Lycée de la côtière,
270 Chemin du grand Casset,
01120, la BOISSE, FRANCE.

Région académique
AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

En partenariat avec l'IRSAM (IES les primevères), Sciences à l'École, la fondation Cgénial, et Faites de la science

Projet Interdisciplinaire de Terminale S.SI 2017-2018

EYEPRINT

Comment ouvrir le monde numérique aux malvoyants dans le besoin ?

Groupe :

- Lisa BATTISTINI - TS5
- Bastien BUSSIÈRE - TS5
- Thomas BOISSIN - TS5
- Léo-Nils BOISSIER - TS5

Professeurs référents :

- N. MORENO - Physique
- F. MAZURE - SI

Disciplines concernées

- Sciences de l'Ingénieur
- Physique

LYCEE DE LA COTIERE
270 chemin du Grand Casset - BP 30069
LA BOISSE – 01122 MONTLUEL Cedex
Tél 04 72 25 30 00 – Fax 04 72 25 11 94
Mel : ce.0011826l@ac-lyon.fr

Thème sociétal :

Produire un mécanisme peu coûteux à monter soi-même, qui permette aux malvoyants de fixer une information numérique grâce au système braille aussi bien sur des supports papiers que plastiques.

Contents

I Introduction **1**
A Notre problématique sociétale : la cécité dans le monde . . . 1
B La solution étudiée : l'imprimante braille . . . 1
C Motivations du choix du sujet . . . 2
D Les intérêts du projet . . . 2

II Le TPE de 2016-2017 **3**
A Motivations du TPE . . . 3
B Descriptif du premier prototype . . . 3
C Bilan du TPE . . . 4

III Problématiques techniques **5**
A Introduction . . . 5
B La motorisation . . . 6
C La gestion de la chaleur pour embosser le plastique . . . 6
D La précision . . . 7
E La consommation électrique . . . 7
F La dépression nécessaire pour placer une feuille . . . 8
G L'algorithme d'optimisation . . . 8

IV Démarche expérimentale **10**
A La motorisation . . . 10
B La gestion de la chaleur pour embosser le plastique . . . 12
C La précision . . . 14
D La consommation électrique . . . 15
E La dépression nécessaire pour placer la feuille . . . 16
F L'algorithme d'optimisation . . . 17

V Bilan des expériences **21**

VI Conclusion **22**

Résumé

(fr) : *Le projet que nous souhaitons présenter répond à une préoccupation sociétale qui nous touche particulièrement : la déficience visuelle. Nous avons donc eu la volonté de produire un mécanisme peu coûteux, à assembler soi-même et permettant aux personnes malvoyantes de fixer des informations numériques sur des supports physiques. Ces supports peuvent être papiers comme plastiques et reçoivent l'information grâce au système braille (écriture en relief). Pour cela, nous avons conçu l'Eyeprint, une imprimante utilisant ce système et nous l'avons enrichi de plusieurs fonctions, tout en faisant attention à conserver une ergonomie optimale. En particulier, notre imprimante propose deux modes de fonctionnement, sur papier et sur plastique, pour imprimer des documents, des étiquettes ou des plaquettes. Ce projet en plus d'être engagé socialement, présente de réels intérêts scientifiques. Sa conception fait appel à la fois aux domaines des mathématiques, de la physique, de la mécanique, de l'informatique ou encore de l'électricité.*

Abstract

(en) : *The project we wish to present is an answer to an important social issue we are interested about : visual impairment. Therefore, we had the will to make a low-cost self-assembly mechanism, which allows partially-sighted person to fix digital informations on paper or plastic supports, thanks to the braille system (tactile code). To solve this issue, we designed the Eyeprint, a printer using this system. We also wanted to add functions, while maintaining an optimal ergonomy. Especially, our system has two operating mode: on paper and on plastic, to print documents, labels or platelets. This project presents scientific interests as well. Indeed, the design needs the use of Mathematical, Physical, Mechanical, Electrical and Informatic concepts.*

I. Introduction

A. Notre problématique sociétale : la cécité dans le monde

Dans le monde, il y a 285 millions de malvoyants dont 39 millions sont atteints de cécité totale. Une étude de l'OMS[1] réalisée au niveau international en 2014 montre que la majorité de ces personnes vivent dans des régions en développement : 9 millions en Inde, 6 millions en Chine, 7 millions en Afrique... Dans ces régions, la cécité est un facteur d'exclusion sociale. Cependant, l'arrivée du numérique dans ces régions offre un nouvel espoir d'intégration. Malgré cela, la révolution digitale est loin de tout changer. Même avec de nombreuses innovations, l'accès au numérique reste un défi pour les malvoyants. Il nous tient à cœur de travailler sur la manière dont nous pourrions ouvrir le monde numérique aux malvoyants, afin de lutter contre leur exclusion dans nos sociétés.

B. La solution étudiée : l'imprimante braille

Ayant constaté le problème, nous avons étudié différentes solutions possibles, et nous avons décidé de nous concentrer sur un aspect particulier : l'impression, c'est à dire la fixation durable d'une information numérique sur un support physique. Nous avons donc choisi le système braille (Figure 1), un alphabet en relief permettant de fixer un texte sur du papier. Ce système nous a particulièrement intéressé et nous avons vu en ce dernier un moyen très efficace pour ouvrir le monde numérique aux malvoyants. D'une part, le braille est très connu pour son utilisation par des malvoyants dans le monde entier. D'autre part, le support informatique reste relativement simple d'utilisation, notamment grâce aux commandes vocales qui permettent un accès au monde numérique pour les personnes malvoyantes.

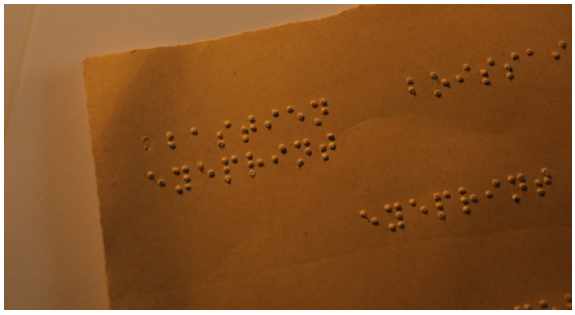

Figure 1 – *Le système braille*

Ayant ainsi concentré notre attention sur le système braille, nous nous sommes rendus à l'IES des primevères, à Lyon, un institut de l'IRSAM qui s'occupe d'enfants malvoyants souffrant de troubles associés. Après avoir rencontré deux enseignantes, nous avons alors défini plus précisément le besoin. Nous avons pu voir le matériel utilisé aujourd'hui, en particulier les machines Perkins(Figure 2), et les plages brailles qui une fois connectées à un ordinateur, affichent dynamiquement une ligne de l'écran en braille en temps réel (Figure 3). Les enseignantes nous ont encouragé à poursuivre notre projet, tout en soulignant les enjeux majeurs de tout dispositif permettant de fixer une information numérique en braille : la précision et dans une moindre mesure, la vitesse.

Figure 2 – *Une machine Perkins*

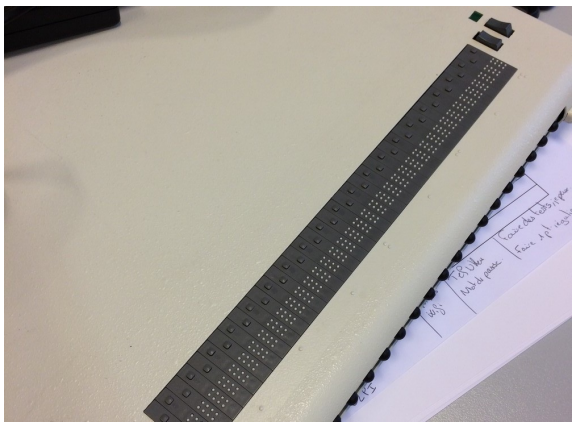

Figure 3 – *Une plage braille pour ordinateur*

Notre attention a donc été retenue par une technologie de plus en plus en vogue : la machine à trois axes. Intégrée dans la plupart des machines industrielles et dans les imprimantes 3D, leur construction devient de plus en plus abordable. Nous avons donc étudié de plus près cette solution pour répondre à notre problématique.

C. Motivations du choix du sujet

Ce sujet a été choisi puisqu'il nous paraît important de permettre à des personnes malvoyantes d'avoir un accès avec un coût limité au monde du numérique. En effet, le côté humain de ce projet est très important pour nous : ouvrir le monde du numérique aux personnes atteintes d'un handicap. Il nous paraît donc primordial que le développement du monde numérique se fasse tout en permettant l'intégration des handicaps. De plus, ce projet nécessite un ensemble de compétences à la fois dans les domaines des mathématiques, de la physique et des sciences de l'ingénieur ce qui nous permet de nous améliorer mais également d'utiliser et de rendre concret ce que nous apprenons en cours.

D. Les intérêts du projet

Nous distinguons trois dimensions majeures dans ce projet présentant des intérêts divers :

- En premier lieu, ce projet est pertinent socialement. Comme nous l'avons justifié dans la sous-section A de cette section, la cécité est un enjeu sociétal actuel et loin d'être résolu. De plus, le monde numérique prend une place telle que l'intersection de deux ces enjeux est certainement pertinente socialement : il y a un réel besoin dans ces domaines.

- En second lieu, ce projet est un défi technologique. La conception, en quelques mois, d'un prototype fonctionnel et répondant aux attentes en terme de précision, de vitesse et de qualité reste un défi de taille.

- Enfin, ce projet pose des questionnements scientifiques dans de nombreux domaines auxquels nous trouvons des réponses par des études théoriques et des démarches expérimentales. Ainsi, nous avons fait appel aux domaines de la thermodynamique, de la mécanique des fluides, de la mécanique classique, de l'informatique théorique, de la géométrie et de l'électricité.

II. Le TPE de 2016-2017

A. Motivations du TPE

Nous nous sommes intéressés au thème de la malvoyance dès la classe de première en TPE et avons monté un premier projet d'imprimante braille. Réalisée en grande partie en bois avec un budget total de 70€, nous avons réussi à imprimer quelques mots. Mais nous avons rapidement remarqué que la vitesse d'impression était plus que problématique : une feuille par heure. Pourtant, lors de notre visite à IRSAM, c'est le manque de précision de notre dispositif qui a été reproché.

B. Descriptif du premier prototype

Notre premier dispositif était réalisé en bois (Figure 4). Il était constitué d'un tiroir pour ajouter la feuille, d'un premier axe sur lequel se déplaçait une plate-forme (Figure 5) support d'un second axe déplaçant l'aiguille (Figure 6), elle même animée par un servomoteur.

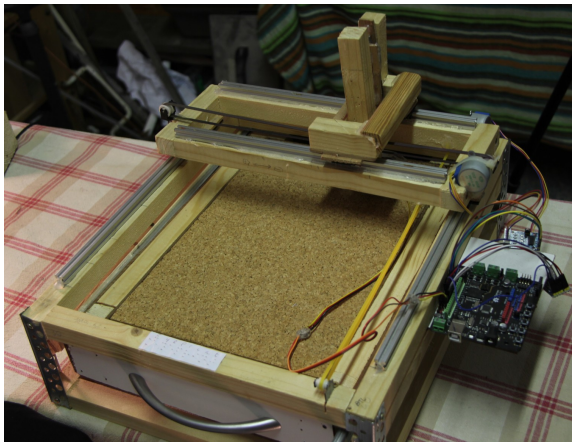

Figure 4 – *La structure du premier prototype*

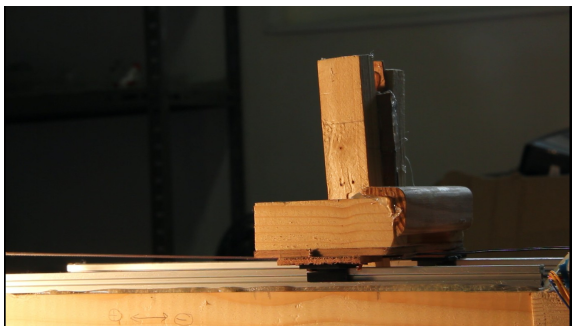

Figure 5 – *La plate-forme supérieure*

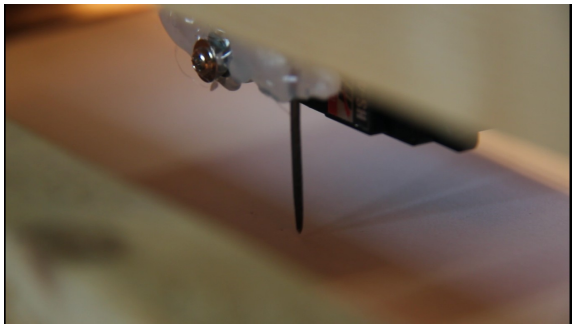

Figure 6 – *L'aiguille animée par le servomoteur*

Ce premier prototype fut dirigé par une carte programmable développée par DFRobot (Figure 7) sur le principe des cartes Arduino. Nous avons programmé cette carte afin de piloter deux moteurs pas à pas (Figure 8) et un servomoteur. Ainsi, la programmation de l'imprimante est passée par deux programmes distincts :

- un programme dans la carte, en C, à l'aide du logiciel Arduino IDE.
- un logiciel de pilotage (Figure 9), permettant la saisie du texte, le calcul et la vérification du trajet, développé en C# à l'aide de l'IDE Visual Studio de Microsoft.

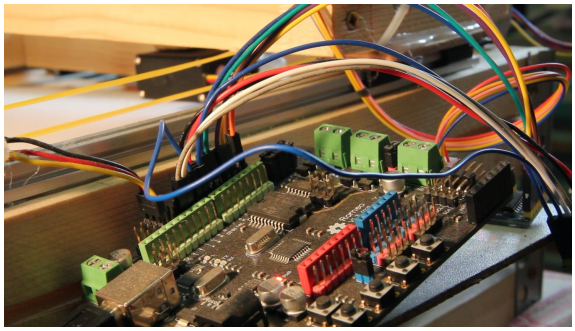

Figure 7 – *La carte programmable*

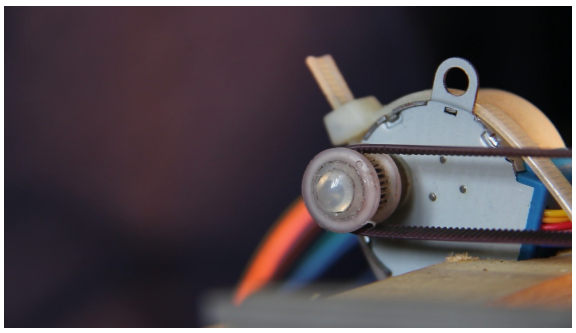

Figure 8 – *L'aiguille, animée par le servomoteur*

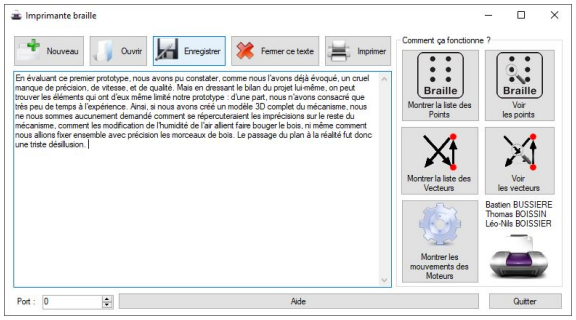

Figure 9 – *Le logiciel de pilotage*

C. Bilan du TPE

En évaluant ce premier prototype, nous avons pu constater, comme nous l'avons déjà évoqué, un manque de précision considérable de vitesse et de qualité. Mais en dressant le bilan du projet lui-même, on peut trouver les éléments qui ont d'eux-mêmes limité notre prototype : nous n'avons consacré que très peu de temps à l'expérience. Ainsi, si nous avons créé un modèle 3D complet du mécanisme (Figure 10), nous ne nous sommes aucunement demandés comment se répercuteraient les imprécisions sur le reste du mécanisme, ni comment les variations de l'humidité de l'air allaient déformer les matériaux, ni même comment nous allions fixer ensemble avec précision les morceaux de bois. Le passage du plan à la réalité fut donc une triste désillusion.

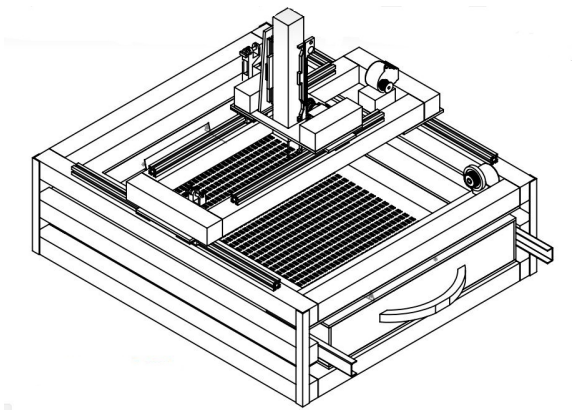

Figure 10 – *Le modèle 3D du premier prototype*

Si nous pouvons tirer une leçon de ce premier projet, c'est clairement l'importance d'une démarche expérimentale afin de percevoir tous les enjeux de chaque partie du système.

Pour le prototype de cette année, nous nous fixons comme objectifs :

- une fréquence d'impression de 6 caractères par minutes
- une puissance maximale de 50 W
- une imprécision maximum de 0.2 mm
- un prix de fabrication de 250€ maximal (hors main-d'œuvre)

III. Problématiques techniques

A. Introduction

Cette année en terminale, nous avons recréé une équipe avec Lisa Battistini, Bastien Bussière, Thomas Boissin et Léo-Nils Boissier et nous avons décidé de reprendre notre problématique et de retravailler notre solution, en organisant notre travail en six phases.

1. Une **phase de problématisation**, pour vraiment cerner les enjeux du sujet et pour comprendre les contraintes que devra satisfaire notre solution.

2. Une **phase de conception**, où nous faisons des choix techniques, où nous décidons du matériel, de l'assemblage...

3. En parallèle à cette phase de conception, nous ajoutons une **phase de modélisation**. Chaque partie du mécanisme est réfléchie et analysée, pour prédire son comportement par des arguments scientifiques.

4. À l'issue de la phase de modélisation chaque comportement prédit est soumis à l'expérience. C'est la **phase expérimentale**. Nous imaginons donc des démarches expérimentales permettant de valider ou de réfuter nos modèles.

5. Lorsque les phases précédentes nous ont menés à la certitude que chaque partie du système allaient fonctionner, nous commençons à assembler l'imprimante. C'est la **phase de construction**.

6. Enfin, la machine étant construite, c'est la **phase de validation** : L'imprimante respecte-t-elle les contraintes imposées ?

Ainsi, si une modélisation du projet a été faite (Figure 11 et Figure 12), celle-ci n'est pas le centre du projet cette année, ce n'est qu'un fil conducteur soutenu par de nombreuses démarches expérimentales.

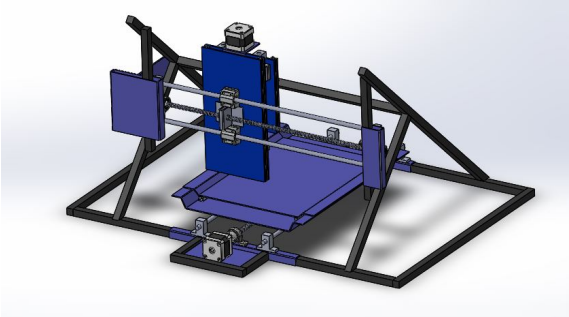

Figure 11 – *Le nouveau modèle 3D*

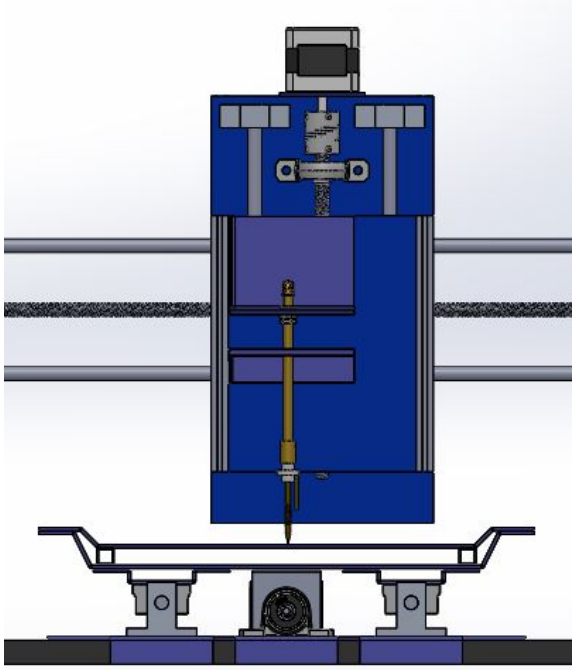

Figure 12 – *Vue de détail : l'aiguille*

Dans ce dossier, nous ne nous étendrons pas sur les trois premières phases, et nous ne présenterons que les résultats de celles-ci. En effet, la synthèse des phases de problématisation et de conception qui ont été rédigées en annexe, occupe une quinzaine de pages et chaque modélisation représente une démonstration pouvant donner lieu à un article à

part entière. Nous allons donc concentrer notre attention dans ce dossier sur les intérêts scientifiques, en particulier expérimentaux de ce projet.

Pour cela, nous présenterons rapidement dans cette section III les enjeux scientifiques de ce projet et justifierons les questionnements posés par les différentes parties du mécanisme. Puis, dans la section IV, nous expliquerons la démarche expérimentale suivie pour répondre à ces questionnements ainsi que les résultats, expérience par expérience. Afin de faire part aussi des problèmes rencontrés, nous évoquerons dans la section VI le déroulement du projet.

B. La motorisation

Pour effectuer l'impression nous avons besoin de déplacer les plate-formes pour positionner l'aiguille puis ensuite l'actionner. Les solutions techniques adoptées pour réaliser ces deux fonctions sont donc des moteurs (Figure 13). Il s'agit donc dans cette partie de définir les moteurs qui doivent être utilisés. Mais comment les choisir au mieux ? Il y a plusieurs critères à prendre en compte pour la sélection des moteurs, ce qui donne lieu à de nombreuses expérimentations. Ici, nos démarches vont donc s'axer sur trois intérêts principaux : la caractérisation des frottements, la détermination de la force nécessaire pour percer une feuille ainsi que la définition du couple nécessaire pour vaincre le poids de la plate-forme.

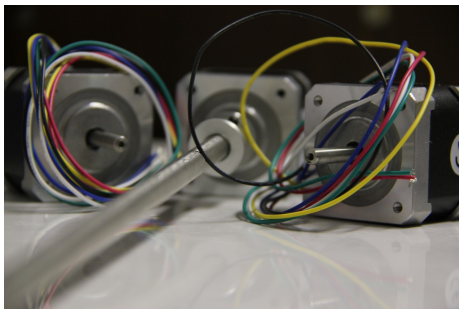

Figure 13 – *Les moteur pas à pas*

En effet, le but du premier moteur vertical est de fournir l'énergie nécessaire pour permettre à l'aiguille de venir percer la feuille de papier lors de sa descente. Ce même moteur lors de la remontée de l'aiguille doit vaincre le poids de la plate-forme. De plus, il doit compenser les pertes causées par les frottements. Cette première expérience est donc primordiale pour déterminer le couple moteur utile minimum.

Un ensemble constitué de deux autres moteurs a pour but de mettre en mouvement les différentes plates-formes pour déplacer et positionner l'aiguille par rapport à la feuille dans un repère plan correspondant à la surface de celle-ci. Ici, ces moteurs effectuent des mouvements horizontaux seulement. Il n'ont donc qu'une seule force à vaincre, celle des frottements liés aux différents axes : rails et vis sans fin - écrou.

Ainsi, il parait donc nécessaire d'étudier les forces de frottements de ces dispositifs afin de trouver quel couple doit être fourni par les trois moteurs.

C. La gestion de la chaleur pour embosser le plastique

En plus d'améliorer les différentes caractéristiques du prototype, nous désirons cette année mettre en valeur de nouvelles fonctionnalités et en particulier la prise en charge de plusieurs supports : papiers et plastiques. La prise en charge de l'impression sur plastique pourrait permettre de fabriquer des plaquettes informatives (pièces, prix, directions) en faveur des malvoyants.

Mais pour conserver une certaine précision dans l'impression sur plastique, nous devons maîtriser parfaitement la température au bout de pointe. Elle doit en effet être de l'ordre de grandeur de la température de fusion du plastique, voire légèrement inférieure. Pour

connaître au mieux cette répartition de température dans l'embout, un modèle numérique a été conçu par la méthode des éléments finis, prenant en compte la production d'énergie thermique par effet joule, la conduction dans la pointe, et la convection avec l'air ambiant. Nous avons aussi été confrontés à l'équation de la chaleur, que nous avons démontré, mais qui a débouché sur des équations aux dérivées partielles au delà de notre niveau :

$$\frac{P}{\rho C_m} = \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho C_m}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{1}$$

Nous avons donc décidé de nous limiter à une étude numérique (Figure 14) à confirmer par l'expérience. L'expérience nous permettra de trouver les paramètres d'un modèle numérique par l'étude des grandes parties de la pointe et la modélisation nous permettra d'en déduire la température à l'extrémité de la pointe.

Figure 14 – *Résultat de l'étude numérique*

En effet, nous ne pouvons pas accéder directement à la température en bout de pointe, car la zone est très petite, et la précision de nos mesures trop faible.

D. La précision

En ayant fait tester notre braille issu de l'imprimante de l'année dernière, nous nous sommes rendu compte qu'il n'était pas lisible au toucher. Nous avons donc vu en quoi les différents jeux présents sur les composants ainsi que le fait de combiner ces jeux pourrait avoir une influence sur la précision. La rigidité de la structure du système (Figure 15) a été également étudiée pour voir si elle avait ou non une influence sur la précision de perçage de l'aiguille.

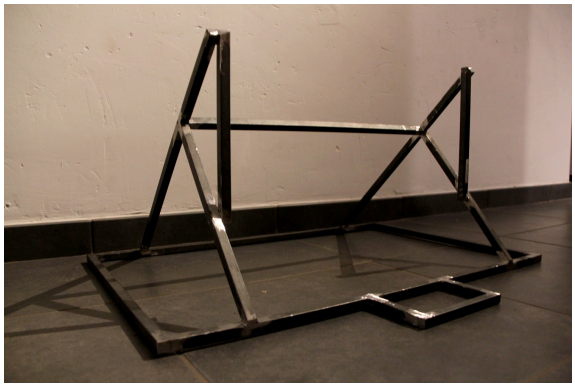

Figure 15 – *La structure en acier*

E. La consommation électrique

Comme tout système électrique, notre système a besoin d'une énergie électrique fournie par un générateur ou encore par une prise branchée sur le secteur. Nous nous sommes alors demandés s'il était possible de faire fonctionner notre système à l'aide d'une batterie. En effet, cela permettrait de pouvoir transporter l'imprimante tout en continuant une impression. Cette batterie pourrait également être utile pour des personnes n'ayant que peu accès à l'électricité (présence d'un groupe électrogène par exemple). Ces personnes pourraient alors charger leur batterie et continuer leurs impressions au moment où elles le souhaitent et où qu'elles soient. Voici

pourquoi nous étudions également la puissance utile à notre système et le type de batterie qui serait utile à son autonomie.

F. La dépression nécessaire pour placer une feuille

Cette année, après avoir pointé les faiblesses du prototype précédent, l'équipe s'est mise d'accord pour améliorer l'autonomie du système. Pour réaliser ceci, une nouvelle fonction nous a paru évidente : la gestion du papier.

Après avoir étudié plusieurs solutions, nous sommes arrivés à un système de trois bacs (Figure 16). Chacun de ces bacs possède un rôle spécifique :

- le premier bac sert à stocker les feuilles vierges, permettant à l'utilisateur de lancer une impression volumineuse sans avoir à se mobiliser à chaque changement de feuilles.
- le second, mobile, est le lieu où l'impression est réalisée. Avec plusieurs moteurs et des patins, on maintient la feuille.
- le dernier bac accueille les feuilles embossées, facilitant l'accès à l'utilisateur pour récupérer le résultat de son impression.

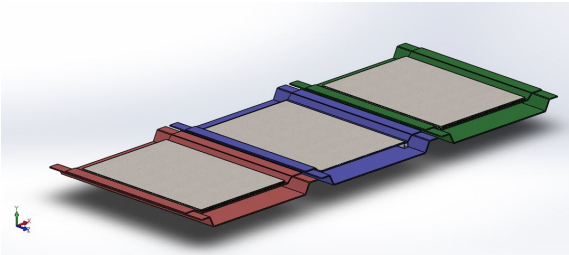

Figure 16 – *Les trois bacs*

Cependant, un problème subsiste : comment manipuler une feuille d'un bac à l'autre ? Nous avons choisi d'utiliser un ventilateur pour déplacer la feuille dite "active". Le principe que nous souhaitons utiliser est celui énoncé par Boyle en 1662 [2] concernant la pression de l'air. Ainsi, nous voulons créer une dépression entre la feuille et le ventilateur. Grâce à elle, la feuille va être plaquée sous celui ci et tenir comme montré en Figure 17 .

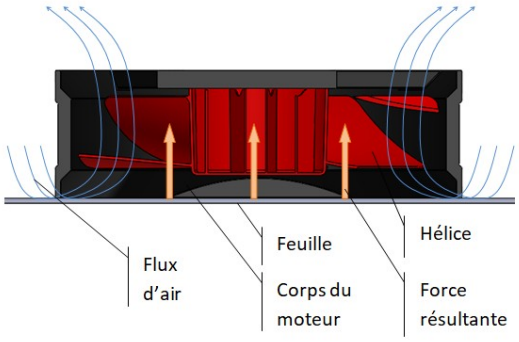

Figure 17 – *Schéma du dispositif de maintien de la feuille*

Une feuille a certes un poids relativement faible mais quand il est question de dépression et de soulèvement, il n'est pas si négligeable. De ceci, nous nous en sommes très vite aperçus après quelques brefs tests : un petit ventilateur n'était pas suffisamment puissant pour soulever la feuille. Il a fallu s'intéresser plus précisément au choix des caractéristiques de notre ventilateur, et de les vérifier par une démarche expérimentale. La compréhension fine de la dépression à créer est donc nécessaire.

G. L'algorithme d'optimisation

L'utilisateur ayant entré son texte dans le logiciel, celui-ci est converti en une liste de points, c'est à dire une liste de paires de nombres (x, y). Mais l'aiguille, que ce soit dans le premier ou dans le second prototype ne perce qu'un seul trou à la fois. Elle reste donc lente. Pour accélérer le processus, nous avons changé la vitesse (les moteurs) mais nous pouvons aussi raccourcir le trajet... au maximum. Il s'agit donc de trouver le plus court che-

min entre n points. Ce problème est bien connu en informatique théorique et en mathématique combinatoire : c'est le **problème du commis voyageur**. Il existe un algorithme qui permet de trouver une solution *relativement satisfaisante* (Figure 18) en un temps raisonnable. Cet algorithme a été développé par Nicolas Christofides en 1976[3] s'appuyant sur des résultats de Kruskal[4] et Lawler[5]. Il pourrait donc être une solution très intéressante.

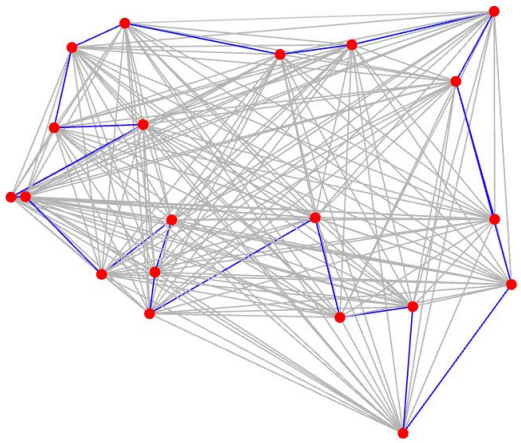

Figure 18 – *Exemple de solution*

Cependant, cet algorithme est très complexe à implémenter, et nous nous sommes retournés vers un algorithme plus simple : l'algorithme du plus proche voisin. Partant d'un point, on choisit le point suivant comme le plus proche du point en cours et on parcourt ainsi toute la matrice. Il faut un nombre d'opérations proportionnel au carré du nombre de points pour parcourir toute la matrice n fois, avec n le nombre de points, et on peut améliorer le résultat en partant de tous les points possibles, soit n fois plus. La vitesse d'exécution, c'est a dire le nombre d'opérations, est donc un polynôme de degré 3 du nombre de points. Ainsi, si on a le temps d'exécution T, on a :

$$T \leq an^3 + bn^2 + cn + d \qquad (2)$$

Nous ne pouvons pas comparer de manière théorique ces approximations avec la solution réelle, et nous allons donc tenter une approche expérimentale.

Notons que ces valeurs de complexité sont purement théoriques et nous devons donc étudier plus profondément cette question en réalisant des expériences sur un grand nombre de cas. [1]

[1] Si certains refuseraient alors l'adjectif d'expérimental à ce type de démarche, on remarquera en particulier que le philosophe Jean Lassègue remet en cause ce que nous appelons communément "expériences" et en rappelle la définition première : "L'expérience, dans les deux aspects que je viens de dégager, est alors la source d'une autorité et c'est dans la mesure où cette autorité est, en droit, accessible à tous qu'elle peut intéresser le scientifique."[6] En ceci, même l'expérimentation informatique est expérimentale.

IV. Démarche expérimentale

A. La motorisation

a Expérience A.1 : la force nécessaire pour percer la feuille

Dans cette expérience, nous devons déterminer quelle est la force nécessaire pour percer la feuille avec précision. En effet, il ne s'agit pas de trouer la feuille mais simplement de venir déformer le papier, pour l'embosser légèrement. Pour déterminer la force nécessaire pour embosser le papier nous avons placé une feuille de papier de 150 g/m^2 sur un support en liège. Ce dernier est posé sur une balance. Nous avons placé la balance sur un support élévateur. Ensuite, nous avons fixé l'aiguille à la verticale au dessus de la feuille de papier grâce à une potence, comme en Figure 19.

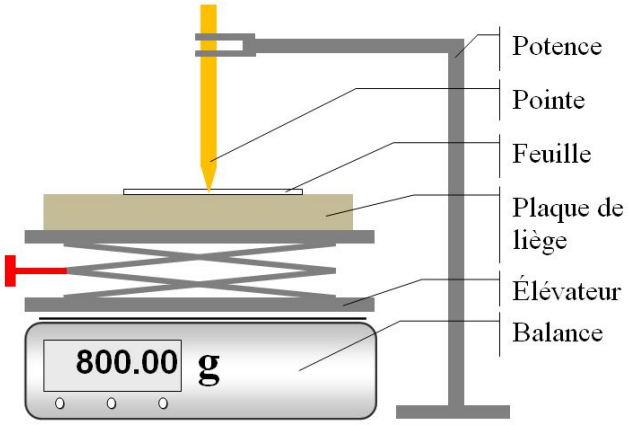

Figure 19 – *Schéma de l'expérience de la balance*

Sa réalisation en Figure 20 nous a permis de simuler le perçage. Peu à peu, nous avons fait remonter le support élévateur et donc l'ensemble composé de la balance, de la plate-forme en liège et de la feuille. En remontant ce système, nous avons mis en appui l'aiguille sur le papier et donc simulé plus lentement un embossage. Puis nous enregistrons la masse maximum obtenue juste au moment du perçage de la feuille.

Figure 20 – *Expérience de la balance*

Pour trouver cette force, nous avons réalisé 20 mesures à la suite. En effet, pour des questions de précision, il était nécessaire de reproduire l'expérience afin d'établir un domaine avec les forces maximales et minimales. Ce domaine est visible entre les deux axes horizontaux en pointillé sur la Figure 21 qui sont placés sur les valeurs minimales et maximales mesurées. Nous pouvons donc déterminer le couple que doit fournir le moteur pour venir embosser la feuille. On relève donc une force pour percer la feuille qui doit être entre 5 et 9 Newton.

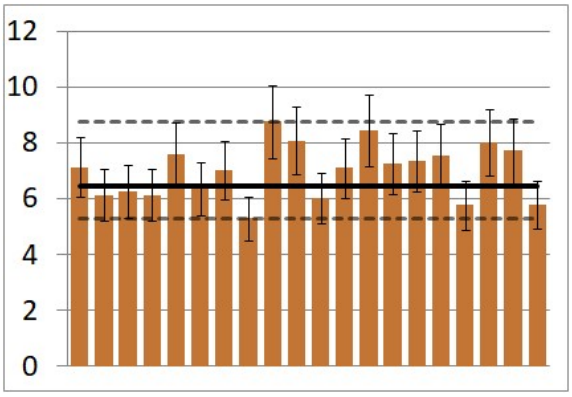

Figure 21 – *Force nécessaire pour percer la feuille en Newton pour chaque mesure, avec le minimum, le maximum et la moyenne*

b Expérience A.2 : les frottements sur les rails

Pour quantifier les frottements sur les rails de guidage, on utilise la loi de Cou-

lomb [7] et on cherche à déterminer le coefficient de frottement f entre une barre en acier et un roulement à billes linéaire. Pour trouver ce coefficient de frottement, nous avons placer le rail (la barre en acier) à l'horizontal entre deux supports élévateurs, puis nous avons lentement augmenté la hauteur de l'un des deux supports afin de pouvoir trouver à partir de quel angle le roulement à billes est en glissement sur le rail. Puis grâce à une analyse de la photo avec le logiciel GeoGebra Figure 22 on détermine précisément l'angle. On peut donc avoir le coefficient de frottement en fonction de l'angle grâce à la formule :

$$f = \tan(\phi) \tag{3}$$

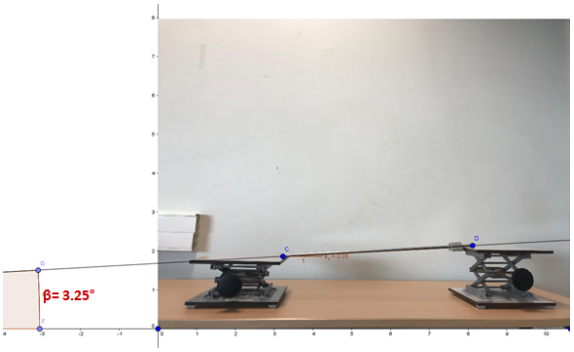

Figure 22 – *Frottements entre les rail en acier et les roulements à billes linéaires*

Grâce à l'analyse de la photo nous avons pu déterminer que l'angle d'inclinaison $\phi = 3,26°$. Donc en appliquant la formule $f = \tan(\phi)$ on trouve que f vaut 0,005. Les frottements qui ont lieu entre les axes et les roulements linéaires à billes sont donc négligeables.

c Expérience A.3 : les frottements le système vis-écrou

Dans cette expérience, il s'agit d'identifier et de mesurer les frottements qui ont lieu entre la vis et l'écrou. Pour pouvoir les déterminer, nous allons qualifier et quantifier les pertes liées aux frottements. En effet, établir la quantité d'énergie perdue par frottement nous permet d'établir le rendement de ce système vis-écrou. Pour cela nous avons placé la vis à la verticale ne pas avoir de vitesse initiale. Pour déterminer l'énergie cinétique nous avons besoin de la vitesse de mouvement de la masse établie sur l'expérience Figure 23 avec un pointage vidéo sur le logiciel Latis pro.

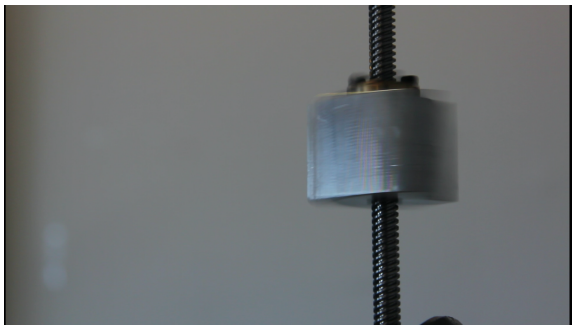

Figure 23 – *Écrou en rotation autour de la vis*

Il faut donc déterminer l'énergie cinétique et prendre en compte la rotation de la masse (ici l'écrou) avec la formule :

$$E_c = \omega^2 \times \frac{1}{2} \int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{\frac{-l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} m(f(x,y,z,\Delta))^2 d_x d_y d_z$$

On détermine ensuite l'énergie potentielle de pesanteur avec : $E_{pp} = mgz$. Enfin, nous pouvons obtenir le rendement grâce au rapport $\frac{E_c}{E_{pp}}$, on a donc $\eta = 0,14$.

d Bilan

Pour conclure cette partie sur la motorisation qui a pour but de déterminer les caractéristiques des moteurs à choisir, en particulier les couples à fournir, on peut donc appliquer une analyse de la chaîne d'énergie :

$$C = \frac{p \times F}{2\pi \times \eta}$$

Une étude du poids de la plate-forme permet d'affirmer qu'il faut une force de 4 N pour contenir la descente, entre 1 et 5N pour percer la feuille et 4 N pour relever la plate-forme. Pour répondre au besoin précis de l'embossage de feuille,

le moteur doit fournir un couple entre 9.1 N.mm et 45.5 N.mm. Et ceci pour l'axe vertical. Pour l'axe horizontal, il suffit de vaincre les frottements, donc les couples sont bien moins forts. Afin de conserver une marge, notamment si le rendement venait à évoluer et si nous devions pousser des accélérations non négligeables, nous avons donc choisi des moteurs à 250 N.mm.

B. La gestion de la chaleur pour embosser le plastique

a Expérience B.1 : mesure par caméra thermique

Afin de valider le modèle qui nous fournit des simulations en un certain nombre de points, nous avons décidé d'utiliser une caméra thermique. Nous plaçons donc l'embout permettant l'embossage[2] sur une potence et plaçons à une vingtaine de centimètres la caméra thermique. Nous faisons la mise au point sur l'aiguille et mettons l'alimentation en marche. Puis, nous prenons des mesures toutes les 10 secondes pendant 10 minutes. Finalement, nous relevons la température ambiante.

Figure 24 – *Mesure par caméra thermique*

Une fois les images récupérées (Figure 25), nous repérons le régime stationnaire, c'est a dire le moment où la répartition des températures ne change plus, par l'instant où les images ne changent plus. On analyse alors une image prise durant le régime stationnaire et on trace 5 segments le long de la pointe, parallèles les uns aux autres et centrés sur l'axe de l'aiguille. Pour donner une plus grande fidélité aux données, on rapporte les données des 5 segments sur le segment central en faisant la moyenne de ceux-ci. On compare alors avec le modèle prédit.

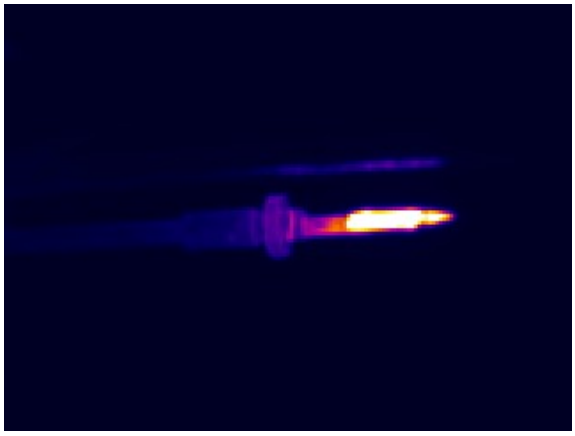

Figure 25 – *Exemple d'image*

Nous avons donc fait la mesure, avec une puissance de 4 W, et avons obtenu 5 séries de données. En faisant la moyenne de ces séries, nous avons obtenu une courbe, mais qui reste très séquencée. Nous avons procédé alors à un lissage par moyennes des 7 valeurs consécutives. Nous avons donc obtenu la courbe bleue en Figure 26.

Sur ce graphique (Figure 26), on voit également la courbe rouge, qui représente la prédiction du modèle numérique. On voit que si la courbe est assez fidèle pour l'extrémité de la pointe, la valeur expérimentale chute brusquement sous la valeur prédite quand on s'en éloigne. Cela s'explique notamment par la liaison entre les différentes parties de la pointe. Cependant, on a bien la fin de la pointe qui est connue. En effet, si la mesure chute, c'est simplement en raison du fait que l'on passe de la pointe à l'air et que la résolution de la caméra étale cette transition sur plusieurs points. Ainsi, le modèle confirmé pour

[2] alimenté en 4 W (5 V et 0.8 A) grâce à une alimentation stabilisée

les valeurs centrales permet de prédire les valeurs aux limites.

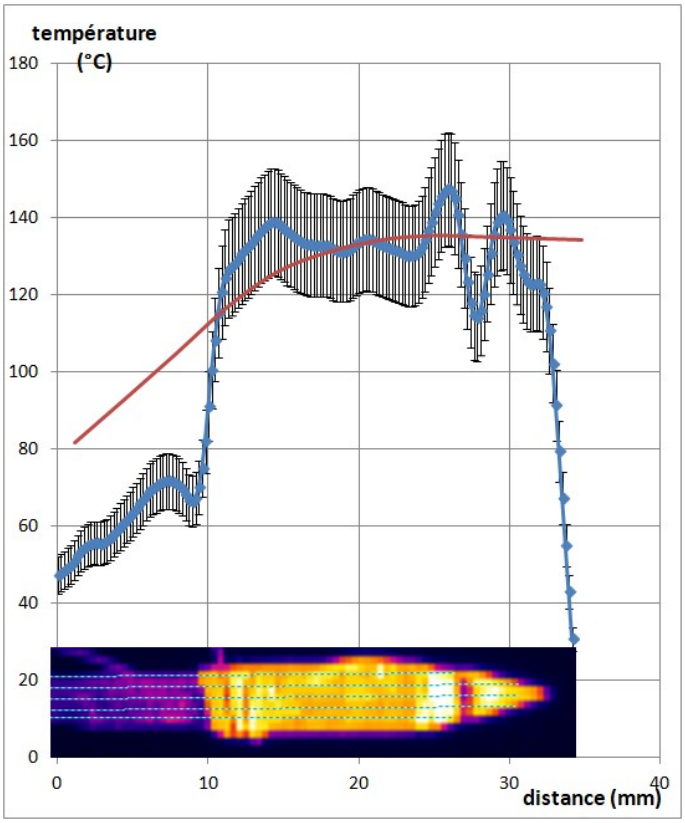

Figure 26 – *Courbe présentant la température en surface de la pointe en fonction de x, théorique en rouge et expérimentale en bleu.*

En calculant les valeurs au bout de la pointe entre 0 et 10 W, le modèle que nous avons validé par l'expérience pour une valeur particulière (4 W) nous donne une loi générale : la température au bout de la pointe en régime stationnaire est une fonction affine de la puissance électrique envoyée :

$$T = 28,597P + 21,918$$

b Expérience B.2 : mesure de la température de fusion idéale

Connaissant ainsi la loi liant la puissance à la température au bout de la courbe, on peut évaluer, connaissant la température nécessaire à l'embossage plastique, les grandeurs électriques à fournir. Cependant, établir cette température n'est pas simple. Prendre une température trop élevée ferait complètement fondre le plastique. Une température trop faible ne permettrait rien. Il faut trouver une température adéquate pour déformer le plastique sans le percer.

On remarque en particulier que cela dépend beaucoup du plastique choisi. N'ayant pas encore fait ce choix, nous ne pouvons donc pas avoir de résultats. Néanmoins, nous savons comment déterminer cette température.

Nous chauffons une étuve à une certaine température et plaçons la plaque à l'intérieur, sur une grille. Nous avons placé un poids, de 100 g (1 N) posé sur une plate-forme constituée de 4 pointes. Puis, nous avons évalué le résultat pour différentes valeurs de la température de départ. Le montage est présenté en Figure 27.

Notons que l'on préchauffe l'étuve et le poids, mais pas la plaque.

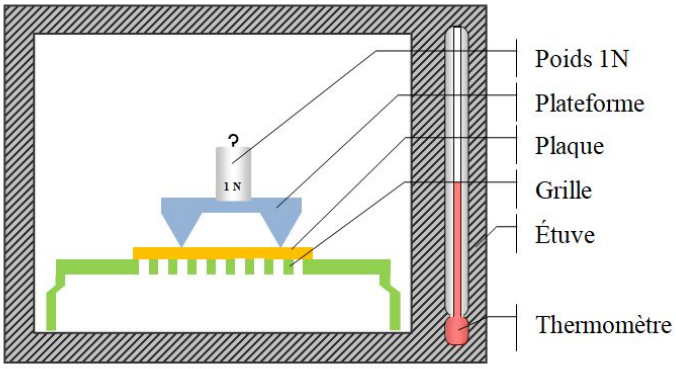

Figure 27 – *Schéma du dispositif expérimental*

En menant à bien cette expérience, nous pourrons ainsi déterminer la valeur de le température la plus efficace pour l'embossage.

C. La précision

a Expérience C.1 : mesure des jeux entre les rails et leurs roulements et ceux de la vis

Pour déterminer quelle peut être l'imprécision de perçage dans la feuille causée par les différents jeux des composants du système, nous allons tout d'abord procéder à une détermination de données en mesurant différents composants.

En premier lieu, nous avons étudié les jeux possibles entre les rails et leurs roulements. Pour cela, nous avons effectué plusieurs mesures pour déterminer le plus précisément possible nos données. A l'aide d'un pied à coulisse nous avons donc fait des mesures sur le montage présenté en Figure 28, le diamètre du rectangle gris correspondant au rail **D' = 8.00mm**, la hauteur de la cale marron **C = 5.23mm**, la hauteur de la sortie en rouge **B = 6.86mm** ainsi que la longueur horizontale **F** nécessaire au rail pour toucher la cale. A l'aide de ces données, on peut donc trouver **A = 1604.26mm** et la longueur au bout duquel le rail va toucher le sol. Grâce au théorème de Thalès et à la trigonométrie, on trouve :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) = 0.24^{\circ}$$

(en vert) pour ensuite déterminer le diamètre de sortie du roulement, avec le jeu grâce a cette formule :

$$Diamtre = \arctan(\alpha) \times (cw)$$

(écart entre les rectangles rouges). Avec ce diamètre, nous pouvons alors trouver l'écart avec celui du rail. On trouve alors un angle de 0.24°, soit un jeu de 0.15mm.

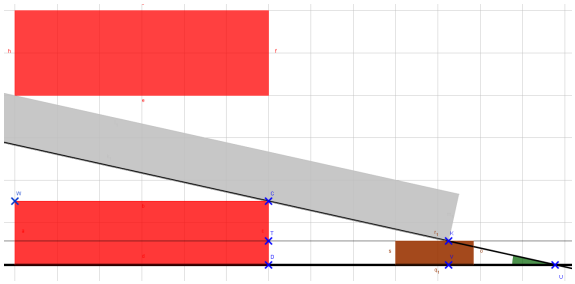

Figure 28 – *Modélisation géométrique des jeux*

Pour déterminer si les jeux peuvent être réduits, par trigonométrie, on détermine que l'angle formé par la combinaison dépend principalement de l'écartement des rails. On obtient alors la courbe Figure 29. On détermine donc une position pour laquelle les jeux s'annulent.

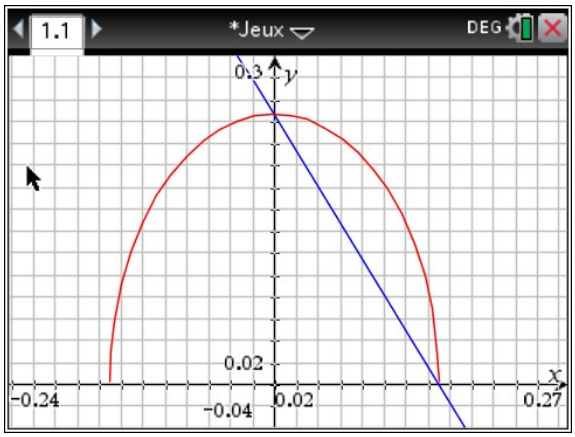

Figure 29 – *Les jeux dans le plan des axes (en bleu) et dans un plan perpendiculaire à celui-ci (en rouge)*

Pour les jeux possibles entre la vis et son écrou, nous avons procédé de la même manière pour trouver le jeu de rotation de la vis. Nous avons en effet pu constater que le jeu de translation n'était quasiment pas mesurable. Nous l'avons donc considéré comme négligeable. On trouve alors un angle de 0.27°mais celui-ci ne sera pas pris en compte car il ne pourra pas être atteint puisqu'il est supérieur à ce que les rails autorisent.

b Expérience C.2 : mesure de la rigidité de la structure

Nous allons donc étudier quelle est l'influence du poids sur la structure en acier. Nous avons donc créé un modèle volumique à l'aide d'un logiciel de simulation de forces : Solidworks. A l'aide de ce logiciel, nous pouvons constater si la structure se déforme sous l'effet du poids ou d'une force que l'on viendrait ajouter sur la structure représentée en Figure 30. Pour expérimenter cela, nous avons alors placé des poids différents sur la structure. En arrière de cette structure nous avons placé une règle pour pouvoir faire nos calculs d'échelle pour l'écart trouvé. Enfin, nous avons posé un appareil photo fixe devant la structure. Nous avons donc pris différentes photos avec des poids différents en l'occurrence 10 kg (entourés en rouge sur la Figure 31).

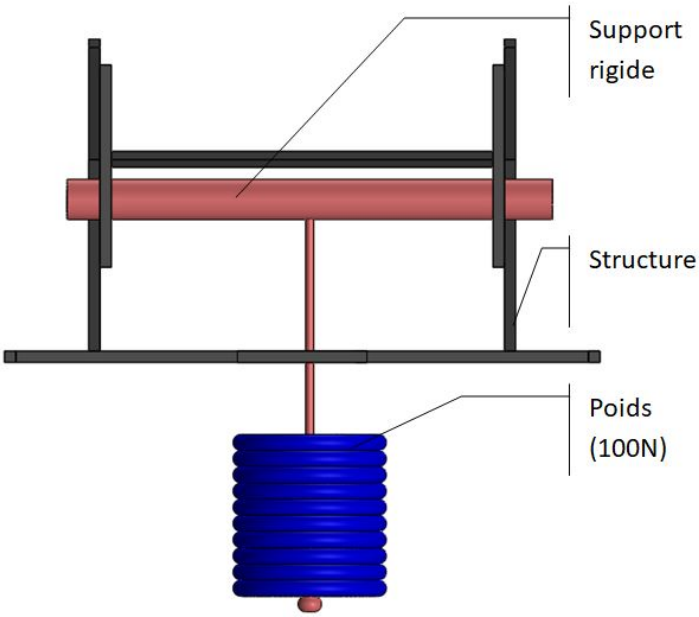

Figure 30 – *Schéma du montage d'évaluation de la rigidité de la structure*

Après avoir étudié les photos avec et sans poids, nous avons pu constater que la structure ne se déformait pas (visiblement) comme on peut le voir sur la Figure 31. Ce résultat est intéressant car il peut attester de la solidité et de la rigidité de la structure. Le poids n'aura donc pas d'influence sur la précision de perçage car il n'y a pas de risque que la structure se déforme.

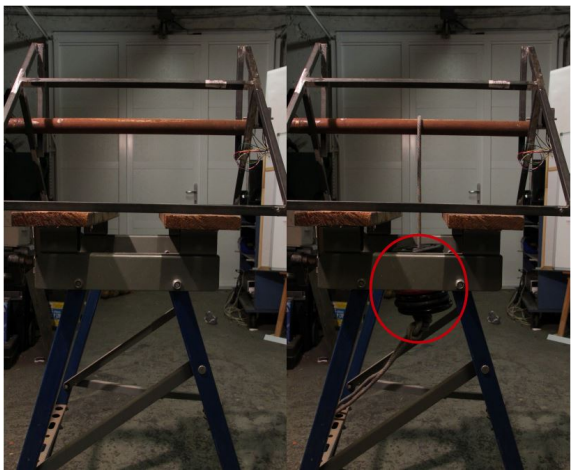

Figure 31 – *Expérience sur la rigidité de la structure*

D. La consommation électrique

Déterminer quelle est la consommation électrique d'un système est un enjeu nécessaire pour pouvoir faire fonctionner le système sur une batterie. C'est aussi important pour des raisons économiques, le prix de fonctionnement ne doit pas être excessif.

a Expérience D.1 : mesure des puissances consommées par le système

La puissance consommée par les différents moteurs va être l'un des principaux besoin d'énergie. Nous avons pour cela déterminé la puissance nécessaire aux moteurs pour fonctionner. Nous avons donc à l'aide d'un générateur 24 V fait fonctionner les moteurs pas à pas et mesuré les grandeurs utiles au fonctionnement à l'aide d'un oscilloscope. Plusieurs couples sont alors appliqués aux différents moteurs comme 50 N.mm pour le moteur de l'aiguille (déterminé dans l'expérience A.1) pour reproduire leurs efforts en marche. On trouve alors une

énergie totale :

$$E = P \times \Delta t$$

La puissance nécessaire à l'aiguille pour chauffer et ainsi permettre de faire fondre le plastique est le besoin le plus fort en énergie du système. Mais on peut proposer l'alternative suivante : en cas de puissance nécessaire trop élevée, ne pas faire fonctionner le système en mode "embossage plastique". Nous étudierons néanmoins les puissances nécessaires à l'embossage des plaques. Cette puissance dépend de la température nécessaire à l'aiguille pour faire fondre le plastique. Dans l'étude de cette puissance nous avons déterminé qu'environ 4 W étaient requis.

Avec ces énergies, on peut alors chercher la batterie nécessaire utile pour faire fonctionner l'imprimante pendant une impression entière. Nous espérons donc obtenir une énergie la plus faible pour pouvoir fournir une batterie à moindre coût avec le système.

E. La dépression nécessaire pour placer la feuille

Le but de cette partie est de déterminer les limites de notre ventilateur et de vérifier si elles ne sont pas dépassées lors de son utilisation. Dans notre système, la seule force opposée à la trajectoire du trajet de la feuille est le poids lors du déplacement horizontal. D'après la deuxième loi de Newton, le Principe Fondamental de la Dynamique [8] , il faut que notre ventilateur exerce une force de sens opposé et de même intensité.

Figure 32 – *Ventilateur soulevant une feuille*

Pour ce faire, nous avons recherché sur internet et sur différents paquets de feuilles le grammage propre à chaque type de feuilles. En multipliant ce grammage par la surface du format, nous sommes arrivés à déterminer la masse d'une feuille plus précisément qu'en utilisant une balance. A partir de cette masse et de la surface des différents ventilateurs, nous en avons déduit la dépression qui serait nécessaire. Ainsi, après cette série de calculs nous avons pu choisir notre ventilateur avec une plus grande sérénité : nos critères étaient précis. Nous avons ensuite étudié expérimentalement les limites de ce ventilateur. Pour cela, nous avons augmenté petit à petit le poids d'une feuille, en collant des bouts de papier journal dessus, afin d'avoir une meilleure précision. En plaçant un sac d'un volume connu de l'autre côté du ventilateur, nous avons pu calculer à la fois le débit en divisant ce volume par le temps et la dépression nécessaire, en fonction du poids de la feuille..

Pour expérimenter ceci en rapport aux lois de Boyle, nous réalisons le montage suivant :

1. Brancher le ventilateur à sa tension nominale (12 V) et ajouter un interrupteur au circuit, puis l'ouvrir grâce à ce dernier.
2. Fixer un sac de volume connu (100 L minimum) du côté du ventilateur par lequel l'air sort.
3. Placer le ventilateur proche de la feuille que nous voulons soulever.
4. Fermer le circuit à l'aide de l'interrupteur. Ré-ouvrir le circuit quand le sac est plein. Constater.

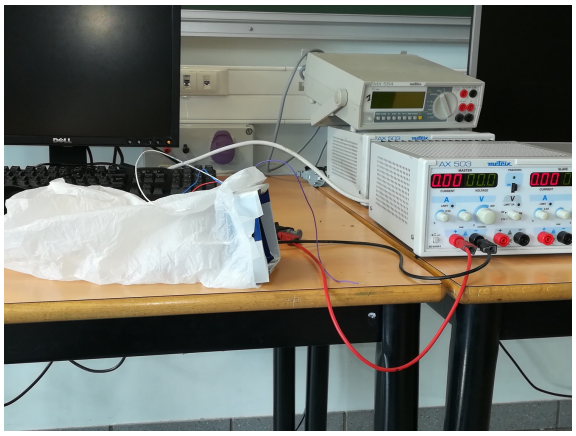

Figure 33 – *Expérimentation du débit en fonction de la dépression*

Grâce à ce montage, nous pouvons mesurer plusieurs choses : le débit volumique, qui est un volume en fonction du temps, mais aussi la dépression aux bornes du ventilateur, qui, d'après la relation :

$$\delta P = FxS,$$

est fonction du poids de la feuille (la surface d'aspiration S est constante). En mettant en application plusieurs fois ce dispositif en augmentant petit à petit le poids la feuille, jusqu'à ce que celle-ci ne soit plus soulevée, nous pouvons donc déterminer les limites du ventilateur.

Après cette expérience, nous nous sommes rendus compte de plusieurs choses :

- Premièrement, le débit est inversement proportionnel à la dépression
- Deuxièmement, si notre ventilateur possède une limite en terme de poids de feuille soulevée, nous ne la dépasserons pas dans le cadre d'une impression.
- Troisièmement et dernièrement, nous avons remarqué que notre ventilateur avait un débit d'air assez élevé : à pleine puissance, sans dépression, il est supérieur à 21 L par seconde : il ne faudra donc pas fermer complètement notre structure, car les feuilles "non actives" risqueraient de s'envoler et faire dysfonctionner notre imprimante.

F. L'algorithme d'optimisation

a Les algorithmes testés

Pour étudier la performance algorithmique, nous avons donc implémenté trois algorithmes. Le premier, très rapide, consiste simplement à tracer le chemin entre les points dans l'ordre où ils sont ajoutés. Le second classe les points lignes par lignes, allant dans un sens puis dans l'autre. Le dernier parcourt l'ensemble des points, en passant de chaque point à son plus proche voisin non déjà contenu dans l'ensemble ordonné créé. C'est l'algorithme du plus proche voisin. Dans cette version, on exécute l'algorithme du plus proche voisin de tous les points de départs possibles. Une étude théorique montre que le nombre d'opérations à faire est proportionnel à n^3, avec n le nombre de points à percer.

L'algorithme témoin, très lent mais donnant la solution exacte, consiste à parcourir tous les chemins possibles, et à trouver le plus court. Pour améliorer cet algorithme, on peut ajouter une fonction arrêtant d'explorer un chemin ou un groupe de chemins, si ceux-ci deviennent plus longs que les approximations données par les autres algorithmes.

Ayant programmé ces 4 algorithmes pour un texte en particulier, on appelle chaque algorithme sur une portion croissante du texte (1 caractère, puis deux, puis 3...). On observe alors la longueur de chaque solution et le temps d'exécution de chaque algorithme en fonction du nombre de points.

b Conditions des expériences

Afin de rendre l'expérience reproductible, il nous faut préciser les conditions de celle ci. L'ordinateur utilisé a une mémoire vive totale installée (RAM) de 6.00 Go, un processeur Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU @ 1.70GHz, 2401MHz, 2 cœurs et 4 processeurs logiques.

Figure 34 – *Un processeur intel i5*

c Expérience F.1 : qualité absolue des solutions

Nous avons réalisé l'expérience en premier lieu sur un petit texte de quelques mots. L'algorithme prend entre 1 et 6 lettres au hasard, applique les algorithmes et donne leurs solutions. Il répète ainsi 50 tirages. Cette étude sur des petits cas nous a donc mené à une première courbe d'efficacité de nos algorithmes en terme de qualité de solution.

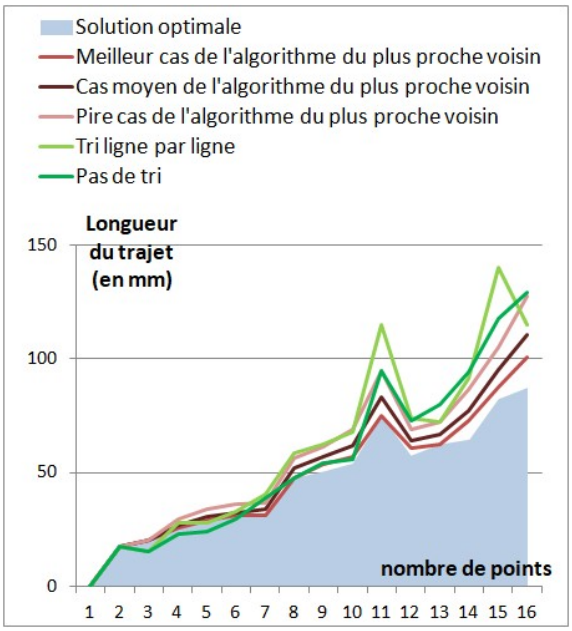

Figure 35 – *Courbe présentant la longueur moyenne du chemin calculé par différents algorithmes*

Cette limite de six mots est imposée par la vitesse de l'algorithme naturel. Au delà d'une quinzaine de points, le temps exigé dépasse plusieurs dizaines de minutes.

Ainsi, en faisant la moyenne des longueurs des chemins obtenus, on obtient la courbe en Figure 35. Sur cette courbe, en bleu, nous avons la solution optimale. On voit alors que les autres algorithmes restent un peu au dessus de cette solution. Pour savoir réellement dans quelle proportion, il faudrait étudier des cas plus grands. Malheureusement, les résultats de la seconde expérience nous en empêchent.

d Expérience F.2 : vitesse de l'algorithme naturel

L'algorithme naturel est l'algorithme qui explore tous les chemins. Le nombre de calcul est fonction de $n!$, c'est à dire de $1 \times 2 \times 3 \times ... \times n$. C'est très vite très grand, comme on peut le voir sur la courbe des résultats de la seconde expérience, en Figure 36.

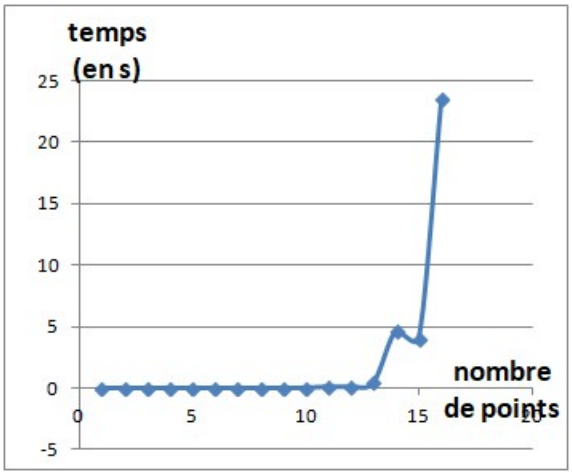

Figure 36 – *Courbe présentant le temps d'exécution de l'algorithme naturel en fonction du nombre de points*

Ainsi, il n'est pas possible de calculer la solution optimale, pas même pour une expérience, dès que le nombre de points dépasse la quinzaine. Ce problème est en fait tout l'enjeu de la recherche en informatique théorique. Résoudre un problème est souvent simple. Le résoudre rapidement est toujours plus complexe. Nous allons donc être contraints d'utiliser une approximation plus rapide. Nous allons donc mener des expériences sur celles-ci.

e Expérience F.3 : qualité des solutions des algorithmes d'approximation

Si l'on ne peut calculer la solution optimale, on peut cependant comparer les différentes solutions. Nous avons donc créé un programme parcourant un texte de 1300 points à percer. Le programme applique les 3 algorithmes (tri, pas de tri et plus proche voisin) à chaque portion du texte entre 1 et 1300 points. Ainsi, nous avons une courbe des longueurs des chemins calculés en fonction du nombre de points (Figure 37).

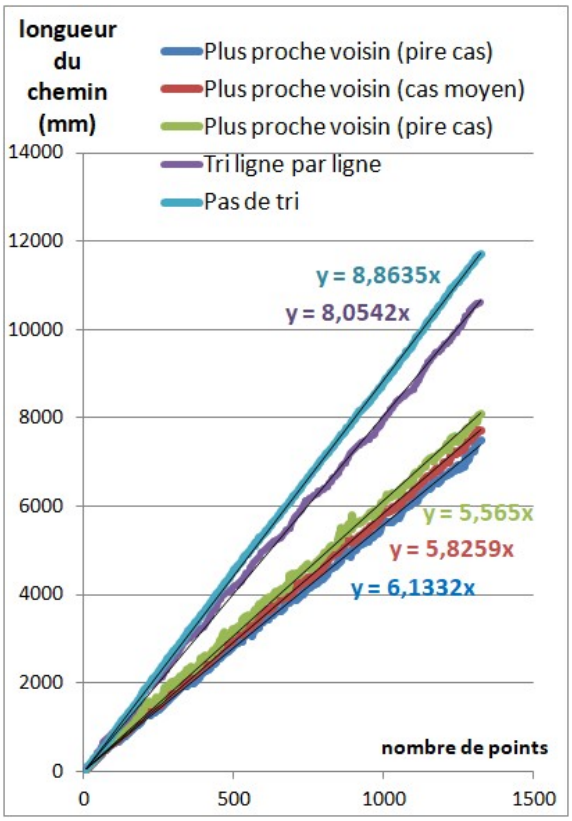

Figure 37 – *Courbe présentant la longueur du chemin calculé par différents algorithmes*

On voit donc bien la régularité de la longueur des solutions que l'on peut donc modéliser par des fonctions affines. On trouve en particulier qu'en appliquant la recherche du cas minimum de l'algorithme du plus proche voisin, on obtient un résultat nettement plus performant que les autres algorithmes. En particulier, en divisant les coefficients des fonctions, on obtient les rapports de qualité. Ainsi, le cas minimum du plus proche voisin est 38% meilleur que le chemin proposé sans tri : $(1 - \frac{5.5022}{8.8324} = 0.38)$.

f Expérience F.4 : vitesse des algorithmes

En mesurant les temps mis par les algorithmes, on voit que ces temps sont négligeables pour l'absence de tri et le tri ligne par ligne. Pour le plus proche voisin, calculer le meilleur cas nécessite an^3 opérations alors que pour calculer un cas entre le meilleur et le pire, il suffit de an^2 opérations. On voit bien ceci en traçant les courbes des temps d'exécutions de ces deux sous-algorithmes, en Figure 38 et Figure 39.

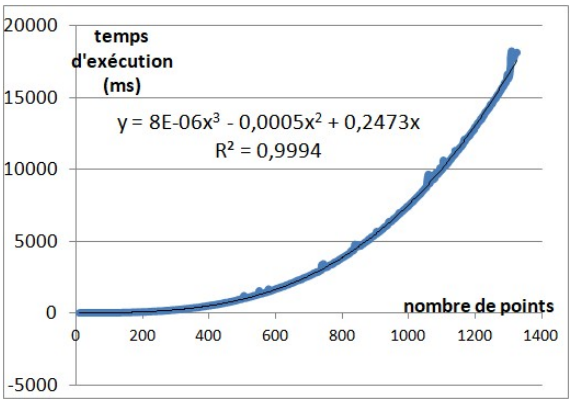

Figure 38 – *Courbe présentant le temps d'exécution de l'algorithme cherchant le meilleur cas pouvant être trouvé par la méthode du plus proche voisin*

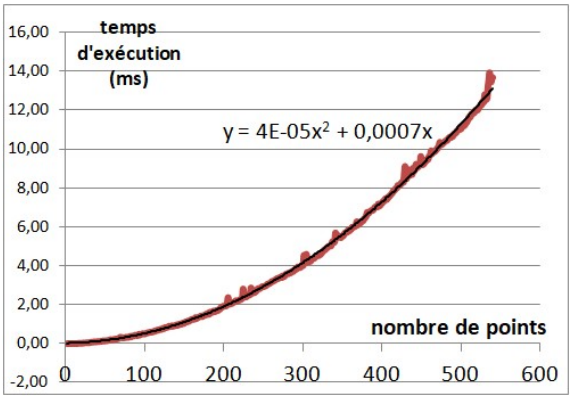

Figure 39 – *Courbe présentant le temps d'exécution de l'algorithme cherchant le pire cas pouvant être trouvé par la méthode du plus proche voisin*

La différence de résultat est de l'ordre de 8%, mais même l'algorithme cubique reste raisonnable : 20 secondes pour 1300 points.

Ainsi, cette étude algorithmique a permis de réduire le temps de trajet de 40% sans pour autant faire fonctionner un algorithme pendant plusieurs heures. C'est donc une étude concluante et pertinente pour notre projet.

V. Bilan des expériences

Conscients que la quantité d'information qui a été transmise durant les 10 dernières pages est importante, nous proposons ici un rapide survol des résultats obtenus, indépendamment des démarches.

En premier lieu, nous avons étudié la motorisation (cf sous-section A), en vue de choisir un moteur adapté. Tout d'abord, nous avons étudié la force nécessaire pour embosser proprement une feuille. Nous l'avons évalué entre 5 et 9 Newton (cf sous-sous-section a). Puis, nous avons étudié les frottements dans les axes, et nous avons vu qu'ils étaient négligeables (cf sous-sous-section b). Enfin, nous avons étudié le rendement de la vis, de 14% (cf sous-sous-section c). Tous ces résultats nous ont amené à choisir un moteur pas à pas de tension 12 V et de couple 0.25 Nm(cf sous-sous-section d).

En second lieu, nous avons étudié la gestion de la chaleur pour embosser proprement le plastique(cf sous-section B). Nous avons donc réalisé une mesure à la caméra thermique pour valider un modèle, qui nous a mené à une loi liant la température à la puissance fournie (cf sous-sous-section a) : $T = 28,597P + 21,918$ Pour conclure cette étude, nous comptons trouver la température idéale pour percer le plastique , (cf sous-sous-section b) et donc obtenir les caractéristiques électriques de l'embout.

Nous avons ensuite étudié la précision(cf sous-section C), tout d'abord par des mesures de jeux (cf sous-sous-section a), qui nous ont mené à certaines valeurs, telles que le diamètre réel des roulements : 8.15mm au lieu de 8.00, et nous avons donc pu déterminer le placement optimal des composants pour réduire ces jeux. Nous avons ensuite étudié la rigidité de la structure et montré qu'aucune imprécision ne pouvait venir de ce point là (cf sous-sous-section b).

Puis nous avons essayé de déterminer la puissance électrique nécessaire pour faire fonctionner le dispositif(cf sous-section D). Pour cela, nous avons mesuré les grandeurs électriques du système(cf sous-sous-section a).

Nous avons également trouvé un système de déplacement des feuilles par dépression (cf sous-section E), nous avons ainsi pu déterminer les caractéristiques de notre ventilateur et sa pertinence pour placer les feuilles.

Nous avons finalement tenté une étude algorithmique pour optimiser le trajet de la pointe (cf sous-section F). Nous avons présenté les algorithmes utilisés (cf sous-sous-section a), puis les conditions de toutes ces expériences (cf sous-sous-section b). Nous avons ensuite étudié les performances absolues de chaque algorithme (cf sous-sous-section c), mais nous nous sommes vite aperçus que celui qui donne la meilleure solution est beaucoup trop lent. (cf sous-sous-section d). Nous avons alors étudié différentes approximations, et nous avons pu constater que nous pouvons gagner près de 38% par rapport au chemin non ordonné (cf sous-sous-section e). Nous avons en particulier remarqué que ces algorithmes ont des vitesses très différentes, mais que celles-ci restent raisonnables : 20 secondes pour 1300 points.

VI. Conclusion

Ce projet fut riche en rebondissements. Partant sur une base que nous croyions solide, nous avons du la remettre à l'épreuve de l'expérience. Certains points ont résisté, d'autre non. Ainsi, plusieurs de nos démarches expérimentales n'ont pas abouti, telles que l'étude de l'algorithme de Christofides, trop complexe pour nous, ou encore la résolution de l'équation de la chaleur.

Néanmoins, nous avons su tirer parti de ces obstacles pour explorer de nouvelles pistes : l'algorithme du plus proche voisin, la résolution numérique, la caméra thermique, pour résoudre ses problèmes.

Ainsi, si nous avons commencé doucement le projet, en étudiant les enjeux de notre sujet, nous avons rapidement été complètement pris dans l'intérêt de celui-ci. Nous avons découvert des domaines passionnants, et avons pu les appliquer à un prototype réel.

Forts de ces connaissances, nous avons ainsi pu concevoir le nouveau mécanisme, et commencer à le réaliser. Cette phase nous a permis de confronter nos modèles à la réalité.

Enfin, nous avons également pu présenter nos résultats, notamment par ce dossier.

Ainsi, successivement, ce projet nous a permis de définir un besoin, modéliser des problématiques scientifiques, élaborer des démarches expérimentales, valider des hypothèses, concevoir un mécanisme, mettre en œuvre une conception, et présenter un résultat. Ainsi, ce projet nous a permis de saisir l'ensemble du trajet de la science, du théorique à l'appliqué, de la pensée à l'action.

Références

[1] OMS. Cécité et déficience visuelle. *OMS*, Août 2014.

[2] Robert Boyle. *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air and its effects*. Thomas Robinson, 1662.

[3] Christofides Nicos. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. *CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA MANAGEMENT SCIENCES RESEARCH GROUP*, Février 1976.

[4] Joseph B. Kruskal. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 7(1) :48–50, 1956.

[5] Eugène L Lawler. Combinatorial optimization. *University of California*, 1976.

[6] Jean Lassègue. *La méthode expérimentale, la modélisation informatique et l'intelligence artificielle*. Intellectica, 1962.

[7] Charles Augustin Coulomb. *Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages*. 1821. http ://catalogue.bnf.fr/ark :/12148/cb30278669q.

[8] Isaac Newton. *Philosophiae naturalis principia mathematica*. 1726. gallica.bnf.fr/ark :/12148/bpt6k29037w.