

Travail de Bachelor Pompes Pleco

A l'attention de Vassili Tikhomirov et Christian Degrigny

Par Andreas Lazzarotto

Juillet 2017

haute école
neuchâtel berne jura



ingénierie
www.he-arc.ch



Abstract

The Pleco, an electrolytic tool designed by the HE-ARC, is an Open Source project involving two pumps. The pumps used are expensive laboratory pumps. Within the 2nd year of my bachelor diploma, I have been proposed to study the context of use of those pumps. Furthermore I have been asked to continue this work for my bachelor final work, and to design some cheap Open Source pumps for the Pleco.

This project first involved a complete context and user analysis to understand the end-users needs. The idea was to develop pumps that would be more adapted to the Pleco use. The design itself followed and permitted to build a first prototype. The final goal of this project was to produce a batch of pumps and a full documentation for anyone to make them.

Résumé

Le Pleco, outil électrolytique développé par la HE-ARC, est un projet Open Source nécessitant l'utilisation de deux pompes. Les pompes utilisées jusqu'à aujourd'hui sont des modèles de laboratoire très coûteuses. Il m'a été proposé en deuxième année d'étudier le contexte d'utilisation de ces pompes, et de continuer cette étude en projet de bachelor en développant des pompes de remplacement bon marché et open source.

Ce projet a été mené d'abord par une analyse poussée du contexte et des utilisateurs qui a permis de bien comprendre les besoins réels et de créer des pompes plus adaptées et plus fonctionnelles que celles utilisées à l'origine. Suit la conception en elle-même, qui a mené à la construction d'un premier prototype fonctionnel. L'objectif final du projet est la fabrication d'une petite série de pompes et la mise à disposition complète de la documentation permettant de les construire.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements à :

M. Christian Degrigny, professeur à la He-Arc, pour avoir proposé et suivi ce travail de bachelor,
M. Vassili Tichomirov, professeur à la He-arc, pour avoir tutoré ce travail de bachelor,
M. Romain Jeanneret, assistant de recherche à la He-Arc pour le temps qu'il m'a consacré en entretiens et observations,
M. Gaëtan Bussy, assistant de recherche à la He-arc pour son aide concernant l'électronique et la programmation, ainsi que son expertise concernant le FabLab,
Mme. Carole Baudin, professeur à la He-Arc, pour son soutien au cours du projet,
La société Minivalves (NL) pour la fourniture d'échantillons gratuits de duckbill valves,
L'association Fritzing Fab (D) pour la fabrication rapide de prototypes de PCBs.

Table des matières

Abstract	2
Résumé	2
Remerciements	2
1 Introduction.....	5
1.1 Objectif	5
1.2 Pompes actuelles.....	6
1.3 Contraintes	7
2 Analyse de la demande	8
2.1 Cahier des charges fonctionnel	8
2.2 Cahier des charges ergonomique.....	8
2.2.1 Fonctions sujettes à une analyse.....	8
2.2.2 Analyses nécessaires	8
3 Reformulation de la demande.....	9
4 Proof of concept.....	10
4.1 Choix de la technologie	10
4.2 Conception d'une pompe à membrane	11
4.2.1 Définition	11
4.2.2 Principe de conception.....	11
4.2.3 Dimension de la membrane et de la chambre	12
4.2.4 Premier prototype.....	13
4.3 Validation du prototype	14
4.4 Optimisation du prototype.....	15
5 Recherches ergonomiques et anthropotechnologiques.....	16
5.1 Observations.....	16
5.1.1 Public concerné : les Conservateurs-Restaurateurs.....	16
5.1.2 Outil associé : le Pleco	17
5.1.3 Environnement de fabrication : Le Fab Lab.....	18
5.1.4 Ergonomie de montage	19
5.2 Création de situations de références	20
5.2.1 Disposition sur le plan de travail	20
5.2.2 Tests de montage	23
5.2.3 Interface homme machine	25
6 Concept final.....	26
6.1 Modification du cahier des charges	26
6.2 Scénario d'utilisation	27

6.2.1	Utilisation	27
6.2.2	Rangement et transport	27
6.2.3	Débordement imprévu de l'électrolyte sur l'objet	27
6.3	Revue de conception	28
6.3.1	Principes d'ensemble	28
6.3.2	Pompes	29
6.3.3	Console de contrôle.....	31
7.1.1	Boite	Erreur ! Signet non défini.
7.1.2	Electronique	35
8	Conclusion	37
8.1	Etat du projet.....	37
8.2	Poursuite	37

1 Introduction

Le sujet de mon projet de Bachelor est la conception de pompes, accessoires indispensables au fonctionnement du Pleco. Le Pleco est un nouveau pinceau électrolytique permettant le nettoyage d'objets patrimoniaux en argent terni ou la stabilisation d'objets en plomb sujets à des phénomènes de corrosion active. L'innovation vient du renouvellement continu de l'électrolyte via un système de pompage. Ce pinceau a été développé en collaboration entre la HE-ARC Ingénierie et la HE-ARC Conservation-Restauration. Il est entièrement fabricable dans un FabLab, un espace normalement équipé d'une imprimante 3D et d'une découpeuse laser. Le réseau FabLab est implanté dans de nombreux pays. De plus, le Pleco est mis à disposition du public sous licence Open Source, afin que la communauté mondiale des professionnels de la conservation-restauration puisse en bénéficier tout en ayant la possibilité de l'améliorer. Mon projet entre dans cette philosophie et a pour but de mettre à disposition de cette même communauté des pompes Open Source, à prix réduit et fabricables avec les mêmes outils que le Pleco. On devrait ainsi remplacer les pompes actuelles du pinceau électrolytique Pleco par une alternative open source / open hardware meilleur marché.

1.1 Objectif

L'objectif est de concevoir deux pompes pour le pinceau électrolytique Pleco en tenant compte de différentes contraintes liées à l'environnement de production, à la philosophie open source et à la conception orientée vers l'utilisateur, en abaissant au maximum le coût de revient.

Le cahier des charges officiel du travail de Bachelor est consultable en annexe A1

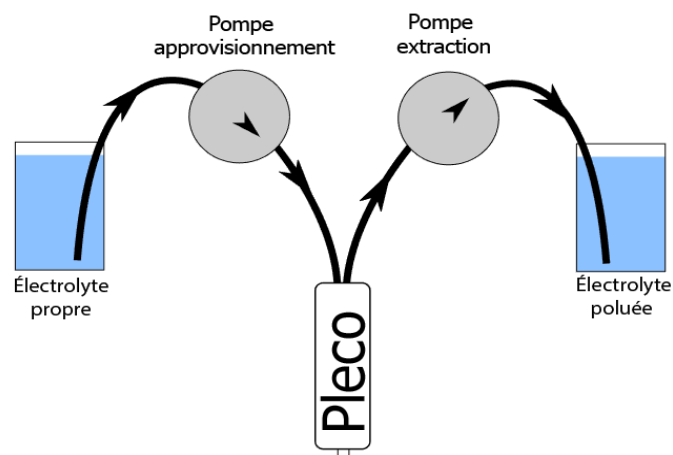


Schéma de fonctionnement du Pleco

Note : le volume d'électrolyte est en réalité suffisant pour n'avoir qu'un seul récipient avec une recirculation du fluide.

1.2 Pompes actuelles

Pompe de chimie KNF Simdos 10

Caractéristiques techniques :

- Débit de 1 à 100 mL/min grande précision
- Hauteur de colonne d'eau de 3m (aspiration)
- Pression max 85psig / 5.6bar
- Alimentation 100 - 240 V / 50 - 60 Hz
- Température d'opération +5 to +40° C
- Température du liquide +5 to +80° C
- Viscosité jusqu'à 500 cSt
- Précision +/-2% (nominal)
- Répétabilité +/-1%
- Consommation 24 W
- IP65
- Dimensions: 150 x 93 x 144 mm
- Poids: 0.9 kg



Avantage :

- Silencieuse
- Débit maîtrisé et mesuré
- Fonction amorçage
- Débit par à-coups
- Capable d'aspirer de l'air (non calculé dans le débit)
- Chimiquement résistant

Inconvénient :

- Prix élevée ~1000.-
- TROP d'options non-utilisées
- Difficultés d'accès au réglage à la volée
- Temps d'accès à la fonction d'amorçage trop long
- Nécessite un filtre pour protéger la pompe de toute microparticule, poussière issues du traitement et pouvant l'endommager
- Poids élevé, tout en restant gérable
- Réparation (due au blocage du système des membranes) nécessitant de faire intervenir le fabricant

1.3 Contraintes

- De fonctionnement
 - Avoir un rapport de débit entre les deux pompes de 1 à 10 (débit entre 10 et 100mL/min) (Extraction avec un débit supérieur à l’approvisionnement)
 - Avoir une fonction amorçage (bouton mettant débit max)
 - Avoir une fonction pause
- Contraintes exogènes
 - Faire circuler des bulles d’air dans l’électrolyte
 - Supporter des pH compris entre 4 et 10.5
- Imposées par l’utilisateur
 - Donner un moyen de comparaison visuel entre les débits
 - Créer un produit robuste avec une bonne durée de vie
 - Etre le plus silencieux possible
 - Adapter l’ergonomie aux conservateurs-restaurateurs
 - Mettre le projet sous licence Open Source / Open hardware
 - Coûter le moins cher possible
- Autres contraintes
 - Produire les pièces dans un Fablab (outils spécifiques)

2 Analyse de la demande

2.1 Cahier des charges fonctionnel

Une première analyse méthodique a permis d'identifier et de caractériser les fonctions que doit remplir l'objet. Cette analyse par méthode APTE® est en annexe A2.

De cette analyse découle une liste de fonctions qui doivent être satisfaites. La plupart de ces fonctions impliquent des solutions techniques simples pour être réalisées, et ne seront pas explicités dans le présent rapport. Les fonctions faisant intervenir le facteur humain ou l'environnement de travail sont plus complexes à traiter, et sont présentées dans la suite de ce cahier des charges.

2.2 Cahier des charges ergonomique

2.2.1 Fonctions sujettes à une analyse

Suite à la définition des fonctions, certaines requièrent une analyse ergonomique et anthropotechnologique pour mieux cerner les contraintes et l'attente des utilisateurs.

- FC1 : Faciliter l'assemblage
- FC2 : Fournir à l'utilisateur les informations et outils nécessaires au montage
- FP3 : Permettre à l'utilisateur de régler les deux pompes (physiquement)
- FP4 +FP4bis : Contrôler les 2 pompes (de manière différentielle)
- FC16 : S'intégrer sur le plan de travail
- FC17 : Contrôler la pompe (IHM et feedback)
- FP6 : Fabriquer la pompe dans un environnement Fablab

2.2.2 Analyses nécessaires

FC1 + FC2

Cerner les capacités de l'utilisateur (en l'occurrence des conservateurs-restaurateurs) en termes d'assemblage, et déterminer les limites de leurs compétences.

Déterminer les outils nécessaires à la compréhension des systèmes à assembler, et construire la documentation de montage en fonction de ces données.

FP3 + FP4 + FP4bis + FC17

Déterminer comment le réglage des pompes doit être opéré en fonction de l'utilisation du Pleco : différentes possibilités de réglages sont imaginables, elles doivent être testées pour déterminer laquelle est la plus appropriée.

Concernant le contrôle physique, il est nécessaire d'essayer deux types de curseurs : rotatifs et linéaires. Je suis personnellement convaincu que les curseurs linéaires donnent un meilleur feedback visuel de leur position par rapport à des curseurs rotatifs.

Une observation du travail journalier d'un conservateur-restaurateur pourrait aussi permettre d'identifier des routines reproductibles et ainsi alléger la charge cognitive.

La fonction FC17 : Contrôler la pompe, pose aussi la question de la position de l'interface de contrôle sur le plan de travail en parallèle à la position des pompes. Une observation de la fréquence de réglage des pompes, de l'environnement de travail des conservateurs-restaurateurs et de l'utilisation des pompes permettra de faire des choix sur ce sujet.

FP6

L'intégration dans la conception de l'environnement de fabrication et des outils à disposition est ici primordiale. Il faudra analyser les contraintes liées à l'environnement d'un Fab Lab.

3 Reformulation de la demande

Suite à ce premier travail d'analyse, la demande a été reformulée comme suit :

L'objectif du travail sera de concevoir un ensemble de pompes avec leurs contrôles en respectant les points suivants, dans leur ordre d'importance :

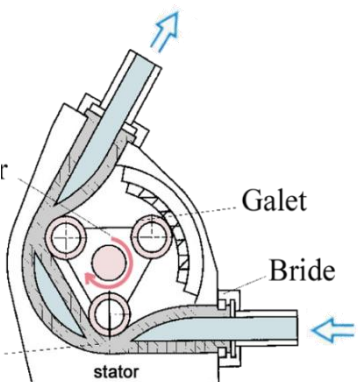
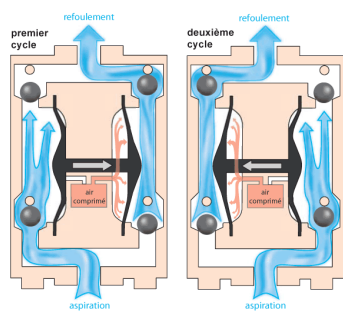
- Egaler les performances de débit des pompes originalement utilisées
- Fabriquer les pompes dans un FabLab
- Faire intervenir au maximum des outils Open Source
- Prendre en compte au maximum l'utilisateur dans la conception
- Limiter au maximum les coûts
- Faciliter les réglages des pompes
- Faciliter le transport et le rangement de l'ensemble
- Ajouter des fonctionnalités (contrôle de l'électrochimie)

4 Proof of concept

Le premier objectif de mon travail est de valider la possibilité de construire une pompe étanche et fonctionnelle dans un FabLab, avec comme outils principaux une découpeuse laser et une imprimante 3D.

4.1 Choix de la technologie

Il s'agit donc tout d'abord de choisir une technologie de pompage compatible avec la fabrication en FabLab, les débits définis ainsi que d'autres critères comme les saccades de débits.

Type	Péristaltique	À membranes
Illustration		
Principe physique	On comprime un tube souple localement pour pousser le fluide qu'il contient	Un mouvement d'aller-retour d'une membrane dans une chambre, associé à des valves antiretour met le fluide en mouvement
Stabilité du débit	pulsé	pulsé
Résistance chimique	Seul le tuyau est en contact avec le fluide	possibilité d'utiliser des membranes résistantes chimiquement (PTFE / AL / etc.)
Type d'étanchéité	Pas d'étanchéité	membrane / fermeture de carter
Précision de la fabrication	Très tolérante	Tolérante
Fabrication dans un Fablab	Facile	Moyennement difficile
Bruit	Bruyant	Modéré

Bon Acceptable Médiocre

Voir la boîte morphologique complète en Annexe A3.

Après avoir essayé des pompes péristaltiques, j'ai pu noter que ces pompes réclament un très fort couple moteur et que le fonctionnement est assez bruyant, entre autre à cause des prises de contact alternatives des galets avec le tuyau. Cette solution n'a pas pu être choisie car le bruit est un des critères très importants pour le travail en continu avec les pompes du Pleco. Le choix s'est donc porté sur une technologie de pompes à membrane.

4.2 Conception d'une pompe à membrane

4.2.1 Définition

Les **pompes à membrane** fonctionnent avec, comme leur nom l'indique, une membrane qui oscille. L'oscillation de la membrane peut être créée par un excentrique mû par un moteur, un piston, un moteur linéaire, une vibration électromagnétique ou actionnée par de l'air comprimé.

Le mouvement de la membrane, accompagné de clapets d'entrée et de sortie, permet le plus souvent de réunir la fonctionnalité, pour tous les fluides, de pompages difficiles et précis.

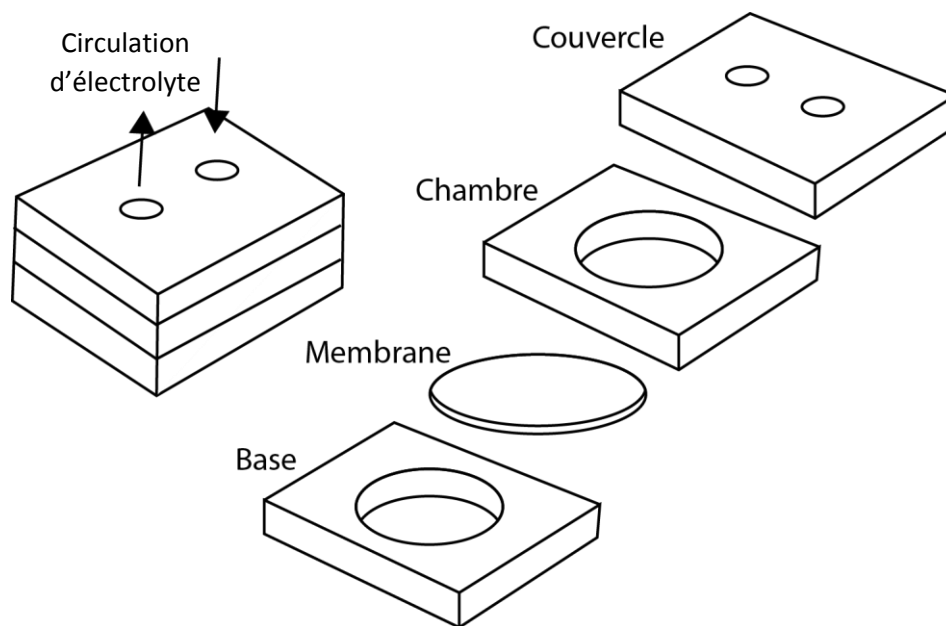
La technologie de la simple ou double membrane, permet de réaliser des pompes capables de rester dans des dimensions extrêmement réduites (micro pompes) et d'être placées dans toutes les positions (même en immersion totale). D'autre part, elle ne transforme en rien la nature des liquides transportés.

Les applications touchent donc les secteurs, du médical, de l'alimentaire, de la chimie et pétrochimie, de l'analyse, de l'aquariophilie, du transport de liquides en petite quantité, etc.

[Wikipedia]

4.2.2 Principe de conception

Une solution simple serait de créer un empilement de plaques découpées au laser, prenant en sandwich une membrane en polymère.



Pompes « sandwich »

Se pose alors la question de l'étanchéité entre les plaques.

Utiliser une membrane en élastomère permettrait d'obtenir directement l'étanchéité en la serrant entre les plaques. Un joint pourrait être réalisé dans la même matière que la membrane pour l'interface chambre / couvercle.

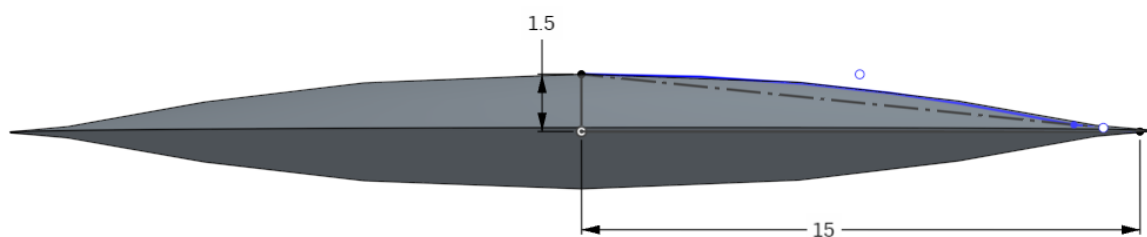
Le point suivant est la mise en mouvement de la membrane. Percer la membrane reviendrait à créer une source de fuite potentielle, il faut donc identifier des moyens de mettre en mouvement la membrane sans la percer.

Une solution valable serait de maintenir la membrane entre deux aimants permanents (voir figure ci-contre), l'un étant dans la chambre et l'autre au bout d'une bielle à l'extérieur de la chambre.

4.2.3 Dimension de la membrane et de la chambre

Le débit max doit être de 100mL/minute

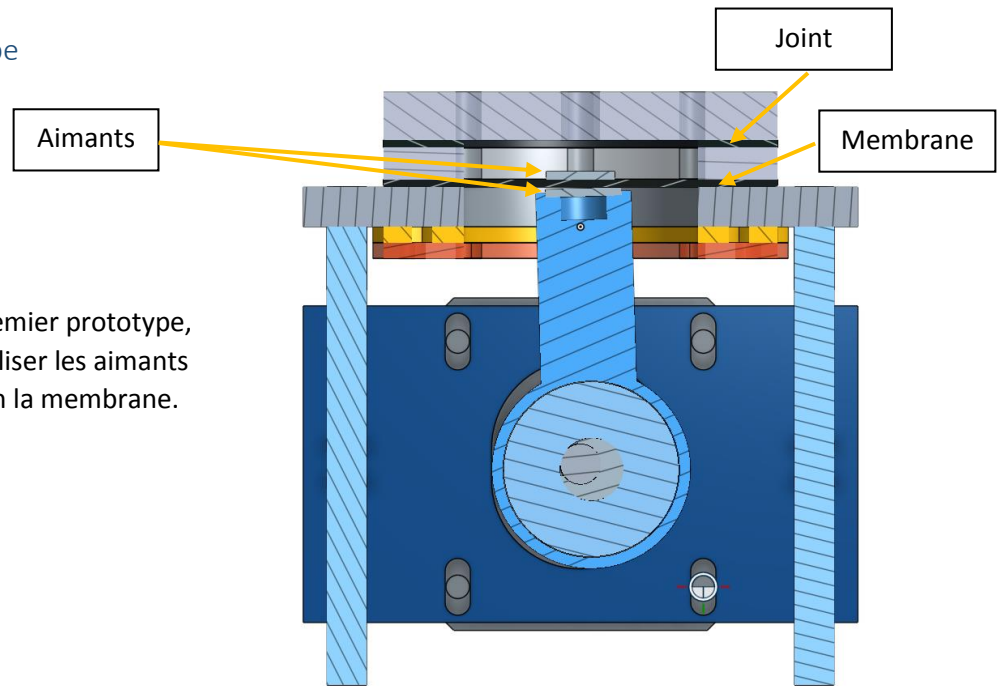
En considérant 2 cycles par seconde (chiffre empirique), au régime maximal, on obtient un volume par cycle de 0.85mL. En modélisant le volume balayé par la membrane avec un déplacement de la partie centrale de 3mm au centre, le diamètre minimal de la chambre a été fixé à 30mm.



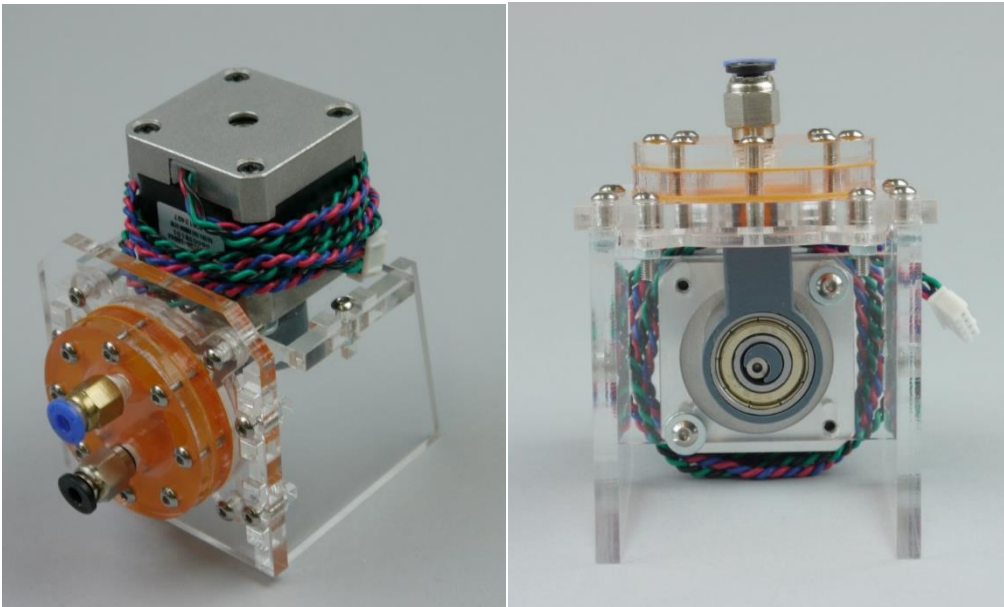
Solide définissant le volume de la chambre de pompage

4.2.4 Premier prototype

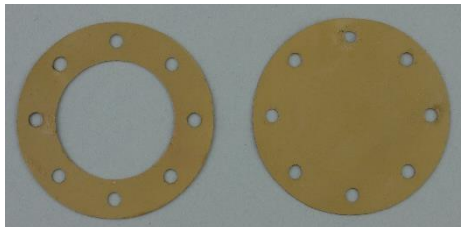
Vue en coupe du premier prototype, permettant de visualiser les aimants prenant en sandwich la membrane.



Premier prototype conçu selon ces bases :



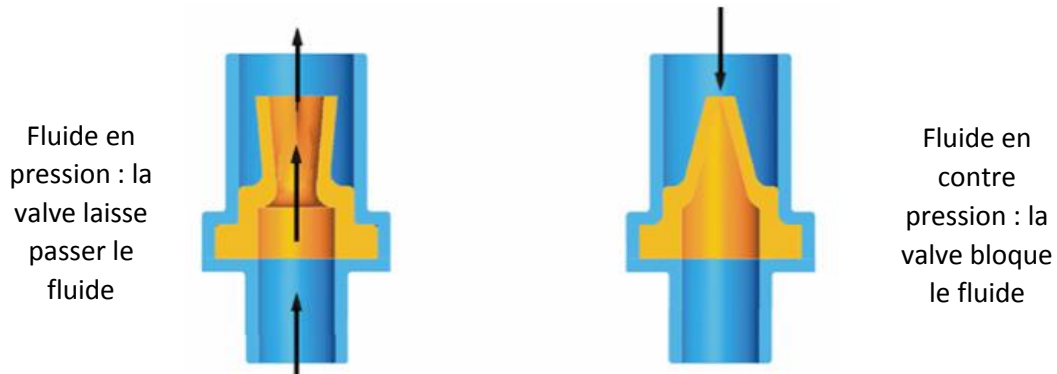
La membrane et le joint sont découpés au laser dans une feuille de Polyuréthane :



Pour garantir le fonctionnement de la pompe, il faut ajouter des valves antiretour à l'entrée et à la sortie de la pompe.

Ces valves sont disponibles dans le commerce dans les secteurs de l'aquariophilie et dans le médical, où elles sont principalement utilisées dans les lignes de perfusion.

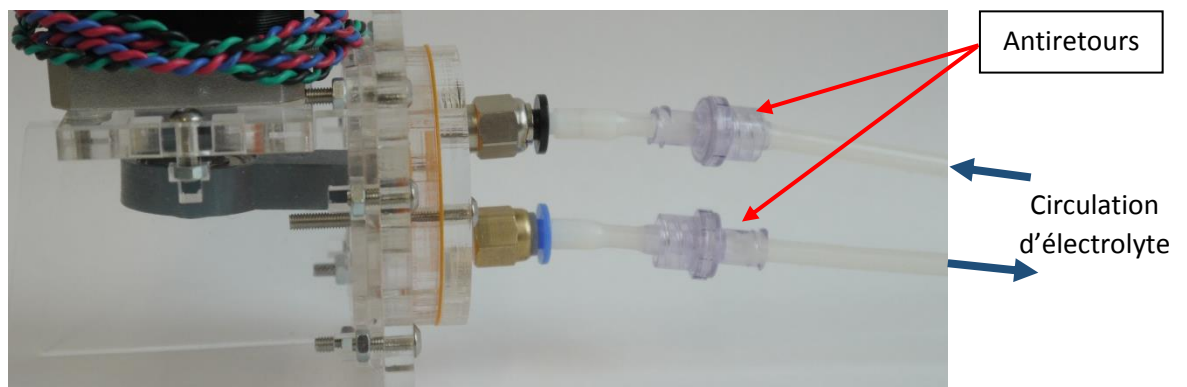
Ces valves fonctionnent pour la plupart sur la technologie « duckbill valve » (valve bec de canard).



Fonctionnement d'une « duckbill valve »

Sur le premier prototype, ces valves sont des antiretours de perfusion obtenues auprès d'un assistant de recherche du domaine santé.

Elles sont montées sur les tubes d'entrées et sortie de la pompe.



Antiretours de perfusion utilisés sur le premier prototype

4.3

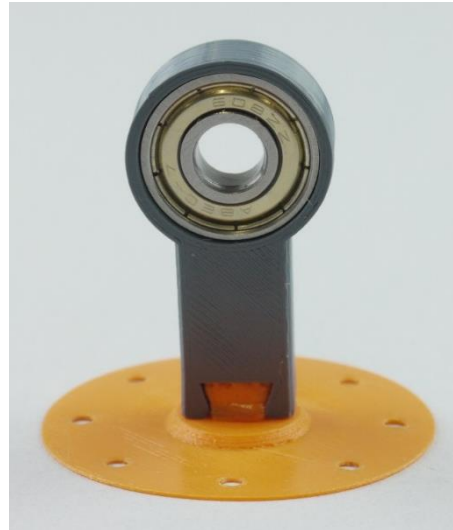
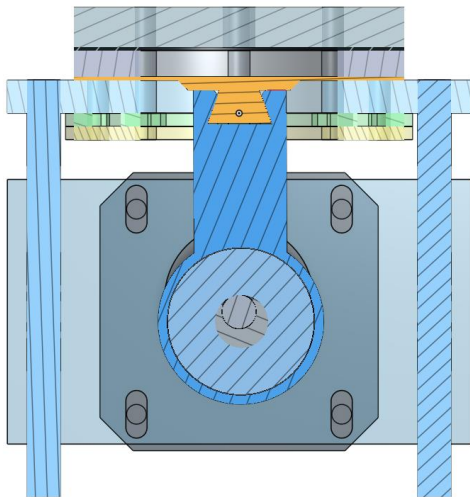
Validation du prototype

Le premier prototype s'est avéré fonctionnel, me confirmant qu'il est possible de construire une pompe à membrane dans un FabLab en utilisant des éléments standards disponibles partout dans le monde. Ce prototype n'est cependant pas parfait, et des défauts ont pu rapidement être identifiés : les aimants ont tendance à se décoller parfois, et la membrane est trop souple.

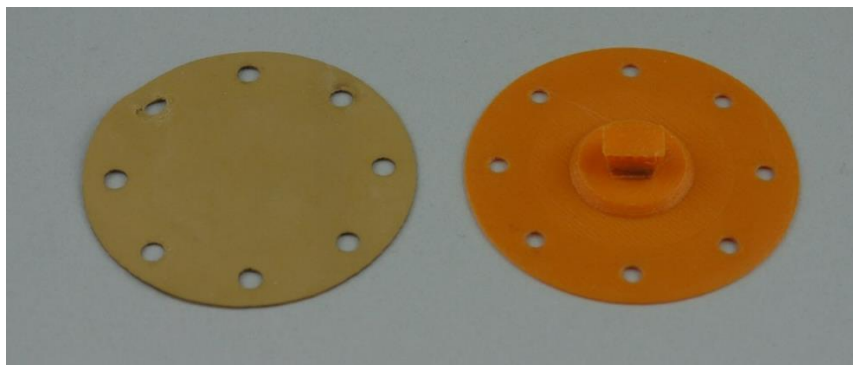
4.4 Optimisation du prototype

Suite à cette première expérience, il semblait intéressant d'expérimenter l'utilisation de fil souple imprimé en 3D. Ces filaments sont disponibles chez plusieurs fabricants, et sont fabriqués à base de polyuréthane thermoplastique.

Le fait d'imprimer la membrane permet de lui intégrer un élément de mise en mouvement directe, évitant l'utilisation d'aimants. On peut ainsi accoupler directement la membrane avec la biellette sans autres éléments mécaniques.



Assemblage de la membrane imprimée à la biellette



Comparaison entre les membranes découpée et imprimée

Suite à cette modification, le pompage s'est avéré plus constant (membrane plus rigide), le défaut de déconnexion a disparu et l'étanchéité est restée parfaite.

Le principe de pompage est validé, et il faut maintenant s'intéresser à l'utilisation des pompes dans leur contexte particulier.

5 Recherches ergonomiques et anthropotechnologiques

5.1 Observations

5.1.1 Public concerné : les conservateurs-restaurateurs

La présente conception s'adresse à un public très ciblé : les conservateurs-restaurateurs (C-Rs). Afin de mieux centrer la conception autour des utilisateurs, il faut cerner leur profil et comprendre les représentations qu'ils se font de leurs outils et des pièces sur lesquelles ils travaillent.

Suite à plusieurs entretiens et observations avec Romain Jeanneret et Christian Degrigny (assistant de recherche et professeur du domaine C-R), le point le plus important est le fait que l'objet est le centre de leur attention. En effet, les objets à restaurer ou stabiliser ont une forte valeur historique et parfois une valeur pécuniaire élevée. La plus grande inquiétude des C-R est de dégrader l'objet, ce qui est une cause importante d'anxiété.



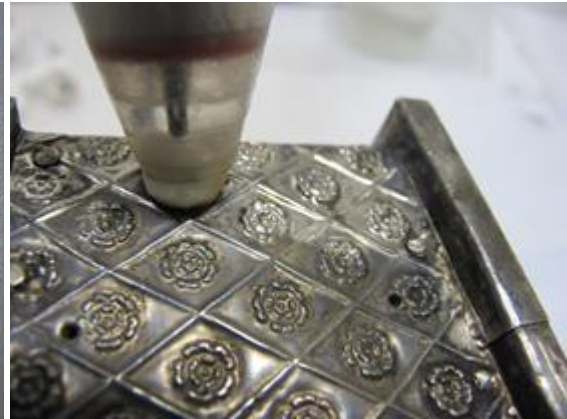
Il est intéressant de noter que leur travail s'articule autour des qualités suivantes : les C-R sont minutieux, précis, consciencieux et appliqués. Il est aussi important de prendre compte de l'environnement économique de la conservation-restauration. Ce milieu n'est pas facilement financé et les C-Rs sont souvent obligés de contourner un manque de moyen par du système-D. Ils sont donc assez bricoleurs et débrouillards.

5.1.2 Outil associé : le Pleco

Le Pleco est un pinceau électrolytique permettant le nettoyage de l'argent terni et la stabilisation de pièces en plomb oxydées. Il fait intervenir une solution électrolytique. Les réactions électrochimiques induites lors du nettoyage de l'argent génèrent des gaz, et il est donc préférable d'utiliser le Pleco sous une hôte.



Le Pleco

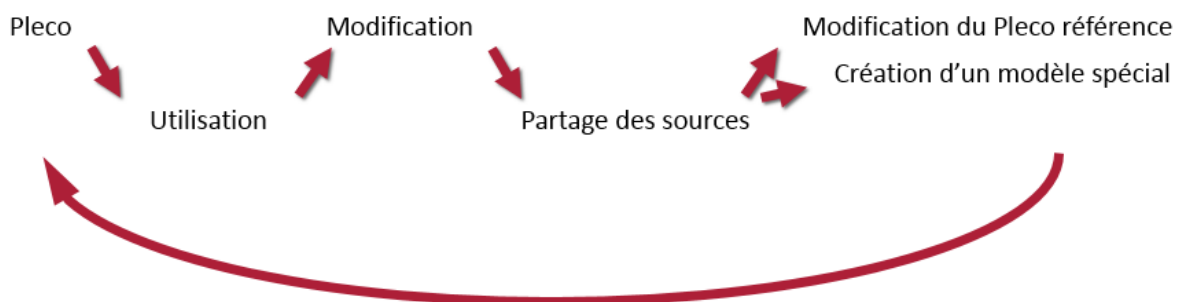


Pièce en argent terni en cours de nettoyage

Cet environnement est particulier : paillasse carrelée avec peu de surface, souvent encombrée d'autres accessoires (alimentation stabilisée, multimètre, support, etc.). Il faudra tenir compte de cette observation pour optimiser la disposition des outils sur le plan de travail. Il faut aussi noter que les carreaux sont parfois humides, les matériaux des pompes devront donc être à l'épreuve de l'eau. (Il faut aussi prendre en compte le risque de fuite ou de fausses manipulations avec des liquides sur le plan de travail.)



L'un des aspects intéressants du Pleco est sa dimension communautaire. En effet, il a été développé pour et par une communauté de C-R, et des workshops permettent aux C-R de se rassembler pour construire et apprendre à utiliser leur nouvel outil. Le développement de cette petite communauté favorise une conception itérative par l'utilisation, comme elle est décrite dans le schéma suivant :



Cycle de conception du Pleco

5.1.3 Environnement de fabrication : Le Fab Lab



« La notion de **Fab Lab** (contraction de l'anglais FABrication LABoratory, traduction : laboratoire de fabrication) désigne un atelier composé de machines-outils pilotées par ordinateur pouvant fabriquer rapidement et à la demande des biens de nature variée. [...] Pour être appelé Fab Lab, un atelier de fabrication numérique doit respecter la charte Fab Lab, mise en place par le MIT. Les Fab Labs sont réunis en un réseau mondial très actif. » [Wikipédia]

La charte FabLab éditée par le MIT:

Mission: les fab labs sont un réseau mondial de laboratoires **locaux**, qui rendent possible l'invention en donnant aux individus accès à des outils de fabrication numérique.

Accès: vous pouvez utiliser le fab lab pour fabriquer à peu près n'importe quoi (dès lors que cela ne nuit à personne) ; vous devez apprendre à le fabriquer vous-même, et vous devez partager l'usage du lab avec d'autres usagers et utilisateurs.

Éducation: la formation dans le fab lab s'appuie sur des projets et l'apprentissage par les pairs ; vous devez prendre part à la capitalisation des connaissances et à l'instruction des autres utilisateurs.

Responsabilité: vous êtes responsable de :

- La sécurité : savoir travailler sans mettre en danger d'autres personnes ni endommager les machines,
- La propreté : laisser le lab plus propre que vous ne l'avez trouvé,
- La continuité : contribuer à entretenir et réparer les outils, à gérer les stocks de fournitures et à rendre compte des incidents.

Secret: les **concepts** et les processus développés dans les fab labs doivent **demeurer disponibles** pour un usage individuel même si la propriété intellectuelle peut être protégée.

Business: des activités commerciales peuvent être initiées dans les fab labs, mais elles ne doivent pas faire obstacle à l'accès ouvert. Elles doivent se développer au-delà du lab plutôt qu'en son sein et bénéficier à leur tour aux inventeurs, aux labs et aux réseaux qui ont contribué à leur succès.

[fablab-neuch.ch]

En d'autres termes, l'utilisation d'un Fab Lab s'articule autour du partage des ressources et des connaissances, et il faudra donc sensibiliser les utilisateurs du Pleco et de ses pompes à cette philosophie.

Ce milieu de fabrication particulier implique donc que les sources de l'objet créées soient disponibles, donc Open Source / Open Hardware.

Afin de protéger la propriété intellectuelle liée aux pompes, mais aussi afin de protéger ses créateurs contre toute action en justice liées à une utilisation inadéquate, il est nécessaire de placer les sources sous une licence spécifique réglementant l'usage des fichiers mis à disposition. Les licences standards Creative Common et leurs dérivés, plutôt appliquées aux créations artistiques, ne protègent pas les « objets » et la meilleure alternative pour l'open-hardware est la licence CERN, éditée par l'organisme du même nom dans le cadre de son programme de partage de technologies ouvertes. (Voir Annexe B1.1 pour la licence originale et B1.2 pour la licence traduite en français.)

Cette licence protège les créateurs de toute malfaçon ou mauvaise utilisation de l'objet, mais « oblige » aussi toute personne appliquant une modification à partager cette modification, tout en citant la source de base. Cette « obligation » est un encouragement au partage des connaissances et à l'amélioration continue à travers une communauté d'utilisateurs, et cette notion extrêmement

importante devra être bien expliquée aux conservateurs-restaurateurs, notamment dans la notice de montage et au cours des workshops.

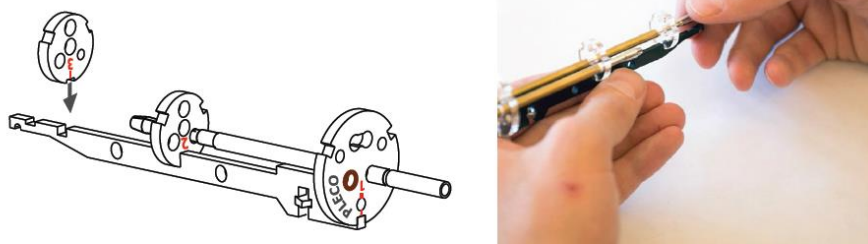
Les outils à disposition pour la fabrication des pompes, que l'on devrait pouvoir retrouver dans la plupart des FabLab, sont les imprimantes 3D (FDM disponibles partout), et une découpeuse laser. Il faudra se limiter au maximum à ces deux outils, et éviter les usinages « conventionnels », extrêmement chronophages et demandeurs de compétences et d'outillages peu répandus (tournage, fraisage)

5.1.4 Ergonomie de montage

[Note : il est admis que dans un premier temps la fabrication des éléments des pompes sera assurée par moi ou par une autre personne familiarisée avec le Fab lab, dans le but de créer des kits qui seront assemblés par des conservateurs-restaurateurs lors de workshops.

La question de la fabrication n'est donc pour le moment pas abordée dans d'autres mesures que de prévoir des petites séries]

L'assemblage du Pleco est principalement basé sur l'emboîtement d'éléments en plastique, maintenus en position par des boulons métriques. L'utilisation d'écrous noyés dans des emplacements spécifiques permet de mettre en place des vis dans des trous borgnes, sans avoir à maintenir manuellement l'écrou. Il permet de plus de fixer ensemble des plaques perpendiculaires les unes aux autres.



Illustrations extraites de la notice de montage du Pleco

Ces opérations sont simples à la condition que le logement d'écrou soit de la bonne taille, en garantissant un bon maintien de l'écrou, et que l'insertion de celui-ci ne brise pas la pièce.

L'assemblage par gaine thermo rétractable est intéressant dans son principe, mais s'est montré complexe à exécuter et requiert la création d'un outil d'assemblage spécifique.

Afin de simplifier le montage des pompes, il serait préférable de normaliser les types d'assemblages, en réutilisant la méthode des écrous noyés.

Il sera aussi important de normaliser la visserie (diamètre et longueur) afin d'éviter une charge cognitive supplémentaire lors du montage. 3 tailles de vis différentes au maximum semblent être idéales (en prenant en compte les vis déjà employées sur le Pleco). Ces vis devront toutes être assemblées avec le même outil, encore une fois dans un souci simplicité pour le monteur.

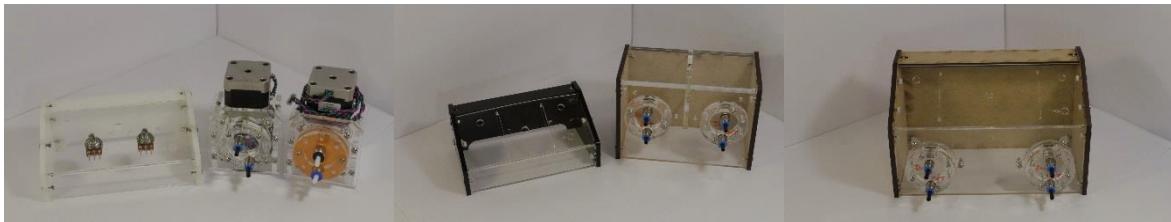
La question des compétences des monteurs reste entière, des tests itératifs sur des prototypes avec des notices provisoires permettront d'atteindre les objectifs fixés en termes de difficulté et temps maximum de montage.

La conception finale ainsi que la notice d'assemblage s'appuieront donc sur ces tests et sur les recommandations précédentes liées à l'assemblage.

5.2 Création de situations de références

Suite à ces observations, il reste quelques points obscurs pour lesquels aucune situation de référence n'a été trouvée. Il est donc nécessaire de les générer, en créant des tests impliquant les utilisateurs. Ces tests concernent la disposition des pompes sur le plan de travail, les méthodes d'assemblages et l'interface homme machine.

5.2.1 Disposition sur le plan de travail



Console + 2 pompes

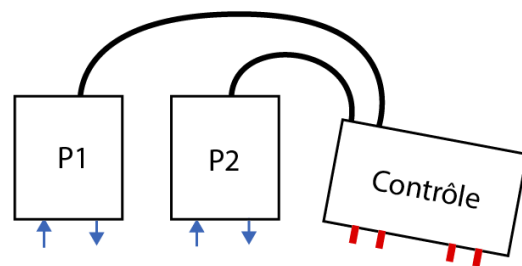
Console + pompes combinées

All in One

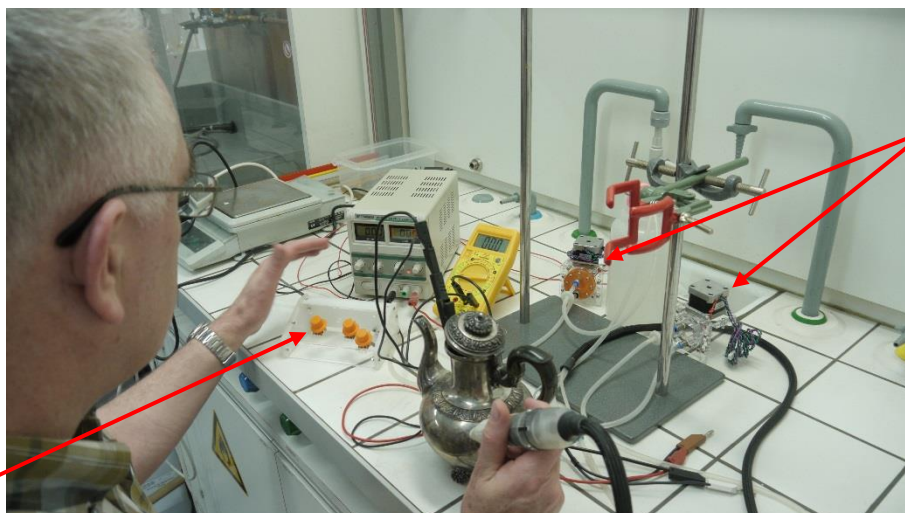
5.2.1.1 Test 1 : Pompes et console de contrôle séparés

Observations :

La console est placée en premier, à gauche de l'alimentation stabilisée, puis les pompes sont disposées de part et d'autre du réservoir d'électrolyte, au centre de la paillasse, légèrement en arrière du statif.



Suite au constat que les pompes n'ont pas besoin d'intervention durant l'utilisation, elles ont été reculées au fond de la paillasse pour dégager de la place autour de l'objet.



Console de contrôle

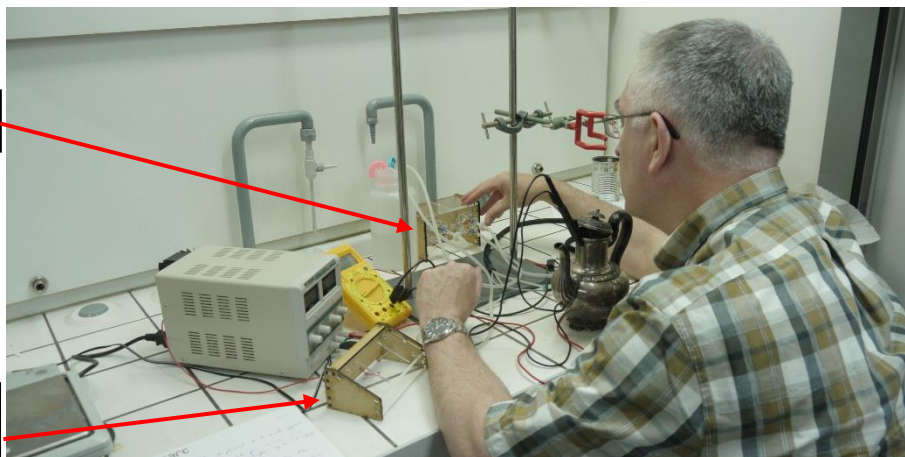
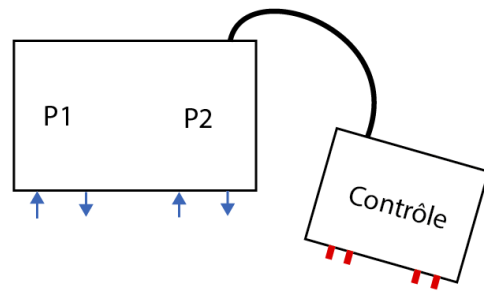
Pompes

5.2.1.2 Test 2 : Pompes combinées et console de contrôle séparés.

Observations :

La console est placée à nouveau à gauche de l'alimentation stabilisée.

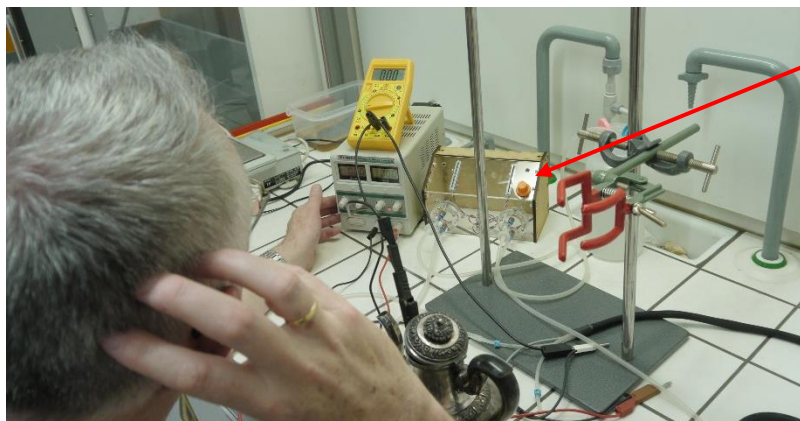
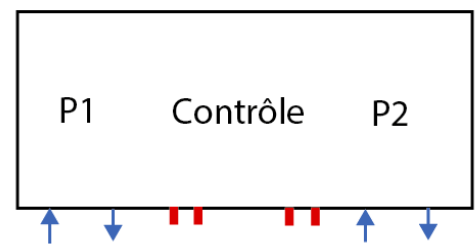
Le système des pompes est placé à côté du réservoir, avec une réflexion concernant le fait qu'elle pouvait être placée loin des mains. Elle est cependant placée bien en face de l'opérateur, à portée de vue.



5.2.1.3 Test 3 : All in one

Observations :

Le boîtier est d'abord placé à gauche de l'alimentation stabilisée, puis un commentaire est fait sur la longueur des tubes pour aller au réservoir, jugés trop longs. Le boîtier est alors déplacé entre l'alimentation stabilisée et le réservoir. C. Degrigny constate alors que les contrôles sont trop loin. De plus la fluide s'en retrouve très rapprochée des éléments électriques et circule entre l'utilisateur et les contrôles.



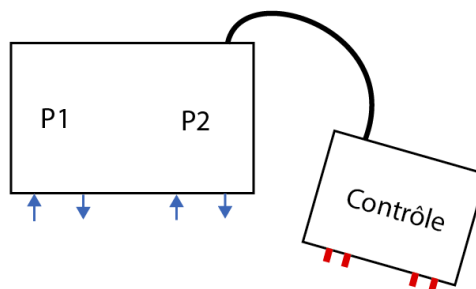
5.2.1.4 Choix suite à cette analyse

La solution All in one, séduisante par sa compacité et sa simplicité de mise en œuvre (aucun câble), se révèle inutilisable en situation réelle. Cette solution génère trop de risques de fausses manipulations, de débranchements accidentels de tubes et de potentielles éclaboussures. De plus, une impression de lourdeur se dégage de l'objet selon Mr Degrigny.

La solution de deux pompes séparées séduit Mr Degrigny, mais pose des problèmes techniques et pratiques à l'installation, comme le dédoublement des câbles qui augmente le risque d'erreurs de montage du système, et l'inversion possible des pompes. De plus, bien que les pompes soient individuellement plus compactes, elles occupent plus d'espace que la combinaison de pompes sur la paillasse. Elles offrent cependant plus de souplesse de positionnement. C'est de plus le système auquel C. Degrigny est habitué.

Le choix du combo de pompes a été appuyé par R. Jeanneret et D. Witschard, qui considèrent que la solution des pompes séparées est à éliminer, convaincus que la multiplication des connexions amène un risque d'erreur de manipulation trop important.

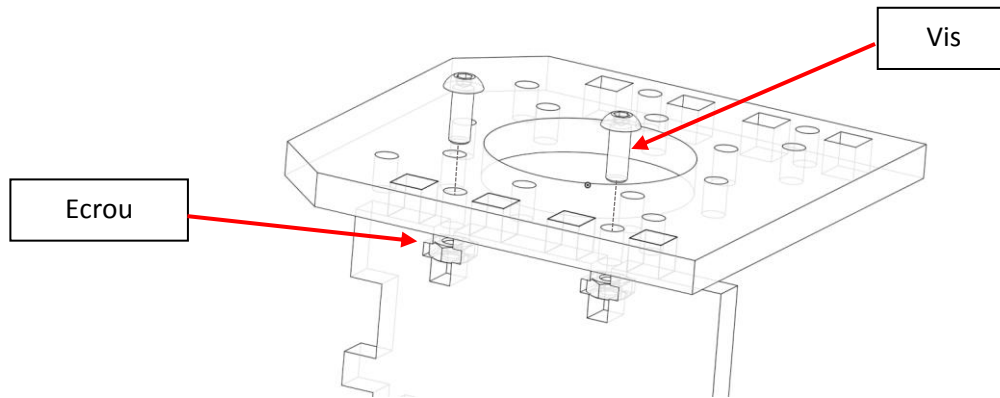
Le choix final se porte donc sur une combinaison de pompes et une console de contrôle séparée, avec la possibilité de les superposer.



5.2.2 Tests de montage

L'objectif ici n'était pas de mettre en concurrence des méthodes de montages différentes, mais de valider et améliorer celles utilisées dans le monde de l'open source.

5.2.2.1 Assemblage par vis-écrou encastré

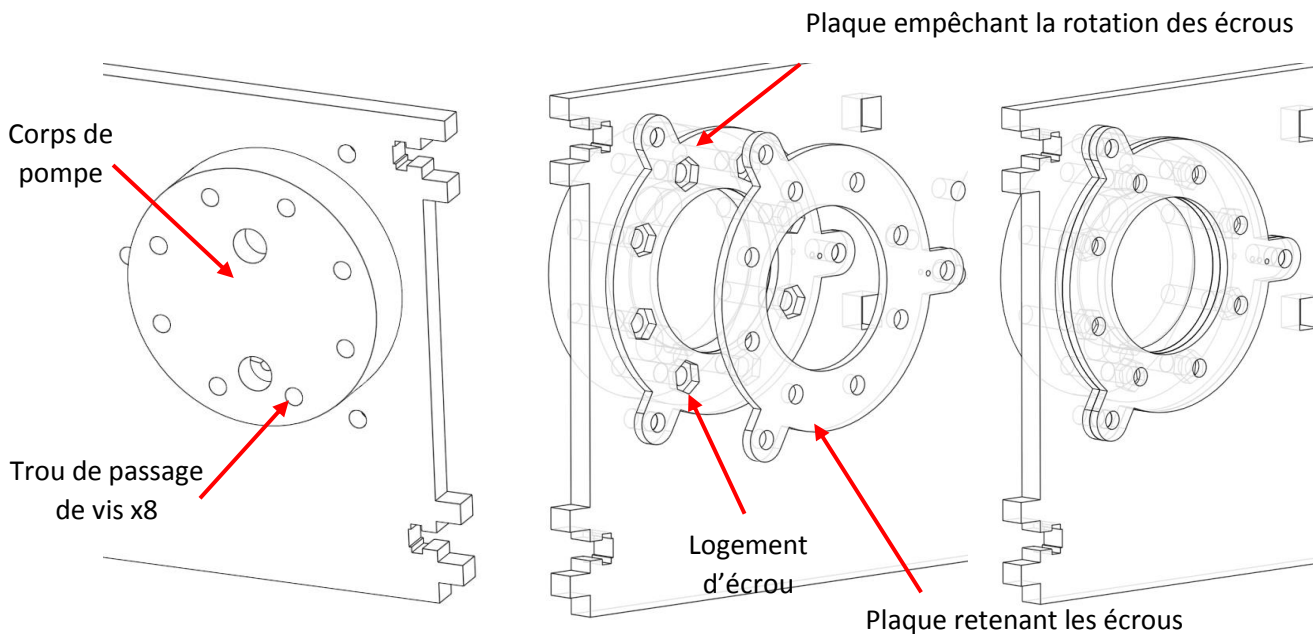


Exemple d'assemblage par écrou-vis encastré

La méthode d'assemblage par vis-écrou encastré est utilisée dans de nombreux projets utilisant des plaques découpées au laser. Elle a l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre et de ne demander aucune retouche après découpe. Cependant, pour être pratique à utiliser, il faut que l'écrou, une fois inséré dans son logement, ne bouge plus. Cet encastrement est facile à obtenir dans des matériaux mous comme le MDF, mais plus compliqué dans du PMMA (plexiglass) car celui-ci est très cassant. Il est extrêmement difficile de trouver les cotes juste du logement de l'écrou pour qu'à l'insertion l'écrou ne passe pas à travers la plaque ni ne provoque une fissuration. De plus, la répétabilité dimensionnelle de la découpe des logements n'est pas excellente. Pour contourner ce problème, utiliser des écrous en nylon semble être la solution idéale. En effet, c'est l'écrou qui se déforme légèrement à l'insertion, ce qui évite de détériorer le PMMA.

5.2.2.2 Maintien d'écrous difficiles d'accès

La partie active de la pompe (le sandwich de plaques contenant la chambre) est maintenue sur la face avant du boîtier par 8 vis M3 sur son pourtour. Le but est de répartir au mieux le serrage pour garantir l'étanchéité. Une fois le boîtier fermé, les écrous sont très difficiles d'accès, c'est pourquoi il était nécessaire de trouver un moyen de les maintenir dans le cas d'une intervention sur les pompes, par exemple pour remplacer la membrane ou un joint.



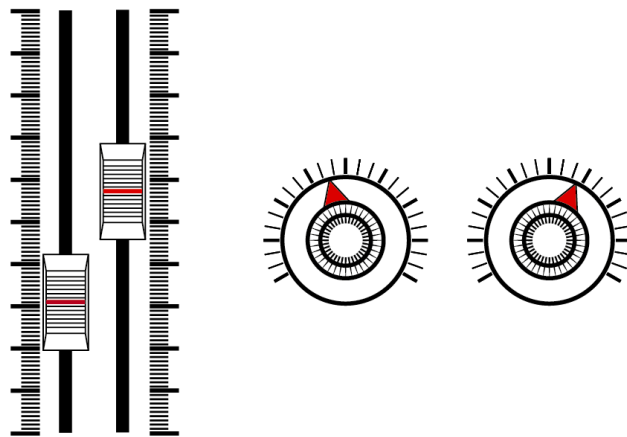
Vue filaire du système de maintien des écrous

L'idée ici est de prendre en sandwich les écrous entre la face du boîtier et une autre plaque, tout en les empêchant de tourner grâce à une plaque intermédiaire découpée à la forme des écrous. Ces deux plaques sont-elles mêmes maintenues à l'arrière de la face du boîtier par trois vis. Lors de l'assemblage, on commence par monter ces deux plaques et les écrous sur la face du boîtier, ce qui permet d'ajouter la partie active des pompes en fin de montage.

5.2.3 Interface homme machine

Le dernier point critique concernant l'ergonomie d'utilisation est l'interface homme-machine. Sur les pompes originellement utilisées, l'IHM est complexe (accès aux fonctions par des menus/ sous menus, besoin de valider les valeurs, etc.). L'idée ici est de donner l'accès direct à chaque fonction à l'utilisateur pour simplifier le réglage, l'amorçage ou la purge des pompes.

La fonction la plus intéressante étant le réglage, plusieurs types de commandes sont disponibles : le potentiomètre linéaire, comme utilisé sur les tables de mixage sonore par exemple, et les potentiomètres rotatifs, plus courants.



Exemple de potentiomètres linéaires et rotatifs

Le choix de ces interfaces n'est cependant pour l'instant pas possible et des tests en utilisation réelle des pompes seront nécessaires. Ces deux solutions sont facilement permutables, et il n'est pas préjudiciable de continuer la conception sans en avoir choisi une.

6 Concept final

Le chapitre suivant décrit la conception des pompes et des périphériques intégrés. Il est à noter que cette conception sera poursuivie après le rendu du présent rapport, et que certains points de conception auront possiblement évolué ou disparu.

6.1 Modification du cahier des charges

A la semaine 5 du travail de bachelor, il a été ajouté au cahier des charges l'intégration d'un voltmètre programmable à l'électronique des pompes. Cette fonction était au départ listée dans les options à intégrer dans le futur. Il en résulte l'intégration d'un dispositif d'affichage comprenant un écran 16x2 caractères et d'un clavier 5 touches associé, ainsi que des bornes de connexion en façade de la console de contrôle (voir le chapitre « électronique » en page 35).



Il a aussi été demandé de trouver une solution mieux intégrée pour les valves antiretours des pompes. Les valves doivent être internes aux pompes et non en ligne sur les tubes sortants, afin d'éviter toute possibilité d'erreur de montage. L'utilisation d'éléments non disponibles dans les circuits de grande distribution est tolérée car la solution initiale utilisant des valves externes reste tout de même disponible pour qui voudrait fabriquer ces pompes en dehors d'un workshop organisé par le FabLab-Neuch (voir page 29 pour les détails de conception).

6.2 Scénario d'utilisation

6.2.1 Utilisation

Situation de départ : Le Pleco et les pompes, ainsi que tous les accessoires nécessaires au fonctionnement de l'outil sont rangés dans une boîte. L'alimentation stabilisée, le statif, l'objet à nettoyer et le matériel de laboratoire sont déjà sur la paillasse.

Opérations :

- Sortir les éléments de la boîte
- Disposer les pompes et la console de contrôle sur la paillasse
- Brancher le câble électrique entre les pompes et la console
- Brancher la fluidique du Pleco
- Brancher les câbles électriques du Pleco
- Remplir le réservoir d'électrolyte
- Brancher le transformateur des pompes au secteur
- Amorcer les pompes
- Régler le potentiel électrique à l'aide du voltmètre intégré à la console
- Régler le régime des pompes sur la console
- Nettoyer l'objet

6.2.2 Rangement et transport

Situation de départ : Le Pleco est en état d'être utilisé sur la paillasse.

Opérations :

- Purger les pompes
- Eliminer l'électrolyte souillé
- Débrancher le transformateur du secteur
- Débrancher les câbles électriques du Pleco
- Débrancher la fluidique du Pleco
- Débrancher le câble électrique entre les pompes et la console
- Ranger les éléments dans la boîte
- (Ranger la boîte dans le placard)
- (Ranger la boîte dans un sac de protection et le transporter)

6.2.3 Débordement imprévu de l'électrolyte sur l'objet

Situation de départ : Le nettoyage de l'objet est en cours. L'électrolyte n'est pas suffisamment aspiré et une coulure apparaît sur l'objet.

Opérations :

- Appuyer sur le bouton forçant la pompe d'extraction au régime maximal
- Essuyer la coulure avec un chiffon
- Appuyer à nouveau sur le bouton pour revenir au régime réglé

6.3 Revue de conception

6.3.1 Principes d'ensemble

La conception des pompes, de la console de contrôle et de la boîte de rangement doit répondre à des exigences communes à ces trois objets, comme suit :

6.3.1.1 *Machines à disposition*

Comme indiqué précédemment dans l'analyse de l'environnement de production, les outils de production à disposition se résument aux imprimantes 3D (technologie FDM) et à la découpe laser.

6.3.1.2 *Production en petite série*

Le gros point faible du Pleco pour la production en petite série est sa conception articulée autour de pièces imprimées en 3D : les temps d'impression sont élevés et les pièces demandent à être ajustées après l'impression. Il faut en tirer la leçon suivante : limiter l'utilisation de pièces imprimées au maximum, et concevoir les pièces de manière à ce qu'elles ne demandent aucune retouche après l'impression. Il faut donc privilégier au maximum l'utilisation de la découpe laser qui est très fiable et rapide.

6.3.1.3 *Matériaux*

Les boîtiers des pompes doivent être découpables au laser et résistants à l'eau. Le plexiglass a donc été choisi pour sa facilité de découpe au laser, sa résistance élevée au milieu humide et sa disponibilité. De plus, il est disponible dans divers coloris (transparent, translucide, fumé, etc.)

La membrane et les joints seront imprimés en matériaux souple (filaflex, ninjaflex ou autre). Ces pièces demandent une attention particulière, et seront certainement le point faible pour la production en série.

6.3.1.4 *Visserie*

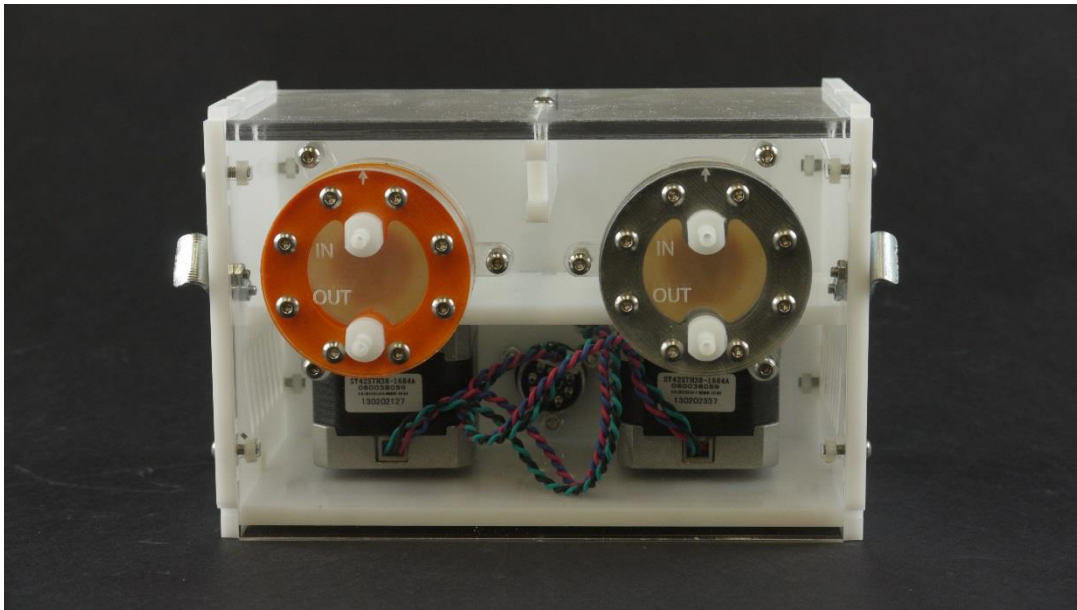
La visserie doit être normalisée au maximum. Des vis M3 à tête 6 pans creux, déjà utilisées sur le Pleco, seront employées au maximum. La longueur de ces vis doit elle aussi être uniformisée pour limiter le nombre de références et simplifier l'approvisionnement dans le cadre de petites séries.

Comme vu précédemment, les écrous utilisés seront en Nylon. Les vis elles seront en acier inox pour prévenir une oxydation due au milieu humide.

6.3.1.5 *Logiciel de conception*

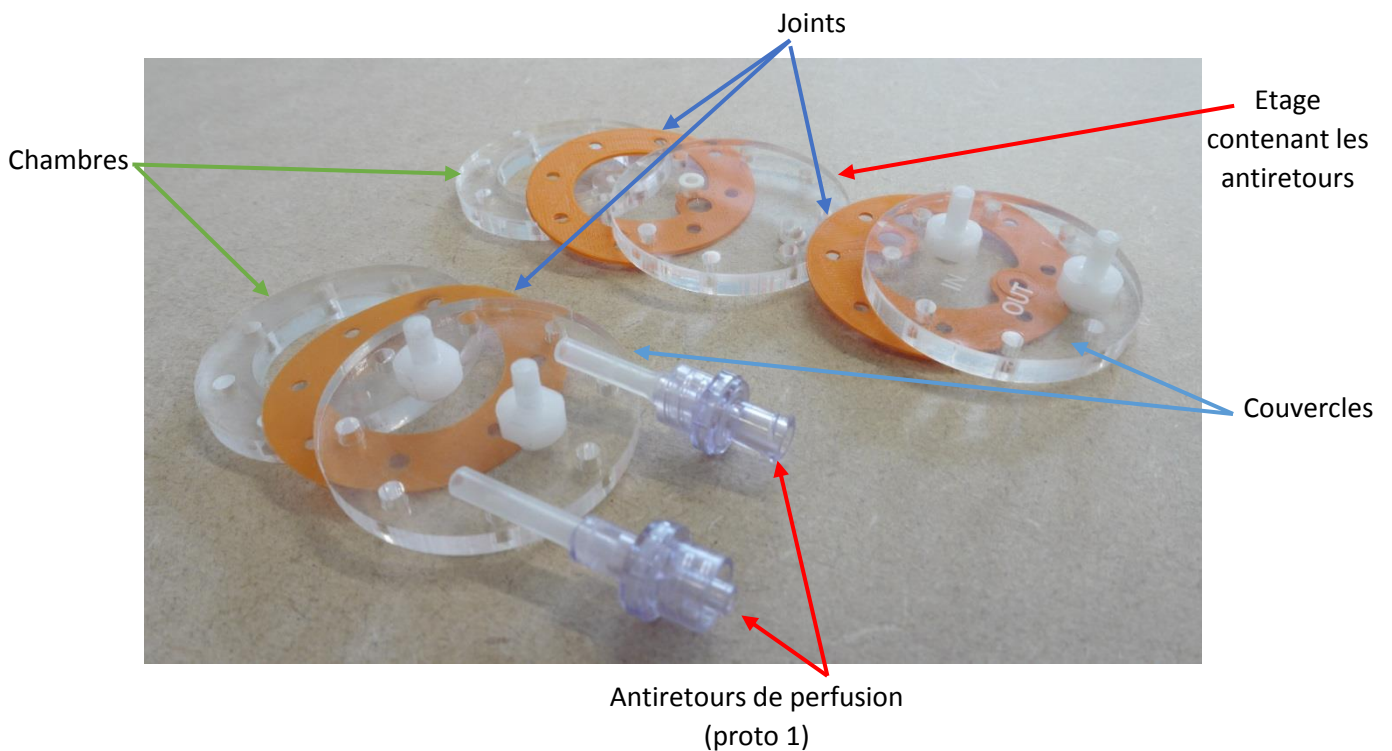
Pour ce projet, le logiciel «OnShape » a été choisi pour le dessin 3D des pièces. Ce choix est justifié par la volonté des créateurs de ce soft à le mettre à disposition de makers. En effet, l'utilisation est gratuite pour les makers, et il est très facile de récupérer les fichiers 3D car ceux-ci sont stockés dans le cloud, et visible par le public.

6.3.2 Pompes

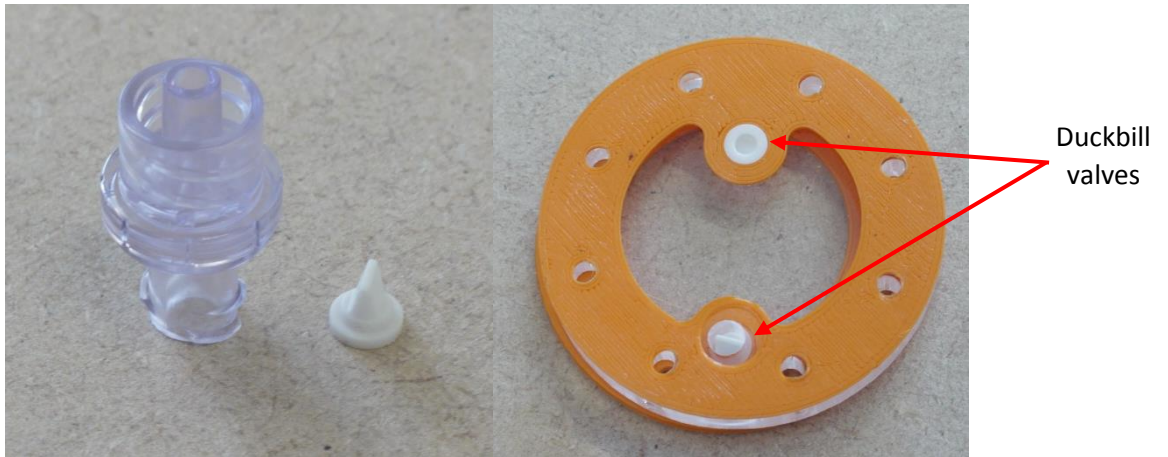


Combinaison de pompes

Le fonctionnement des pompes à membranes est identique à celui présenté sur le premier prototype. Une modification a cependant été apportée : les valves antiretour ont été intégrées directement dans l'empilement de plaques constituant la pompe. Cet ajout, spécifié lors de la modification du cahier des charges, évite toute possibilité de mettre un antiretour à l'envers lors de la mise en place du Pleco avant le travail.



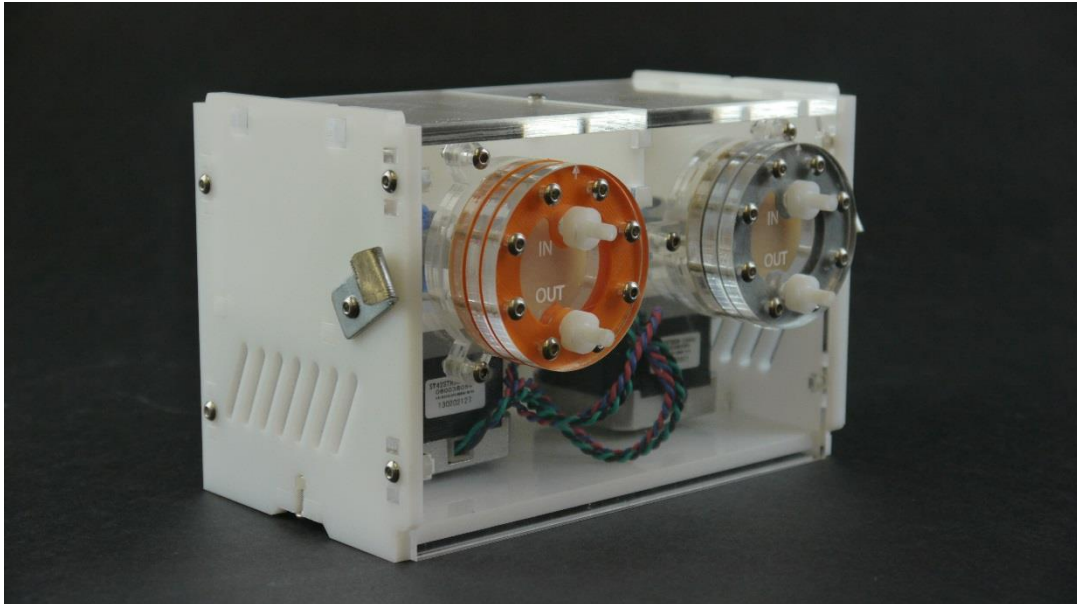
Comparatif entre le corps de pompes du premier proto (en bas) et le corps de pompe final (en haut)



Antiretour de perfusion et duckbill valve

Détail de l'étage antiretour

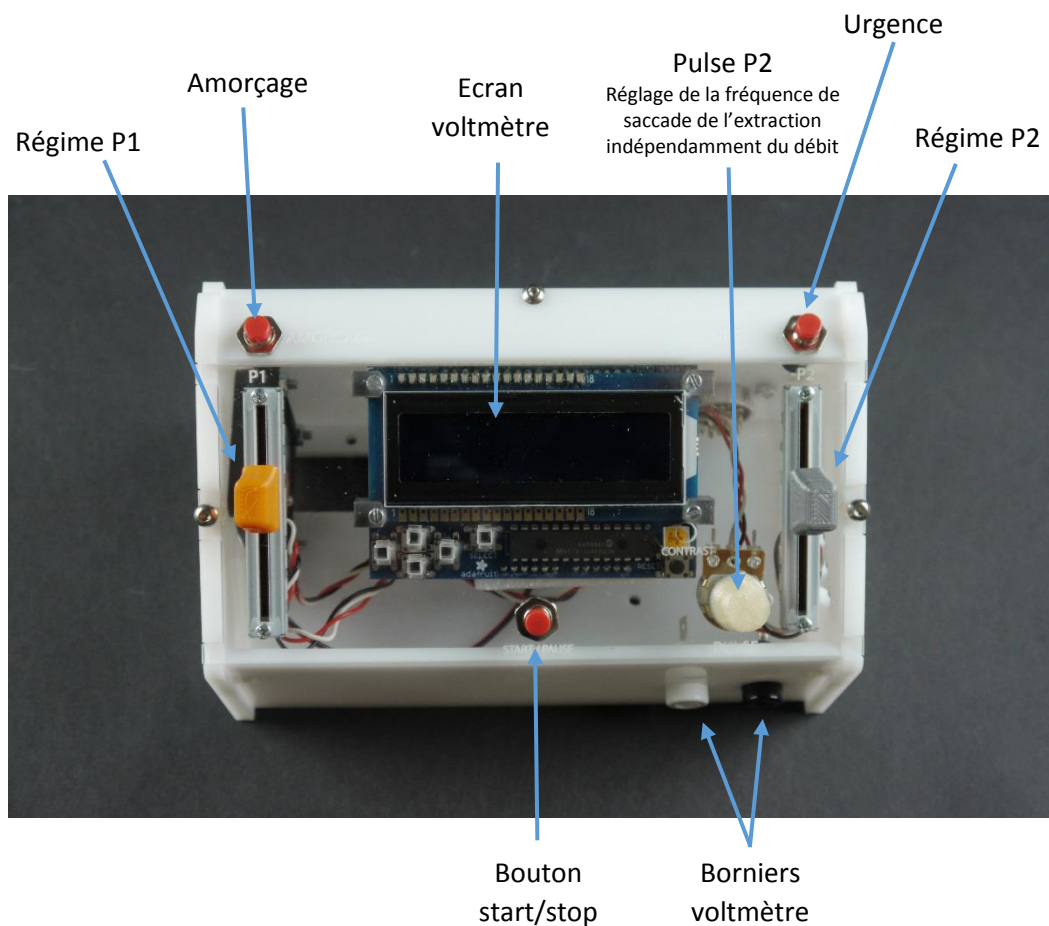
Les duckbill valves utilisées ici proviennent de la société Minivalves dont le siège est au Pays Bas. Ces valves présentent des caractéristiques compatibles avec la pompe : pression d'ouverture de 0.05bar et contrepression admissible de 5bar.



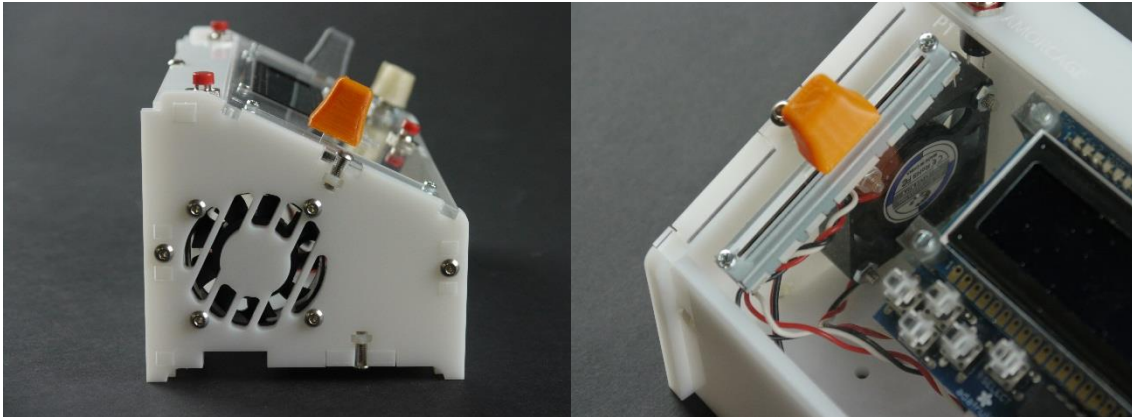
6.3.3 Console de contrôle

La console de contrôle intègre les éléments suivants :

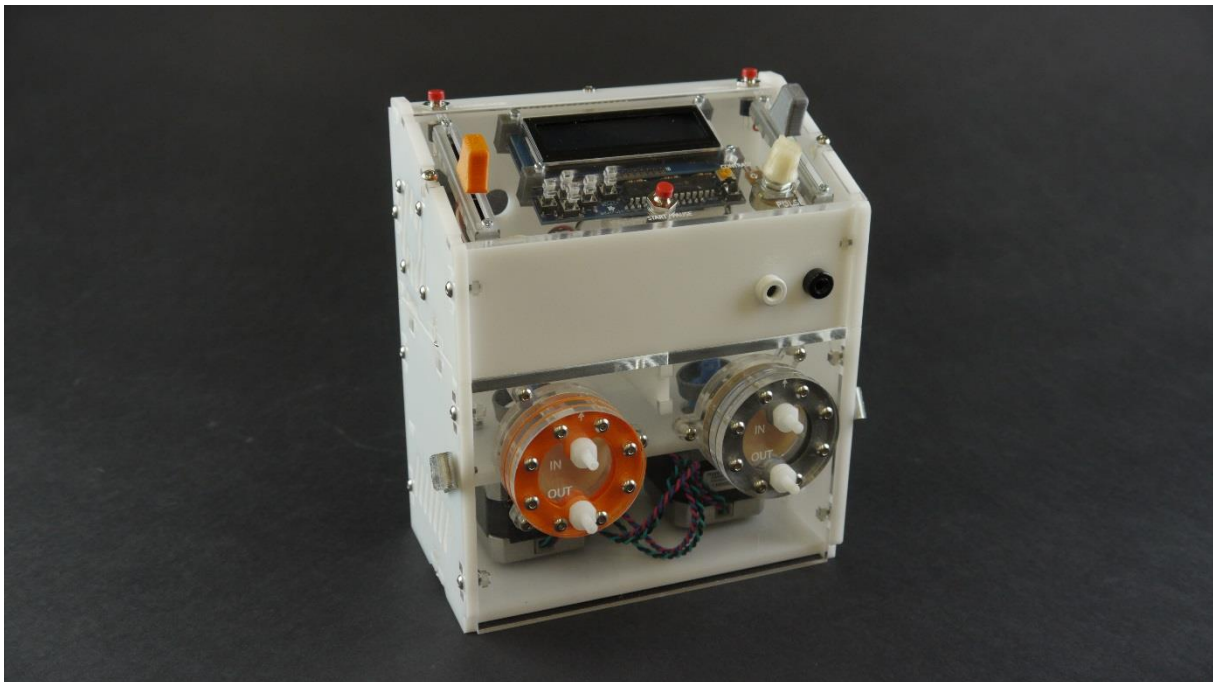
- L'électronique de contrôle des moteurs
- Les éléments d'interaction pour le contrôle des pompes
 - Bouton d'amorçage
 - Bouton de démarrage/arrêt
 - Bouton d'urgence
 - Potentiomètres pour le réglage des débits
- L'écran affichant le potentiel entre la pièce et l'électrode de référence
- Les boutons servant à régler les potentiels de référence
- Les connectiques
 - Puissance (12v venant du transformateur)
 - Connecteur pour les pompes
 - Electrochimie : fiches bananes 4mm blanche pour électrode de ref et noire pour masse



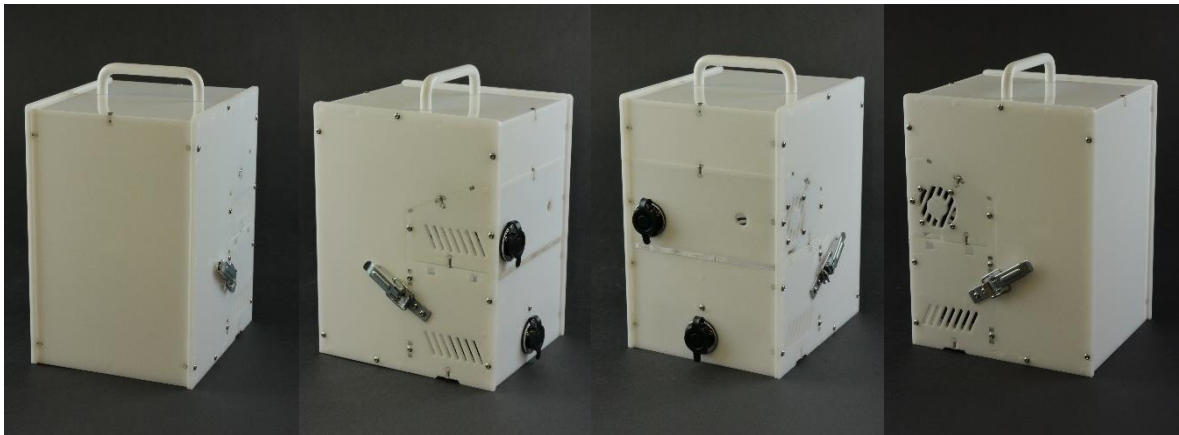
Les contrôleurs de moteurs pas-à-pas chauffent rapidement, et pour les maintenir à température de fonctionnement il faut les ventiler, c'est pourquoi des événements sont creusés sur les flancs de la console. Un ventilateur de 40mm est intégré à la console pour garantir le refroidissement.



La console de contrôle peut être superposée aux pompes si besoin



7.1.1 Le coffret



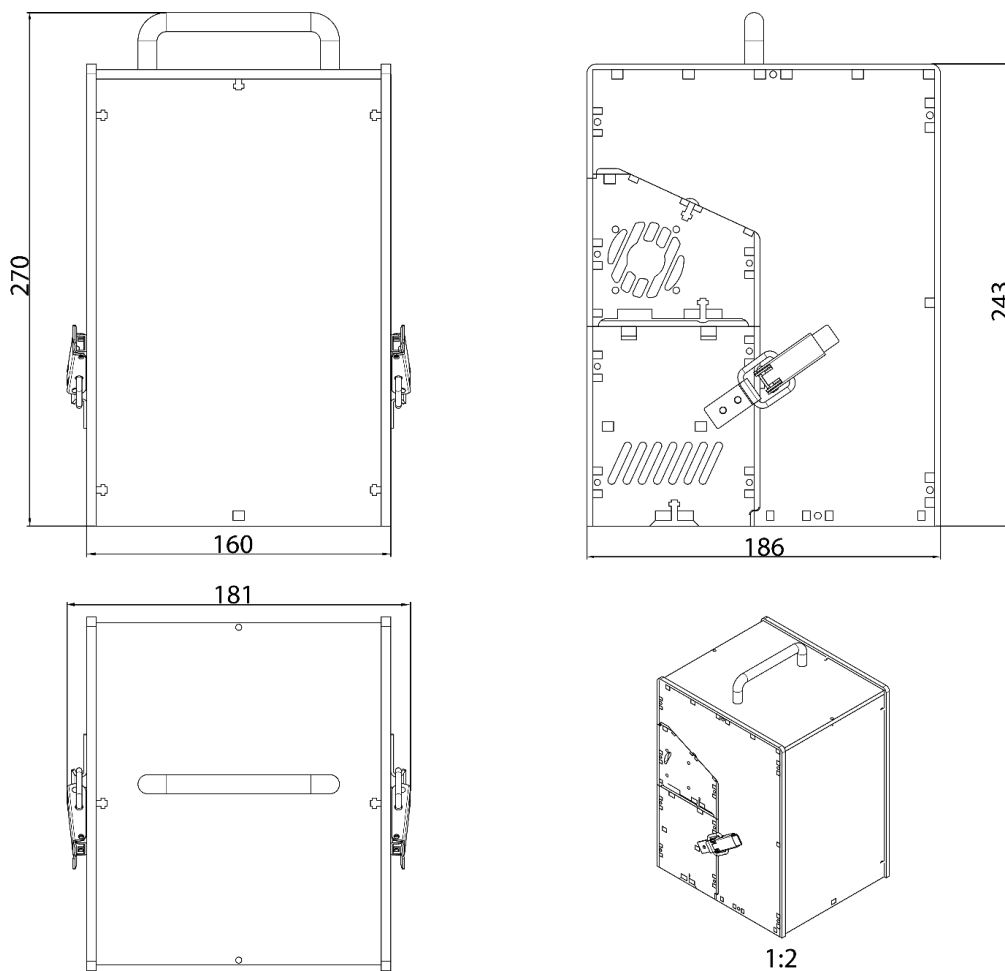
Le coffret s'assemble sur le même principe que les pompes et la console de commande, et intégrera des logements et points de fixations pour ranger le Pleco, le transformateur électrique, une boîte de tampons pour le Pleco, ainsi que le câble électrique reliant les pompes à la console. Le développement de ces espaces de rangement est prévu pour la poursuite du projet de Bachelor après le rendu du rapport.



La fermeture du coffret se fait grâce à deux ferrures standard facilement trouvables dans le commerce. Pour garantir le bon fonctionnement de ces fermetures dites « grenouillères » il faut donner un peu de souplesse à la structure qui les supporte. Pour ce faire, un emplacement pour un pad en caoutchouc est creusé dans les flancs du coffret. Le caoutchouc permettra de garantir l'auto verrouillage des grenouillères.



La poignée de transport est sur ce prototype une poignée de tiroir standard. Cette protubérance empêche l'empilement de boîtes, ce qui est péjoratif pour le stockage. Une réflexion autour d'une poignée escamotable sera menée après le rendu du présent rapport.



Dimensions générales des pompes dans leur coffret

7.1.2 Electronique

La conception de l'électronique ne fait au départ pas partie du cahier des charges de mon projet de bachelors. C'est cependant un point très important, aussi bien pour la conception de la console de contrôle que pour la réalisation de tests réels avec les prototypes futurs. Il a donc paru nécessaire de concevoir rapidement une électronique permettant le contrôle des pompes, en adéquation avec les contraintes ergonomiques mises en avant dans le présent rapport.

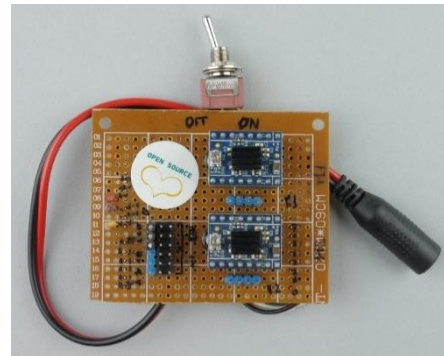
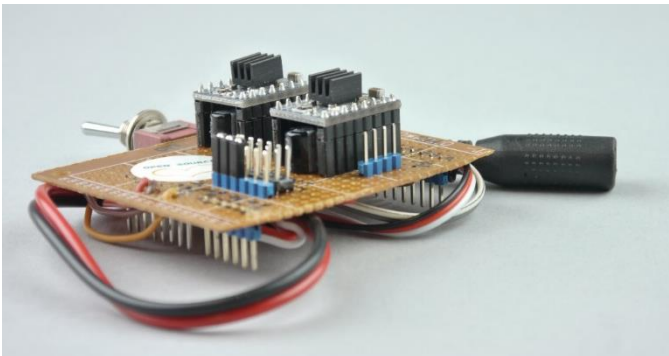
Ce module est divisé en deux parties : la commande et la puissance. La partie commande fait intervenir un microcontrôleur programmable et divers capteurs, boutons et potentiomètres. La partie puissance fait intervenir deux contrôleurs de moteurs pas-à-pas.

La partie commande emploie une carte Arduino Leonardo : le choix de celle-ci est justifié par la simplicité du langage de programmation Arduino, par la facilité à se procurer cette carte, et par le fait que l'ensemble du projet arduino est Open Source. (Datasheet en Annexe B2)

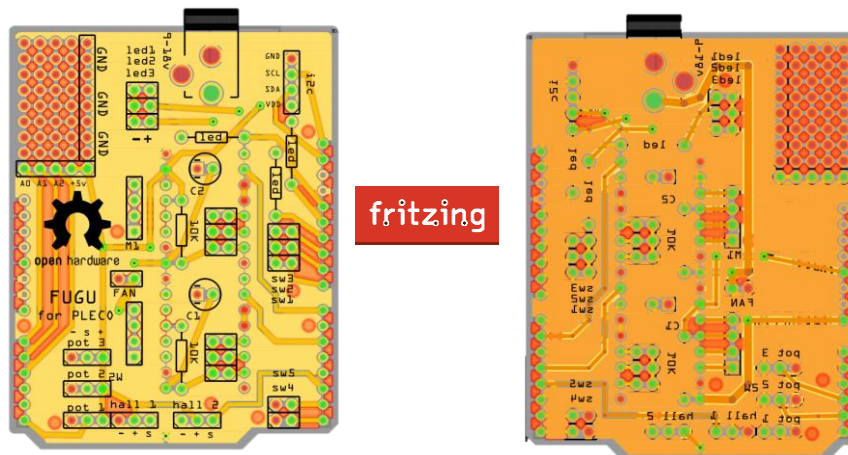


Les contrôleurs de moteurs choisis sont du type Pololu A4988, car ils sont extrêmement faciles à se procurer du fait de leur très large emploi dans les imprimantes 3D. Ils ont de plus un coût très abordable, et font partie du matériel standard trouvé dans un FabLab. (Datasheet en Annexe B3)

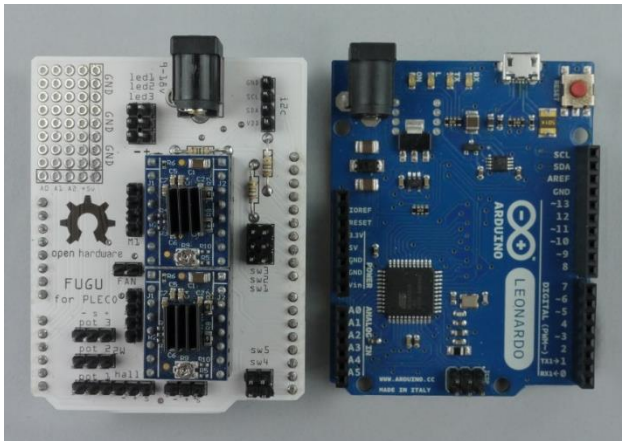
L'interfaçage de la partie commande avec les différents capteurs et la partie puissance demande la création d'un montage électronique. Ce montage a d'abord été réalisé sur une plaque d'essai.



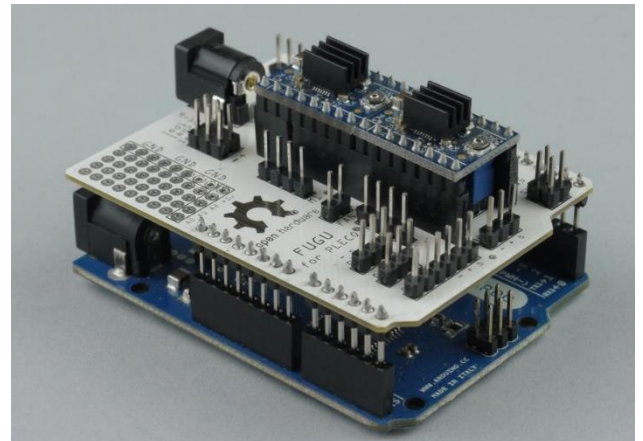
Cette première version a permis de valider le montage, et a servi de base à la création d'une version industrielle du PCB. Le shield (PCB accessoire emboîtable sur un Arduino) a été dessiné sur Fritzing, un logiciel open-source, et produit par Fritzing-Fab, un service de fabrication de PCB à coût faible organisé par les créateurs de Fritzing.



Vue dessus / dessous du PCB conçu avec Fritzing

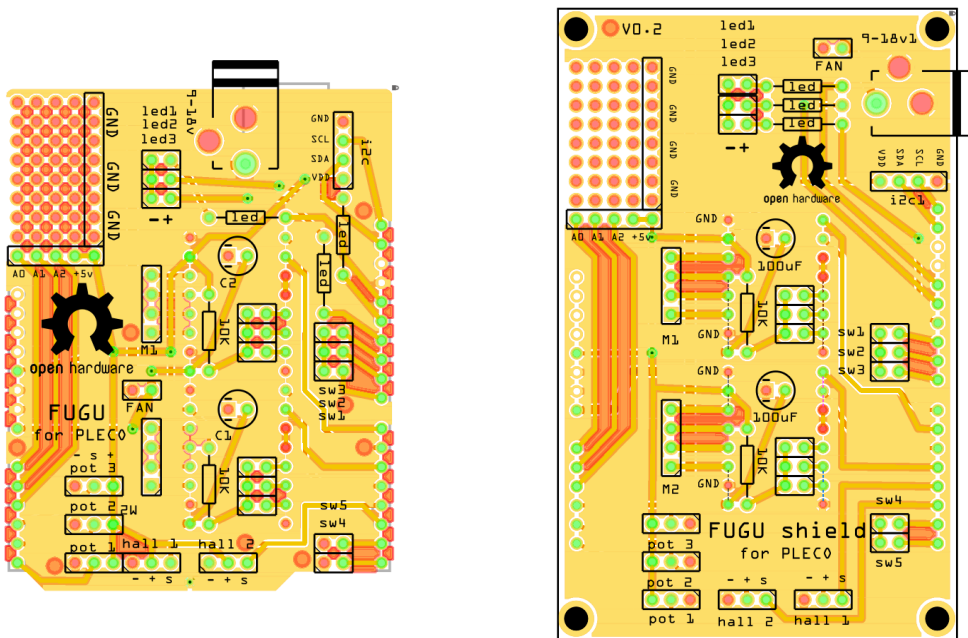


Le shield assemblé à côté d'un arduino Leonardo



Le shield monté sur l'arduino Léonardo

Ce premier shield a permis de valider complètement le choix de l'électronique, cependant il s'est avéré manquer une chose : des points de fixation. Lors de la conception de la console de commande, il a été décidé de modifier le PCB en y ajoutant des trous de fixation.



Shield V0.1 et V0.2 (échelle 1/1)

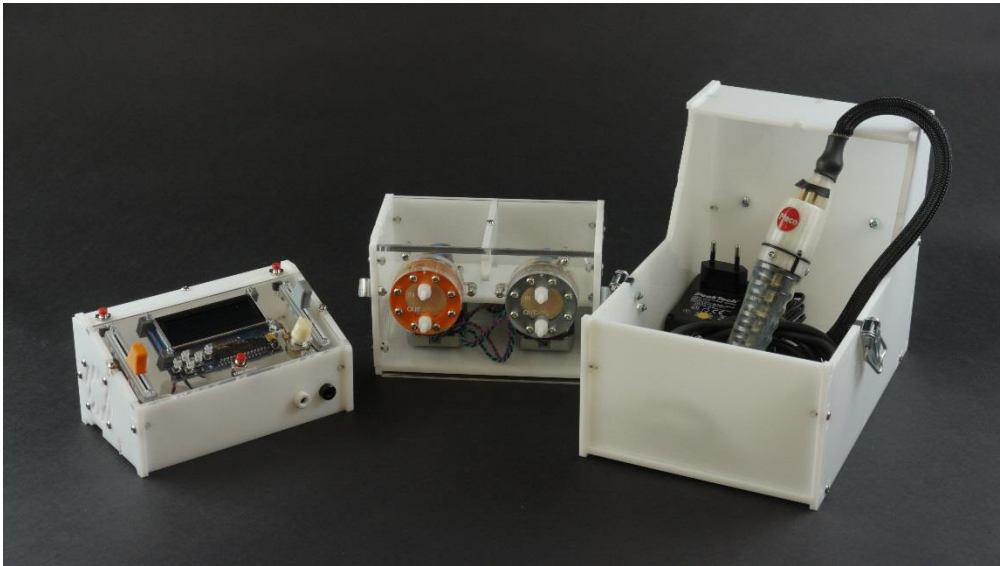
Le nouveau shield est un peu plus grand, mais intègre 4 points de fixation et voit sa prise d'alimentation déplacée pour faciliter l'intégration de l'électronique dans la console de commande.

Dans la perspective de la production d'une petite série, il sera possible d'avoir recours à une entreprise spécialisée dans la production de PCB.

8 Conclusion

8.1 Etat du projet

A la date de rendu du présent rapport, l'avancement du projet remplit les objectifs décrits par le cahier des charges. Un prototype fonctionnel a été réalisé. Les analyses fonctionnelles et anthropo-ergonomiques en début de projet ont permis de bien orienter la conception et de construire un produit au plus proche des utilisateurs. L'objet créé remplit des fonctions qui n'avaient pas été identifiées dans la demande initiale et qui s'avèrent très utiles, comme le coffret permettant le stockage des pompes et du Pleco dans un volume réduit.



8.2 Poursuite

La suite du projet s'articulera autour de la documentation pour la construction des pompes ainsi que sur la fabrication d'une première petite série. L'objectif est de doter le département de conservation-restauration de quelques pompes à présenter lors du prochain workshop de fabrication du Pleco et de proposer aux C-Rs déjà équipés d'un Pleco d'acquérir un kit de pompes. L'utilisation des pompes par ces derniers sera la consécration du travail accompli et permettra l'amélioration du produit par ses utilisateurs.