

# Conception d'une maquette de cadran solaire analemmatique

Joannès BARBARAT <sup>a</sup>, Lionel BATIER <sup>b</sup>, Pierre BONTON <sup>c</sup>, José MERINO <sup>d</sup>

[Joannes.Barbarat@etudiant.univ-bpclermont.fr](mailto:Joannes.Barbarat@etudiant.univ-bpclermont.fr)

*a,b,c Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II*

<sup>a</sup> Elève ingénieur, Département de Génie Physique de Polytech' Clermont-Ferrand 24 av des Landais 63174 AUBIERE CEDEX-France

<sup>b</sup> Professeur agrégé, Département de Génie Physique de Polytech' Clermont-Ferrand 24 av des Landais 63174 AUBIERE CEDEX-France

<sup>c</sup> Professeur, Département de Physique Institut Pascal 24 Avenue des Landais 63171 Aubière CEDEX-France

<sup>d</sup> Sculpteur, Docteur en mathématiques, Ingénieur recherche chez Michelin, [josemerino.perso.sfr.fr](mailto:josemerino.perso.sfr.fr)

## RESUME :

Les objectifs de ce projet est d'une part la réalisation d'une sculpture monumentale représentant un cadran solaire et d'autre part la conception de maquettes pédagogiques pour expliquer son fonctionnement et une réflexion sur le temps.

Dans le cadre du parcours Préparatoire aux Ecoles d'Ingénieur de Polytech' (PeiP) dispensé à Clermont-Ferrand, les élèves doivent réaliser un projet à quatre sur deux ans. La spécificité de celui présenté ici est qu'il est issu d'une commande d'un organisme externe à l'école. L'idée originale du projet revient en effet au docteur et ingénieur José MERINO. Membre de l'association A.R.T.S. (Art, Recherche, Technologie et Science), cette dernière favorise les œuvres artistiques à vocation scientifiques. L'association a pour président le professeur Pierre BONTON qui a assuré la coordination avec l'école Polytech' Clermont-Ferrand.

La mission proposée aux quatre étudiants, en 2012-2013, encadrés par leur tuteur, le professeur Lionel BATIER consiste à inventer et concevoir une maquette fonctionnelle du dispositif pour corriger l'heure solaire en heure légale. Les quatre étudiants ayant choisi de relever le défi sont Maxime AUBERT, Joannès BARBARAT, Benoit BAYLE et Rémi BOCQUET. Le projet ayant été mené à bien, il a donné différentes suites toujours en cours dont : le dépôt d'un brevet et des présentations dans diverses manifestations de diffusion de la culture scientifique.

Une deuxième équipe, en 2013-2014, composée de Maxence AMAT, Etienne BADIA, Ludovic HENRY et Paul LAMBERT de CURSAY s'est également, par la suite, chargée d'établir les plans de l'œuvre monumentale à destination d'un jardin public de Clermont-Ferrand à partir de la maquette conçue.

**Mots clés :** art, analemme, cadran solaire, dispositif pédagogique, maquette, œuvre monumentale.

## 1 INTRODUCTION

« - Bon, dit l'abbé, il n'est que midi un quart, et nous avons encore quelques heures devant nous.

*Dantès regarda autour de lui, cherchant à quelle horloge l'abbé avait pu lire l'heure d'une façon si précise.*

*- Regardez ce rayon du jour qui vient par ma fenêtre, dit l'abbé, et regardez sur le mur les lignes que j'ai tracées. Grâce à ces lignes, qui sont combinées avec le double mouvement de la terre et l'ellipse qu'elle décrit autour du soleil, je sais plus exactement l'heure que si j'avais une montre, car une montre se déränge, tandis que le soleil et la terre ne se dérangent jamais.»*

Alexandre Dumas, Le Comte de Monte-Cristo, XVII

Le projet développé ici se propose de percer les mystères de l'abbé Faria exposés ci-dessus.

En effet, le projet consiste à réaliser un cadran solaire analemmatique, c'est-à-dire un cadran capable de donner le temps légal (celui de la montre) à partir du temps solaire. Nous verrons qu'il y a des différences entre le temps solaire qui rythme tous les êtres vivants et le temps légal (mécanique et régulier) actuellement utilisé par notre société. Ce projet permet de relier ces deux notions au travers d'un objet artistique et didactique.

## 2 CONDUITE DU PROJET

### 2.1 Eléments de départ

José MERINO est venu présenter précisément le projet. Il nous a fourni un fascicule avec quelques éléments expliquant la notion d'heure solaire ainsi qu'une représentation du cadran (figure 1) pour avoir une idée de sa structure. La structure proposée par José, ne constitue bien sûr qu'une piste de travail. Celle-ci doit être complétée par une recherche bibliographique bien plus conséquente qui constitue la phase préliminaire du projet.

### 2.2 Etablissement d'un CDCF

La précision du cadran par rapport à l'heure réelle est la minute. C'est la contrainte la plus importante. La maquette respecte néanmoins respecter les points suivants :

- ❖ Elle doit être suffisamment légère pour être portée facilement tout en étant solide.
- ❖ Elle doit aussi être de taille réduite pour pouvoir, par exemple, passer par les portes sans toutefois être trop petite pour que l'on puisse lire les graduations de l'heure avec facilité.
- ❖ Elle doit être harmonieuse et esthétique.
- ❖ Enfin elle doit présenter un aspect didactique.

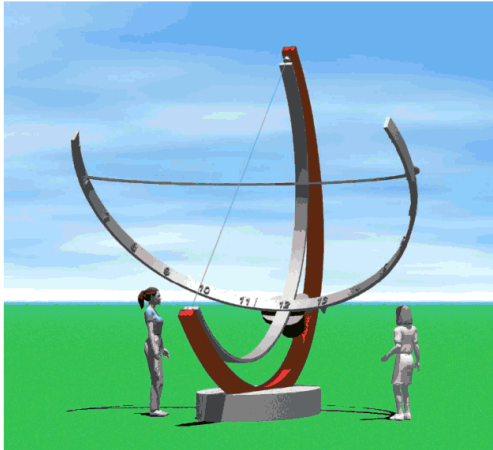


Figure 1 : Vue virtuelle initiale du cadran

### 3 ACTEURS DU PROJET

Sur la figure 2 apparaissent les différents acteurs du projet précédemment cités dans le résumé de l'article.

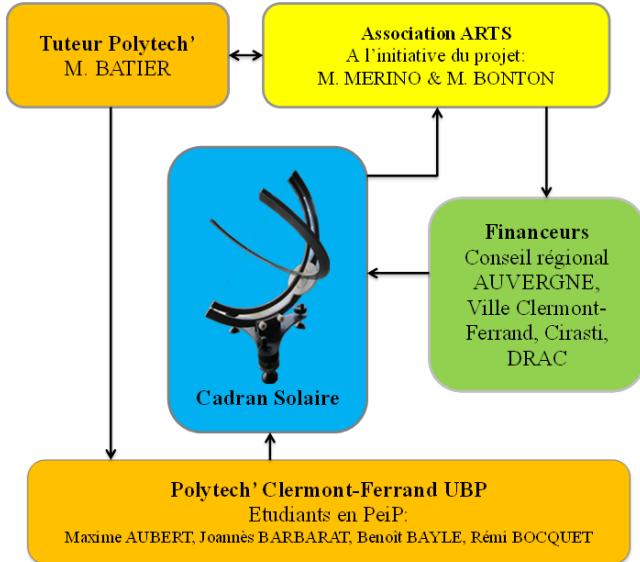


Figure 2 : Acteurs du projet

### 4 THEORIE

La première question à se poser est : qu'est-ce que l'heure solaire, l'heure légale (celle de la montre) et les relations entre les deux? L'heure solaire implique directement le mouvement de la Terre autour du Soleil ainsi que la rotation de notre planète. Il convient donc d'étudier les mouvements de la Terre et du Soleil et leur conséquence sur la différence heure solaire/heure légale, avant de s'intéresser à la position sur la surface de la Terre.

Pour commencer il faut définir le terme de jour dit « vrai ». Le jour vrai est l'intervalle de temps entre deux passages successifs du soleil au même méridien. Dans le temps légal actuel, un jour dure 24 heures quel que soit la date. La définition courante d'une révolution de la terre sur elle-même correspond au jour sidéral qui est un peu plus court, soit de 23h56. Cela s'explique par le fait que durant un jour sidéral la terre à fait une

rotation de 360°. Cependant, en prenant l'hypothèse que la terre a une trajectoire cyclique autour du soleil, en un jour, la terre a avancé sur son orbite de 1°. En effet un tour autour du soleil équivaut à 360° et est effectué en 365 jours soit bien environ 1° par jour. La terre doit donc effectuer une rotation de 361° pour retrouver le soleil au même point à sa surface. On calcule aisément la vitesse de rotation de la terre par  $24 \times 60 / 360 = 1440 / 360 = 4 \text{ min/deg}$ . On retrouve bien la différence entre jour sidéral et jour vrai. Ce principe est illustré sur la figure 3 :

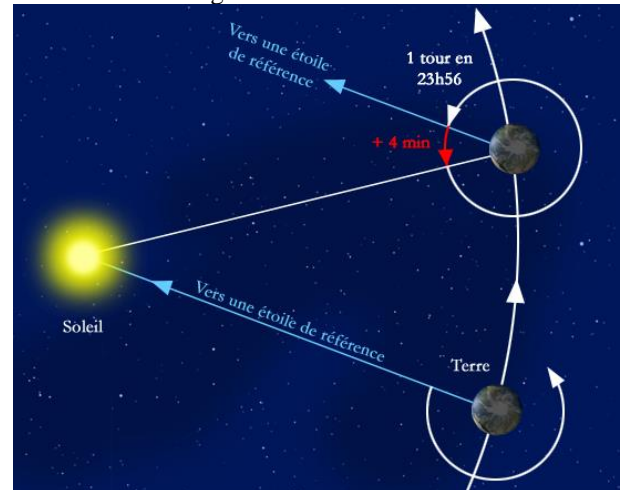


Figure 3 : Jour solaire et jour sidéral

Si l'hypothèse d'une trajectoire circulaire autour du soleil s'accordait avec la vision antique et dogmatique du monde parfait du cosmos, Johannes Kepler a, en 1609, mis à mal cette conception. Notamment par la recherche d'explication du mouvement « rétrograde » de mars, il en déduit des trois lois. Ce sont les deux premières qui nous intéressent ici. La première stipule que la terre effectue une trajectoire elliptique dont le soleil occupe un foyer. La deuxième énonce que l'aire balayée par la distance terre soleil est constante dans le temps. Autrement dit : la terre accélère sur son orbite lorsque elle se rapproche du soleil (Périhélie) et décélère lorsque elle s'en éloigne (Aphélie). Ainsi le jour « vrai » durera plus de 24h au périhélie et moins de 24h à l'Aphélie. La figure 4 illustre ce propos avec l'angle à plus ouvert que b :

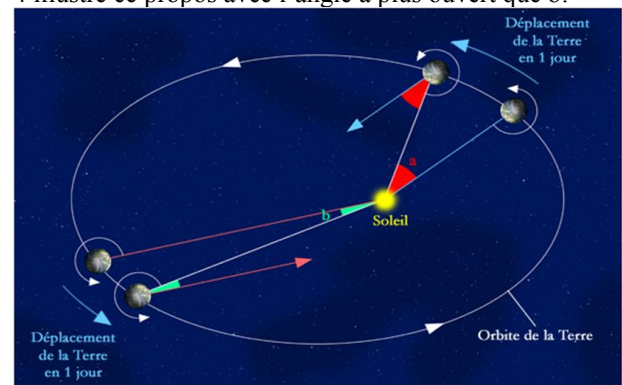
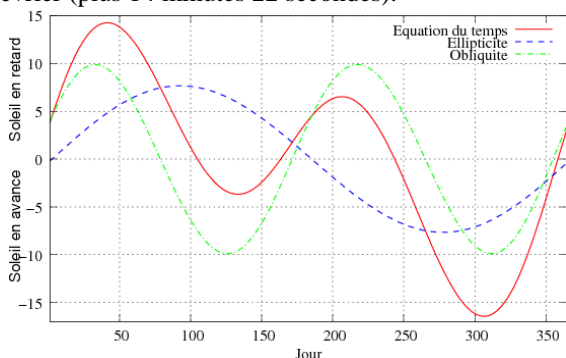


Figure 4 : Lois de Kepler

En plus de cette correction, une autre s'ajoute, malgré qu'elle soit plus difficile à saisir. Elle a été prédite beaucoup plus tôt, au II<sup>ème</sup> siècle avant notre ère plus précisément par Hipparque. Il met en évidence la précession des équinoxes. Cela correspond au fait que l'axe de rotation de notre planète n'est pas vertical mais génère un cône de  $23^{\circ}26'$  d'angle d'ouverture. Ce phénomène a pour effet de décaler la projection du soleil.

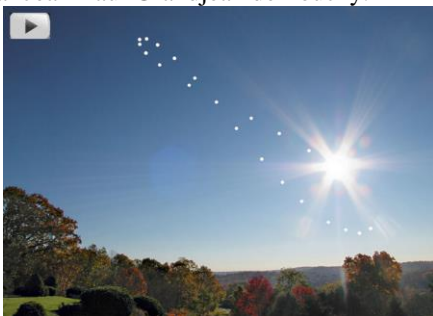
C'est l'astronome anglais John Flamsteed en 1672 qui combinera les deux particularités évoquées auparavant en décrivant l'équation du temps (figure 5). Cette équation ne prend pas en compte les corrections plus insignifiantes comme la nutation (variation sur 41000 ans de l'inclinaison entre  $21.8^{\circ}$  et  $24.4^{\circ}$ , cette faible valeur est due entre autres à une présence bienfaitrice de la lune qui sert de « béquille »). Cette équation a également l'avantage d'être relativement constante d'une année sur l'autre. En effet la variation de l'ellipticité varie entre 0 et 0.07 sur 100 000 ans et la précession des équinoxes fait un cycle tous les 20 000 ans soit une cinquantaine de secondes d'arc par an.

Le jour solaire équivaut au jour légal (24 heures) exactement seulement quatre fois par an à savoir vers le 15 avril, le 14 juin, le 1er septembre et le 24 décembre. Le reste de l'année il est soit plus court, soit plus long. Les écarts maximums se produisant le 4 novembre (moins 16 minutes 23 secondes) et le 11 février (plus 14 minutes 22 secondes).



**Figure 5 : Courbe de l'Equation du temps**

On la retrouve également en photographiant à des intervalles multiples de 24 heures la position du soleil pendant un an. Cette figure (fig 6) est appelé analemme ce qui a donné l'adjectif analemmatique à notre cadran. Elle a été relevée pour la première fois en 1730 par Jean-Paul Grandjean de Fouchy.



**Figure 6 : Positions du soleil au cours d'une année**

On retrouve l'équation du temps en horlogerie du XVII<sup>ème</sup> dans les montres dites « à équation du temps ». La courbe est présentée sous la forme d'une came afin de retranscrire son mouvement. L'équation est donc mise en coordonnées polaires. Cette montre indique donc l'heure solaire après avoir été réglé une fois au coup de canon tiré à midi solaire. C'est-à-dire l'opération inverse de ce que l'on veut réaliser ! Les horlogers inscrivirent sur ces montres : « Solis mendaces arguit horas », c'est à dire: Elles prouvent que les heures du soleil sont menteuses.



**Figure 7 : Mécanisme de montre à équation du temps en rouge, sous la forme d'une came**

La majeure partie de cet exposé théorique a été élaboré à partir de [1] et complété notamment par [3], [4] et [5].

## 5 CONCEPTION

Une fois la partie théorique achevée, tous les aspects intervenant dans la différence heure solaire/heure légale, ont pu être clarifiés. Les études théoriques permettent d'appréhender le fonctionnement du cadran et d'imaginer les mécanismes pour corriger l'heure solaire en heure réelle. Pour résumer, il faut intégrer dans la maquette les différents paramètres suivants :

- L'équation du temps
- Les coordonnées du lieu d'utilisation (c'est-à-dire la longitude et la latitude)
- L'orientation plein sud du cadran
- La planéité de la base supportant le cadran

### 5.1 L'équation du temps

Le système qui corrige l'équation du temps a été le plus délicat à trouver. Il implique forcément que le cadran solaire possède une partie mobile. La première idée était d'approximer la courbe de l'équation en huit droites. Chacune de ces droites étant encadrée par des barres d'incertitudes d'une minute

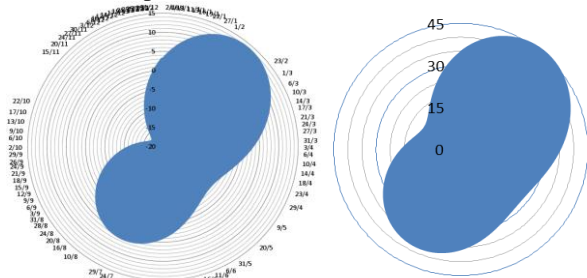
Malheureusement, tous les points ne satisfaisaient pas cette condition si bien que pour approximer la totalité de la courbe en droites, la précision est de quatre minutes (ce qui ne rentre pas dans le cahier des charges : la précision voulue étant de l'ordre de la minute). Ne voyant pas d'autre alternative, nous sommes pourtant restés sur cette idée de départ. Le mécanisme correspondant est une sorte de pédalier qui, lorsqu'il tourne, corrige l'équation du temps suivant la droite d'approximation associée à une date. Quand ladite droite ne correspond plus à la bonne période, il faut la changer par la suivante en déraillant



le pédalier. Evidemment, ce mécanisme qui est très complexe et imprécis n'a pas été concrétisé. Il reste d'ailleurs encore flou sur le principe de fonctionnement puisqu'il n'a pas été plus étudié. En effet, notre encadrant, Lionel BATHIER a suggéré (après la présentation de notre pédalier bancal) l'utilisation d'une came (figure 9).

Une came est une pièce tournante servant à transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation. Ainsi, pour intégrer l'équation du temps au cadran, il suffit de passer la courbe de l'équation en coordonnées polaires (coordonnées qui nous était encore peu familière et naturelle à l'époque).

On obtient alors un système relativement simple, le principe est de prendre l'équation du temps correspondant à l'échelle de la lecture du cadran (1mm=1min). Ensuite, la courbe obtenue est réalisée en 3D sous la forme d'un rail suivant son contour. Une pièce solidaire du cadran (à savoir un pion dont le diamètre est égal à la largeur du rail) et reliée à la came par le rail. Cela permet de faire la liaison entre cette dernière et le cadran. En effet, les dates sont inscrites sur la came : l'idée est de se placer à la bonne date au niveau d'un curseur, en faisant tourner la came. La rotation de celle-ci entraîne la partie mobile du cadran et corrige l'équation du temps. Cependant, après avoir saisi les formules donnant l'équation du temps, et obtenu la courbe en coordonnées polaires, il s'est avéré que la forme correspondante ne pouvait fonctionner en came. En effet, une zone possède un angle aigu : le pion ne peut repartir de ce point et se retrouve bloqué. Il a donc fallu translater le centre pour arrondir la forme la courbe. On obtient alors une forme plus douce où le pion pourra circuler sans peine (fig.8). Finalement, la came est le mécanisme de la « boîte noire » de départ.



**Figure 8 : Première représentation à gauche de la came (non viable) et came finale à droite par décalage radial**

### 5.2 Les coordonnées du lieu d'utilisation

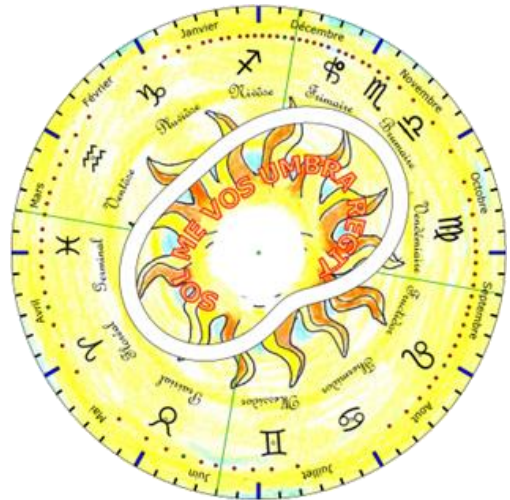
Le problème de l'équation du temps est bien sûr le principal et le plus ardu à régler. Mais il n'est pas l'unique paramètre à prendre en compte. Le lieu d'utilisation de la maquette est une autre correction à apporter. Il faut effectivement que l'inclinaison du gnomon corresponde à la latitude du lieu (soit environ 45° en France) et il faut régler la longitude par rapport au méridien de référence du fuseau horaire dans lequel on se situe.

Pour le premier réglage, la solution est un étai dans lequel coulisce la structure du cadran constituée d'arcs circulaires.

Le réglage de la longitude ne nécessite aucun mécanisme : en effet le banc de lecture du cadran est une bande magnétique que l'on peut donc déplacer à sa guise par rapport à un point de référence.

### 5.3 Horizontalité et orientation au Sud

L'horizontalité du cadran se fait par des pieds dont on peut régler la hauteur. Un niveau placé sur le cadran permet d'indiquer s'il est horizontal ou non. Enfin l'orientation plein sud du cadran est possible grâce à une boussole.



**Figure 9 : Came finale avec toutes indications**

## 6 REALISATION DE LA MAQUETTE

La réalisation de la maquette a dû s'adapter au parc machine disponible au sein de l'école Polytech' Clermont-Ferrand, à savoir : des machines d'usinage conventionnelles, une machine de découpe jet d'eau et une imprimante 3D. Compte tenu de ces équipements nous avons fait des choix techniques.

Le choix du matériau, une tôle acier de 10mm, offrant une bonne rigidité, autorisant les soudures et permettant l'utilisation de aimants pour toutes les indications a ainsi été généralisée.

Les indications sont un élément fondamental pour l'utilisation du cadran. Elles servent à faire les réglages nécessaires et à obtenir le résultat (soit ici l'heure légale). Ces indications ont donc été réalisées avec la plus grande précision, de façon lisible et facilement compréhensible. L'impression des aimants a été réalisée par un imprimeur où une attention particulière sur les respects d'échelle a été portée.

Ci-après, la nomenclature du cadran.

### 6.1 En tôle acier de 10mm découpé au jet d'eau

- ➔ Arc principal : en contact avec l'étai, supporte les deux autres arcs par deux pivots
- ➔ Arc vertical : Contient les latitudes
- ➔ Arc de lecture : Contient les graduations des heures ainsi que le pion indexé dans la came.
- ➔ Etai



**Figure 10 : Découpe au jet d'eau**

## 6.2 En impression 3D

- Boutons moletés
- Came
- Support de la tige pour la boussole



**Figure 11 : Pièces obtenues par impressions 3D**

## 6.3 Magnétique

- Le banc de lecture des heures avec la longitude correspondante
- Les indications sur la came
- Le banc de lecture des heures civiles locales
- La règle des latitudes
- La méridienne pour la boussole
- Les mentions sur la base



**Figure 12 : Idications sur support magnétiques**

## 6.4 Autres

- Gnomon (câble acier  $\varnothing$  5mm)
- Pion
- Roulements à bille
- Visserie
- Boussole
- Tige de la boussole



**Figure 13: Vues globales de la conception assistée par ordinateur et de la réalisation obtenue**

## 7 LES APPORTS DU PROJET

Un tel projet implique dans sa globalité beaucoup d'éléments formateurs puisqu'il ne s'agit pas d'une simple recherche bibliographique. En effet il touche beaucoup d'aspects donnant une première approche simplifiée du métier d'ingénieur : initiative d'intervenants extérieurs, réflexions en amont, réalisation concrète d'une maquette, découverte de machines, existence d'un « après-projet » etc.

La première année a été uniquement axée sur les recherches théoriques pour comprendre l'heure solaire. Ceci a permis ensuite de élaborer les premières propositions pour corriger le temps. Ces recherches ont permis d'avoir le bagage nécessaire pour la seconde année basée sur la phase exécutive. Nous avons eu, en tout, seize réunions avec notre tuteur Lionel BATIER ainsi que plusieurs échanges techniques avec José MERINO à l'initiative du projet.

## 8 DEPOT DE BREVET

Toutes les recherches menées pour ce projet (études bibliographiques, études de l'existant) ne nous ont pas révélé l'existence de cadrans comparables à ce jour. José MERINO nous a donc proposé de déposer un brevet [2] compte tenu du caractère innovant de notre réalisation et notamment sur la présence de la came qui intègre directement l'équation du temps.

## 9 TEMOIGNAGES

### 9.1 Témoignage de Maxime AUBERT

Notre projet de départ était la supraconductivité. Aussi, après notre première réunion où M.BATIER nous a parlé de ce cadran solaire et que notre choix s'est finalement arrêté sur ce dernier, j'étais beaucoup plus enthousiaste.

En effet, je trouve que ce projet est beaucoup plus complet et formateur que le précédent. Il ne s'agit pas d'une énième recherche bibliographique illustrée par une éventuelle expérience. Le fait que nous ayons à traiter avec des intervenants extérieurs est un aspect qui me paraît important puisque il se rapproche de la réalité du métier d'ingénieur. La réalisation d'une maquette est quelque chose qui me motive car elle reflète le travail accompli contrairement à un simple rapport sans valeur

ajoutée. De plus, ce projet m'a permis d'apprendre les bases d'utilisation du logiciel SolidWorks que j'utiliserai probablement dans ma future formation et mon futur métier. Enfin, la fabrication de la maquette a été l'occasion de découvrir des machines que je ne connaissais pas (la découpe au jet d'eau par exemple). En plus des machines, j'ai découvert des mécanismes nouveaux comme la came. Pour terminer, le fait qu'il y ait un « après-projet » me plaît beaucoup : ce n'est pas juste un projet très « scolaire » qu'on oublie une fois terminé.

### 9.2 Témoignage de Joannès BARBARAT

Ce projet me semble l'expérience la plus enrichissante après celle du premier stage en laboratoire de mon parcours PeiP. Ce projet a tout d'abord l'intérêt de placer en conditions réelles, avec un client, un budget et des échéances. Ensuite il permet de réaliser une toute première innovation, en effet le produit créé n'a pas d'antécédents. Troisième point, nous avons pu réaliser l'intégrité de la conception : de la théorie au produit fini en passant par l'étude de faisabilité, la conception assisté par ordinateur, l'usinage, l'assemblage et les corrections issues des tests.

En marge de ces étapes il restait bien sur la conduite du projet avec les planifications et répartitions des tâches. Tout cela a permis une très grande diversité des activités. La forte autonomie donnée pour conduire ce projet permet d'acquérir une réelle maturité. Ce projet était d'autant plus intéressant que j'ai une passion pour l'astronomie. Le point le plus difficile était de conjuguer le projet avec les cours, en effet un trop fort investissement était souvent très tentant.

### 9.3 Témoignage de Benoît BAYLE

Je n'avais encore jamais réalisé un projet de cette envergure; réfléchir quant à la conception de ce cadran puis arriver au bout de sa création fut un réel défi. En effet, contrairement aux autres projets, ce dernier m'a demandé une réflexion toute particulière.

J'ai dû dans un premier temps réaliser beaucoup de recherches sur le sujet afin de cerner les contraintes que pourraient entraîner une telle réalisation, trouver les solutions adéquates, puis passer à la réalisation proprement dite; cela m'a demandé de maîtriser des logiciels de conception tel que SolidWorks. J'ai trouvé également enrichissant le fait d'utiliser des outils manuels tels que le tarauteur, la machine de découpe au jet d'eau, le tour etc.

C'est dans ce sens que je trouve le projet différent des autres; il se rapproche du métier de l'ingénieur qui demande des compétences de recherche, de conception, et d'innovation. Cela m'a donc donné une idée concrète concernant le métier que j'aimerais exercer. Le projet m'a demandé une partie de mon temps libre et j'ai dû sacrifier bon nombre de demi-journées, ce qui n'était pas facile car j'ai dû trouver un compromis avec le travail que me demandait déjà l'université. Ce dossier touchant à tout, je me suis

aperçu que la partie manuelle me correspondait plus que la partie informatique.

### 9.4 Témoignage de Rémi BOCQUET

Le projet Polytech' m'a beaucoup apporté.

J'ai pu découvrir une des facettes du métier d'ingénieur, qui est le développement. Nous avons en effet conçu notre cadran solaire puis en avons réalisé un prototype. Nous avons dû réunir les informations scientifiques théoriques sur l'équation du temps puis concevoir le cadran solaire sur un logiciel de Conception Assisté par Ordinateur, pour finir par la fabrication du prototype et la phase de test de ce dernier.

J'ai aussi appris à travailler en groupe sur un projet sérieux, qui demandait de l'implication de la part de chacun des membres du groupe, et je pense que dans notre cas le travail du groupe a été bien fait puisque nous avons réussi à aller jusqu'au bout.

## 10 CONCLUSION ET REMERCIMENTS

Cette maquette fonctionne parfaitement et valide le principe théorique de notre cadran analemmatique. Après plusieurs périodes de tests nous avons pu constater l'exactitude de l'affichage de l'heure légale. Le projet est actuellement dans sa deuxième phase qui consiste à réaliser une version monumentale en vue de son installation sur un lieu public. Une nouvelle équipe d'étudiant s'est investie dans cette mission en parallèle de la réalisation d'une mallette pédagogique à destination d'un public scolaire.

Nous remercions tous les partenaires du projet et tout particulièrement le Conseil Régional d'Auvergne, le Cirasti, la DRAC et la Ville de Clermont-Ferrand pour leur soutien financier et l'association A.R.T.S. pour nous avoir proposé le projet et le porter jusque à sa finalisation.

### Bibliographie

- [1] A.Vial, Quelques idées reçues sur la position du Soleil. Bull. Un. Prof. Phys. Chim., Octobre 2007, pp. 959-980.
- [2] J.MERINO, L.BATIER, J.BARBARAT, M.AUBERT, B.BAYLE, R.BOCQUET, Brevet N° FR 1301222, 2013
- [3] J.&M. GRIBBIN, Le grand livre de l'astronomie.pp.25-31
- [4] D. Savoie, Les Cadran Solaires. Belin - Pour la science.
- [5] Unité de formation de l'Observatoire de Paris [http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages\\_mctc/introduction-mctc.html](http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_mctc/introduction-mctc.html)

### Liens du projet :

Site de A.R.T.S. : [www.artscience.jimdo.com](http://www.artscience.jimdo.com)

Site du projet :

[www.sites.google.com/site/cadrananalemmatique](http://www.sites.google.com/site/cadrananalemmatique)

