comparer les performances de la pile pour différents rapports cathode/anode, et d'en déduire un rapport idéal où les surfaces de cathode et d'anode seraient toutes deux limitantes. Pour cela, le prototype a été réalisé de façon à pouvoir décider du nombre de cathodes branchées ce qui permet d'avoir des surfaces de cathode différentes pour une surface d'anode fixée à ..... Pour chaque nombre de cathodes branchées, nous avons fixé la résistance externe de façon à retrouver le maximum de puissance afin de minimiser

l'erreur relative qui peut exister. Nous avons pour cela utilisé une résistance de  $1500\Omega$ . Cette valeur provient des essais avec 7 cathodes. En effet, il semble plus approprié de choisir cette valeur plutôt que la valeur de  $900\Omega$  mise en évidence lors des expériences avec 9 cathodes car d'après nos résultats expérimentaux, la résistance nécessaire pour obtenir un maximum de puissance augmente avec la diminution du nombre de cathodes.

Des courbes de puissance en fonction du rapport surfacique cathode/anode sont donc obtenues.

**Courbes** L'ensemble des valeurs relevées sont répertoriées dans la Table 5 de l'Annexe XXX. A partir de ces données est établie la Figure 18.

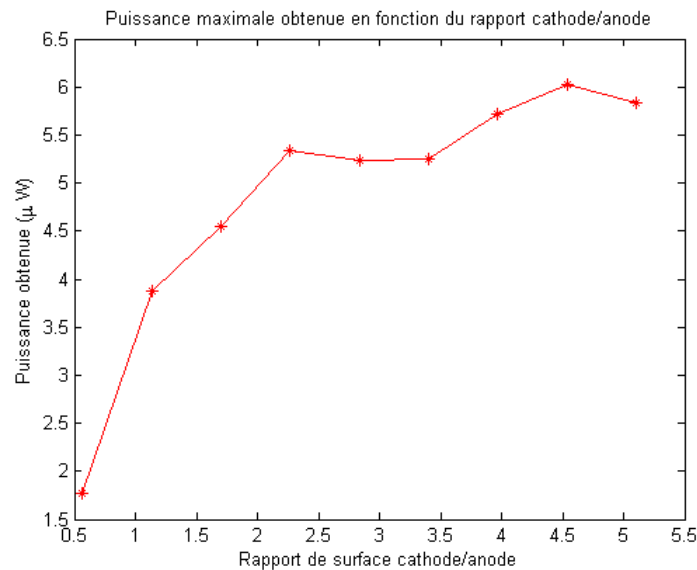


FIGURE 18 – Puissance débitée en fonction du rapport cathode/anode

**Dépouillement des résultats** Sur la courbe un changement de pente est observé pour un rapport de 2,20. Pour un rapport surfacique de 2,2 à 5, les points forment approximativement une droite témoin d'une puissance constante égale à  $5,5\mu W$  et cela s'explique par le fait que nous avons choisi d'établir un prototype avec un nombre de cathodes élevé. L'excès de surface cathodique par rapport à la surface anodique est donc atteignable.

Pour un rapport surfacique de 0,1 à 2,2, une droite de pente de 3 W pour une variation de rapport de 1 est observable. Cette valeur est une approximation en cela que la surface cathodique est très peu précise compte tenu de la fabrication et de l'installation de celles-ci. Néanmoins, le rapport optimal peut être estimé à 2,2, c'est à dire à l'intersection des deux droites de pentes différentes.

Ainsi nous avons réussi à obtenir une puissance maximale de  $15,96\mu W$  dans les premiers jours puis une stabilisation à  $9\mu W$  plus récemment. De plus, la résistance interne minimale de notre pile est de  $900\Omega$ . Nous avons aussi réussi à déterminer un rapport optimal cathode/anode pour notre pile de 2,2.





## 9 Bilan et perspectives

### 9.1 Enseignements tirés du projet

**Travail en mode projet** Grâce à la réalisation de ce projet, nous avons pu développer différentes compétences liées au travail en mode projet. Nous avons appris à travailler en équipe ce qui signifie que nous avons appris à écouter et prendre en compte des avis différents et souvent antagoniques, nous adapter à l'emploi du temps de chacun pour réussir à trouver des créneaux pour nos réunions, mais aussi gérer ces réunions afin qu'elles soient le plus efficaces possible.

**Travail de conception** Nous avons aussi appris à gérer un projet de construction de prototype, de la documentation initiale à la fabrication en passant par les différentes ébauches de la conception du prototype et par la résolution des différents problèmes de fabrication. Nous avons été acteurs de notre projet, nous avons dû prendre des initiatives pour gérer les problèmes au quotidien et respecter les différentes échéances qui nous étaient imposées.

**Optimisation du budget** Ce projet nous a également amenés à être confrontés aux difficultés de la gestion d'un budget, d'autant plus que ce projet nécessite des matériaux parfois chers. Nous avons su gérer les problèmes financiers liés à notre prototype ce qui nous a conduits à effectuer des arbitrages et des délibérations puis, une fois notre projet réadapté, à solliciter un BQP pour finalement être capables de construire notre pile.

**Tenue de réunion** Ce projet nous a également permis de développer nos compétences de présentations orales. Ce au cours des différents rendez-vous de pilotage ainsi que lors de la présentation nécessaire à l'obtention d'un BQP pour finir par la présentation de notre prototype à l'IRSTEA.

**Conclusion** Ainsi, ce projet nous a permis de se rapprocher de la démarche d'une équipe d'ingénieurs qui, face à une problématique technique, doit déployer des compétences de gestion d'équipe et d'un budget, d'outils de conduite de projets, et enfin de présentation. Nous sommes convaincus que ce projet a été l'occasion pour chacun d'apporter ses propres compétences ou qualités dans ces domaines, mais également de s'améliorer/progresser dans ses points faibles.

### 9.2 Perspectives de développements futurs du projet

#### 9.2.1 Participation aux fêtes de la science

En outre, nous avons souhaité élargir notre PE à une manifestation scientifique et publique : la fête de la science édition 2014. En septembre, nous allons présenter notre réacteur à un public varié, non obligatoirement averti sur les enjeux de notre projet.

L'objet de cette manifestation sera de produire un stand comprenant notre démonstrateur ainsi qu'une infographie didactique adaptée à tout type de public, nous assurerons nous-mêmes une permanence au cours de laquelle nous répondrons à toutes les questions de notre auditoire.

#### 9.2.2 Etude de la charge organique en amont et en aval de la pile

#### 9.2.3 Etude de la puissance débitée pour des solutions tests « parfaites »

#### 9.2.4 Test de la pile en milieu réel



## 10 Conclusion

Pour réaliser ce projet, nous avons donc procédé en plusieurs étapes successives ou parallèles et pour cela, nous avons compris l'importance des moyens de gestion de projet (GANTT, PERT) qui nous ont permis de suivre l'évolution de nos activités et d'évaluer les retards éventuels des différentes étapes planifiées. Pour résumer la progression qui fut la nôtre, le premier temps fut donc un état de l'art en ce qui concerne les piles à combustibles microbiennes puis nous nous sommes attelés à la conception d'un prototype capable de s'insérer dans une canalisation. Le choix des matériaux et le dessin de l'architecture furent alors pensés/ étudiés pour obtenir le meilleur rapport qualité-prix. Nous avons ainsi pu passer les commandes, après avoir essayé de réduire/réduit le coût total grâce à des arbitrages sur la conception de la pile et au BQP.

Place fut faite ensuite à la fabrication dans les locaux et avec le soutien du laboratoire Ampère puis une fois cela réussi, nous avons vérifié la fonctionnalité et détecté les caractéristiques de ce prototype grâce aux boues récupérées en accord avec la station d'épuration de Villeurbanne. Une fois ces caractéristiques mesurées, une confrontation vis-à-vis de celles de piles comparables, connues grâce à notre état de l'art a été possible.

Dans le futur, nous envisageons de poursuivre l'expérience de ce Projet d'Etudes en participant tout d'abord à des journées d'exposition de notre prototype fonctionnel dans le cadre des Journées de la Science en septembre et octobre 2014 à Lyon.



## Annexe A - Cahier des charges

*Cette annexe vient compléter la section 3.2 en vous proposant le cahier des charges fixé pour notre PE. Il fut élaboré suite à l'état de l'art réalisé pour ce projet et validé par le tuteur du projet.*

### Fonction principale :

- ▷ Créer de l'énergie tout en étant intégrable dans une canalisation.

### Fonctions complémentaires :

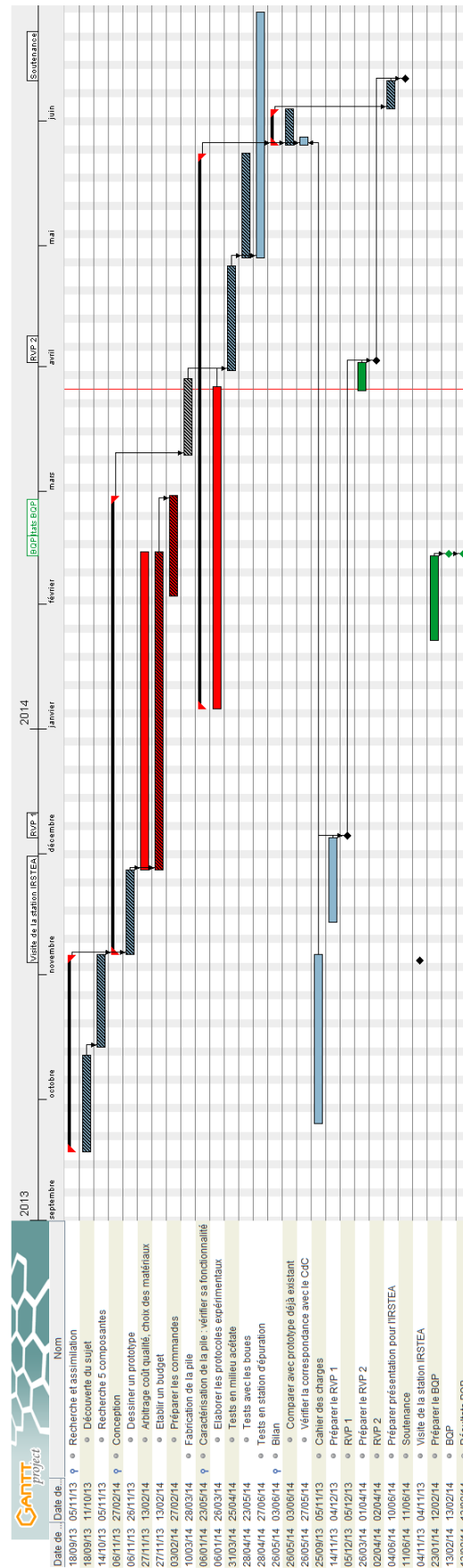
- ▷ Stocker l'énergie électrique créée.
- ▷ Faciliter l'accès pour la maintenance.
- ▷ Faciliter la mise en série et en parallèle des électrodes pour maîtriser la puissance générée.
- ▷ Assurer une pérennité autant fonctionnelle que structurelle.
- ▷ Diminuer la charge organique présente dans les eaux usées.

### Contraintes :

- ▷ Penser l'architecture selon les contraintes suivantes :
  - Rapprocher au maximum les électrodes.
  - Pouvoir insérer facilement la pile dans une canalisation.
  - Permettre l'installation en série ou en parallèle.
  - Rendre possible l'isolation du système par rapport au reste de la canalisation pour en faciliter la maintenance.
- ▷ Contrôler les coûts vis-à-vis des points suivants :
  - Choisir les matériaux pour maximiser le rapport performance/prix et garantir la pérennité de la pile.
  - Optimiser les rapports surfaciques cathode/anode en assurant une surface maximale en anode et minimale en cathode.
- ▷ Faciliter la fabrication aux vues de nos capacités, des délais et des machines-outils disponibles.



# Annexe B - Diagramme GANTT



*Les tâches représentées en rouge correspondent à celles que nous avons dues modifier suite aux aléas pour passer les commandes. Le chemin critique est représenté en hachuré, et l'avancement au jour actuel est celui représenté par un liseret rouge.*



## Annexe C - Tableau des coûts

Voici le tableau des coûts définitifs pour notre PE, fondé sur les factures que nous avons reçues des fournisseurs. La mention Laboratoire dans la colonne fournisseur indiquant que les coûts de ces composants ont été pris en charge par le laboratoire.

| Détails                        | Fournisseur   | Lot                | Quantité           | Nombre de lots | Coût TTC |
|--------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|----------------|----------|
| <i>CANALISATION</i>            |               |                    |                    |                |          |
| Tuyau de canalisation          | Laboratoire   |                    | 0,5m               | 1              | -        |
| Diverses pièces                | Laboratoire   | -                  | -                  | -              | 96€      |
| Pompe                          | Laboratoire   | -                  | 3                  | -              | ??       |
| <i>ANODE</i>                   |               |                    |                    |                |          |
| Fil d'acier inoxydable (0,7mm) | Good Fellow   | 10m                | 20m                | 2              | 113€     |
| <i>CATHODE</i>                 |               |                    |                    |                |          |
| Tissu de carbone               | Good Fellow   | 625cm <sup>2</sup> | 420mm <sup>2</sup> | 1              | 220,8€   |
| PTFE                           | Sigma Aldrich | 100mL              | 1mL                | 1              | 59,40€   |
| Billes de verre                | Sigma Aldrich | 500g               | 1 paquet           | 1              | 42,48€   |
| Poudre de carbone platiné      | Alpha Aesar   | 5g                 | 340mg              | 1              | 126€     |
| Nafion                         | Sigma Aldrich | 25mL               | 2,26mL             | 1              | 63,72€   |
| Isopropanol                    | Sigma Aldrich | 25mL               | 1,13mL             | 1              | 25,8€    |

TABLE 2 – Coûts des différentes pièces du projet

## Annexe D - Valeurs expérimentales

Cette annexe a pour but de fournir les valeurs relevées concernant l'évolution de la tension au sein de la pile pour les différentes expériences menées. Ces valeurs sont de plus celles qui ont été utilisées pour réaliser les Figures de la section XXX.

**Recherche du maximum de puissance** Ce paragraphe reprend les quatre tables de relevés de puissance que nous avons effectués les 15, 20 et 21 mai 2014. L'objectif de ces tracés étant la recherche du maximum de puissance qu'il est possible d'obtenir dans chacune de ces configurations

| Résistance utilisée ( $\Omega$ ) | Tension aux bornes de la pile (V) | Intensité débitée par la pile (mA) | Puissance obtenue ( $\mu W$ ) |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 100                              | 0,019                             | 0,19                               | 3,61                          |
| 250                              | 0,046                             | 0,184                              | 8,46                          |
| 400                              | 0,068                             | 0,17                               | 11,56                         |
| 500                              | 0,079                             | 0,158                              | 12,482                        |
| 600                              | 0,092                             | 0,153                              | 14,10                         |
| 700                              | 0,102                             | 0,146                              | 14,86                         |
| 800                              | 0,113                             | 0,141                              | 15,96                         |
| 900                              | 0,117                             | 0,13                               | 15,21                         |
| 1000                             | 0,122                             | 0,122                              | 14,88                         |
| 1500                             | 0,129                             | 0,086                              | 11,09                         |
| 2000                             | 0,146                             | 0,073                              | 10,66                         |
| 3000                             | 0,169                             | 0,056                              | 9,52                          |
| 4000                             | 0,179                             | 0,045                              | 8,01                          |
| 5000                             | 0,185                             | 0,037                              | 6,845                         |
| 6000                             | 0,19                              | 0,032                              | 6,0167                        |
| 7000                             | 0,192                             | 0,027                              | 5,266                         |
| 8000                             | 0,195                             | 0,024                              | 4,753                         |
| 10000                            | 0,198                             | 0,02                               | 3,920                         |

TABLE 3 – Mesures de puissances réalisées le 15 mai - 9 cathodes

| Date  | Nombre de cathodes branchées | Puissance maximale ( $\mu W$ ) | Tension au maximum de puissance (mV) | Intensité au maximum de puissance ( $\mu A$ ) | Résistance interne ( $\Omega$ ) |
|-------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------------|
| 15/05 | 9                            | 15,96                          | 113                                  | 141,3   | 800                             |
| 20/05 | 9                            | 7,396                          | 86                                   | 860   | 1000                            |
| 20/05 | 7                            | 9,76                           | 121                                  | 80,7  | 1500                            |
| 21/05 | 7                            | 8,21                           | 111                                  | 74  | 1500                            |

TABLE 4 – Différents relevés de maximum de puissance fonction de la date et du nombre de cathodes

**Recherche du meilleur rapport cathode/anode** Nous reprenons ici les données de puissance relevée afin de trouver le rapport optimal cathode/anode pour notre pile



| Nombre de cathodes branchées   | 9   | 8   | 7   | 6   | 5   | 4   | 3   | 2   | 1    |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Rapport surface cathode/anode  | 5,1 | 4,5 | 4,0 | 3,4 | 2,8 | 2,3 | 1,7 | 1,1 | 0,57 |
| Puissance maximale ( $\mu W$ ) | 5,8 | 6,0 | 5,7 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 4,5 | 3,8 | 1,8  |

TABLE 5 – Valeurs de puissance maximales pour différents nombres de cathodes branchées



////////////////// RESUME QUI SERA MIS EN QUATRIEME DE COUVERTURE //////////////////

Dans un esprit de développement durable, le PE 89 s'intéresse à la production d'énergie à partir des bactéries des eaux usées. Le principe est de sélectionner des bactéries susceptibles de céder/et de les forcer à céder des électrons à une anode ce qui, combiné à la réduction du dioxygène de l'air sur les cathodes, fournit une tension récupérable. D'ailleurs, le titre du PE, « Quand recycler rime avec électricité », tient à signifier que l'énergie se trouve tout autour de nous. La conception d'une pile à combustible microbienne qui doit pouvoir s'intégrer dans une canalisation d'eaux usées passe d'abord par une recherche sur l'état de l'art et sur le fonctionnement d'une telle pile, de même l'architecture et la structure de la pile sont pensées pour épouser la forme d'une canalisation. Après la fabrication de la pile, les résultats de la mise en eaux usées de la pile donnent une tension autour de  $0,4V$  et une puissance de  $16\mu W$ , certes résultats modestes mais qui seront suffisants pour faire allumer une LED ou, une application concrète/plus industrielle de la pile c'est à dire alimenter des capteurs d'une station d'épuration. L'optimisation de son fonctionnement passe également par la recherche du meilleur rapport de surface cathode/anode, qui est de 2,20 pour notre pile. Enfin, les pertes de charge liées à la circulation des eaux usées peuvent aussi être prises en compte. La pile a trouvé d'autres opportunités de présentation/d'autres échos à l'extérieur du laboratoire Ampère, à savoir le centre de recherche IIRSTEAL à la station d'épuration de la Feysine et une exposition prévue à la Fête de la Science.