



INSTITUT  
NATIONAL  
des SCIENCES  
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3  
STPI/P6-3/2008 – n°21



Nom des étudiants

Gautier	BIDEAULT	Denis	BRAZEY
Alexandre	LEBLOND	Alexandre	SIMOES
Nicolas	OLIVEIRA	Sébastien	VILFAYEAU

Enseignant-responsable du projet  
Daniel Rello



## CONCEPTION ET REALISATION D'UN MOTEUR STIRLING



À TAILLE  
HUMAINE  
À L'ECHELLE  
DU MONDE

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

Date de remise du rapport : **24/06/08**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2008 – n°21**

Intitulé du projet : **Conception et réalisation d'un moteur Stirling**

Type de projet : **expérimental**

Objectifs du projet :

- **Trouver des plans**
- **Etudier la faisabilité du projet**
- **Palier aux différentes contraintes techniques**
- **Bien comprendre le fonctionnement du moteur en lui même**
- **Bien se répartir les tâches**
- **Recherche des matériaux comportant des propriétés optimales, et leurs points de vente**
- **Construire un moteur tournant le plus vite possible**

n° cahier de laboratoire associé : **Apollo 13**

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction .....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail .....	7
3. Travail réalisé et résultats .....	9
3.1. Moteur Stirling LES-01 .....	9
3.2. Moteur Stirling de William Gurstelle.....	10
3.2.1. Fonctionnement du moteur .....	10
3.2.2. La réalisation du moteur.....	12
3.3. Moteur Nivéa.....	16
3.3.1. Fonctionnement du moteur .....	16
3.3.2. La réalisation du moteur.....	18
4. Conclusions et perspectives.....	21
5. Bibliographie .....	26
6. Annexes.....	27
6.1. Les moteurs .....	27
6.1.1. Moteur 1 : Chenapan.....	27
6.1.2. Moteur 2 : LES-01 .....	27
6.1.3. Moteur 3 : Moteur de William Gurstelle .....	28
6.1.4. Moteur 4 : Moteur Nivea.....	28
6.1.5. Moteur 5 : TSE-03.....	29
6.2. Plans, notices, détails.....	29
6.2.1. Le chenapan .....	29
6.2.2. Le LES-01 .....	29
6.2.3. Le moteur à conserve.....	29
6.2.4. Le Nivea.....	30
6.3. Schémas de montages, plans de conception .....	31

## REMERCIEMENTS

Nous tenons tout particulièrement à remercier les personnes suivantes qui nous ont aidés à réaliser ce projet :

Tout d'abord les personnes externes à l'INSA :

Mr Dumais

Mr Renard

Mr Viallon

Mr et Mme Desanglois

Mr et Mme Bideault

Mr Leblond

Mr Tourbier

Puis, les enseignements de l'INSA :

Mr Letoulouzan

Mme Engel

Mr Nivoliers

Mr Paresy

Et bien évidemment, un remerciement à Mr Rello.

## 1. INTRODUCTION

Le projet moteur Stirling de P6 -3 étant un projet de réalisation et de conception, nous avons eu besoin de matériels particulier (établi, scie, perceuse, tournevis...). Par conséquent nous avons passé la majeure partie de notre temps dans le garage d'un des membres de notre groupe (Gautier Bideault).

Tout d'abord, nous avons passé la première semaine à rechercher des plans sur divers sites Internet afin de trouver le moteur le plus approprié à nos possibilités de réalisation. Une fois les plans trouvés, nous nous sommes concertés avec notre professeur encadrant Mr Rello, pour valider ces plans.

La seconde étape consistait à rechercher les différents matériaux utilisés pour la réalisation du moteur. Pour cela, nous les avons achetés chez des fournisseurs de bricolage et chez un détaillant pour objet miniature. Les plans et les matériaux étant acquis, nous avons débutés la fabrication du moteur, de la manière la plus efficace possible, en essayant de se répartir au mieux les tâches à effectuer. Cette partie sera décrite plus loin dans le dossier et dans le cahier de laboratoire. A ce moment là, la principale difficulté résidait dans la résolution des problèmes techniques, notamment, l'étanchéité, et la soudure. Une fois les problèmes réglés, nous avons dû faire face à d'autres types de problèmes, qui sont des problèmes de fonctionnement, listés dans la suite du rapport et dans le cahier de laboratoire.

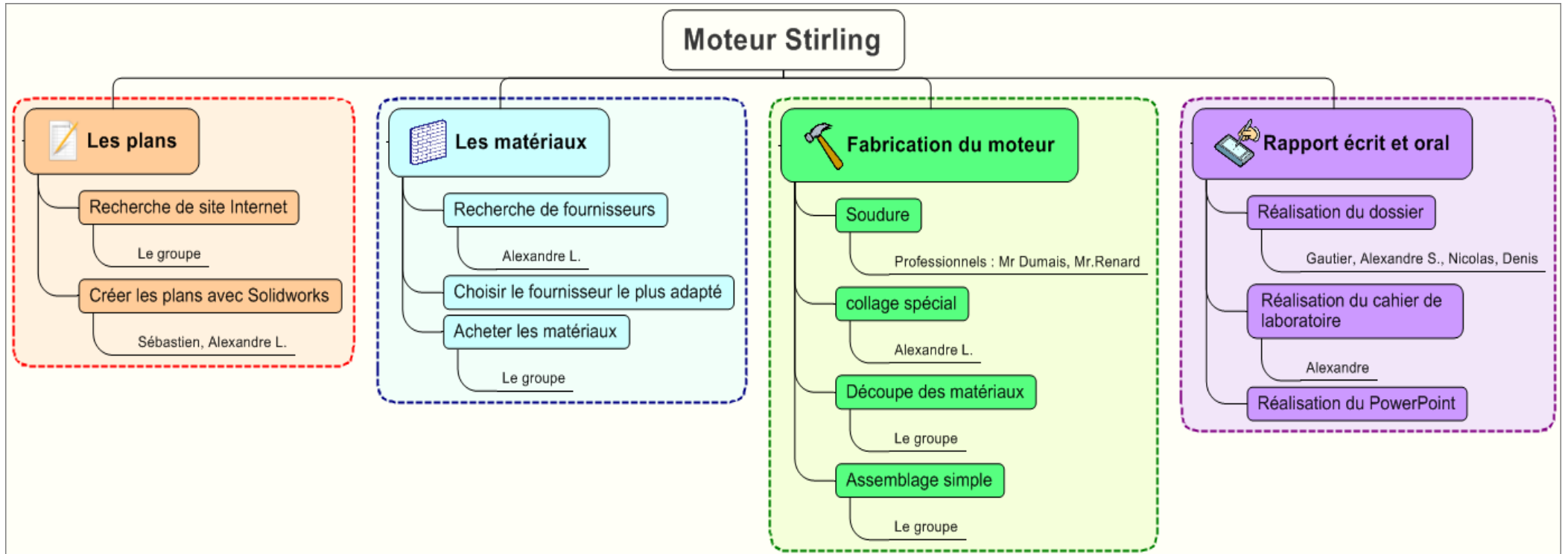
## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

L'objectif du Projet P6-3 était d'avoir un moteur Stirling tournant le plus vite possible. Cependant, nous nous sommes aperçus très rapidement que ce projet était complexe car il fallait déjà que le moteur réalise au moins un tour. Afin d'être le plus efficace possible, il a fallu répartir les tâches équitablement tout en réalisant un travail de groupe pour que chacun se sente impliqué et suive globalement l'évolution du projet. L'organigramme ci-dessous résume les différentes étapes du projet et les personnes assujetties à ces tâches, mais il nécessite quelques explications.

- Les plans : chacun a effectué des recherches sur internet avec plus ou moins de succès afin de trouver un ou plusieurs moteurs concevables avec peu de moyens, tout en étant assez sophistiqués. Au départ, nous avons envisagé d'usiner un moteur. Ainsi, il a fallu modéliser les pièces grâce à un logiciel de C.A.O par des personnes habilitées à l'utilisation de ce logiciel.
- Les matériaux : Les matériaux courants ont été achetés ensemble dans des grands magasins de bricolage et dans un magasin de modélisme. Pour les matériaux plus spécifiques comme des seringues, Alexandre L. s'est chargé de trouver un fournisseur.
- Fabrication des moteurs : La fabrication des moteurs s'est réalisée dans le garage d'un des membres du groupe, le plus souvent le jeudi après-midi. En général, chacun a réalisé une partie du moteur en fonction de ses compétences. Par exemple, une personne minutieuse effectuera les parties techniques de la fabrication demandant de la précision, et une personne ayant de l'expérience en matière de bricolage pourra guider la conception du moteur en soumettant la technique d'usinage la mieux adaptée. Pour des parties plus techniques comme la soudure, nous avons fait appel à un professionnel. Cette répartition des tâches n'est pas discriminatoire, mais a pour objectif d'obtenir le moteur le mieux conçu c'est-à-dire une fabrication réfléchie.
- Rapport écrit et oral : Le dossier est un travail de synthèse et de graphisme. Par conséquent, il a fallu affecter à ce travail les personnes remplissant ces caractéristiques.

En résumé, nous nous sommes très vite aperçus de la complexité du projet, ainsi il a fallu procéder à une répartition précise et efficace des tâches selon les compétences et les motivations de chacun. Cette répartition des tâches n'est nullement discriminatoire envers les membres de notre groupe, mais elle a simplement pour but d'obtenir le moteur le plus fiable et le plus efficace possible.

## Organigramme de l'organisation du travail



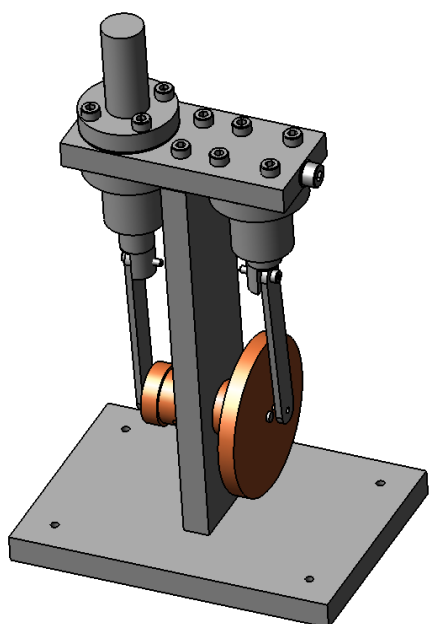


### 3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

#### 3.1. Moteur Stirling LES-01

Afin d'assurer l'un des objectifs du projet, qui était de réaliser un moteur tournant le plus vite possible, nous avons envisagé la fabrication du moteur LES-01 (voir ci-dessous). Ce moteur est essentiellement composé de pièces usinées, ce qui implique une plus grande précision. Mais hélas, nous avons dû abandonner ce projet car nous n'avons pas pu le faire usiner.

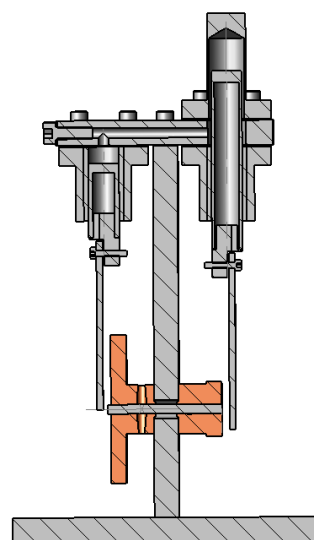
Cependant nous avons dessiné les plans de ce moteur dans l'optique de son usinage. Pour ce faire, nous avons deux solutions : la première était de faire les plans à la main et la deuxième consistait à les réaliser avec un logiciel de C.A.O (Conception Assisté par Ordinateur), nommé Solidworks. Pour être plus précis, nous avons utilisé une version étudiante délivrée par le fournisseur dans un but pédagogique, c'est-à-dire totalement légal.



Mais aussi, il faut ajouter que la conception assistée par ordinateur permet de comprendre la complexité du montage et de déterminer la méthode d'usinage la mieux adaptée. Pour être concret, si on conçoit virtuellement les pièces et si on les assemble virtuellement, lors de la fabrication réelle, nous aurons un recul sur notre travail, c'est-à-dire une meilleure efficacité.

Dans l'annexe figure les plans des pièces à usiner, elles sont extraites du site internet suivant : <http://www.moteurstirling.info/LSE-01-fr.htm> .

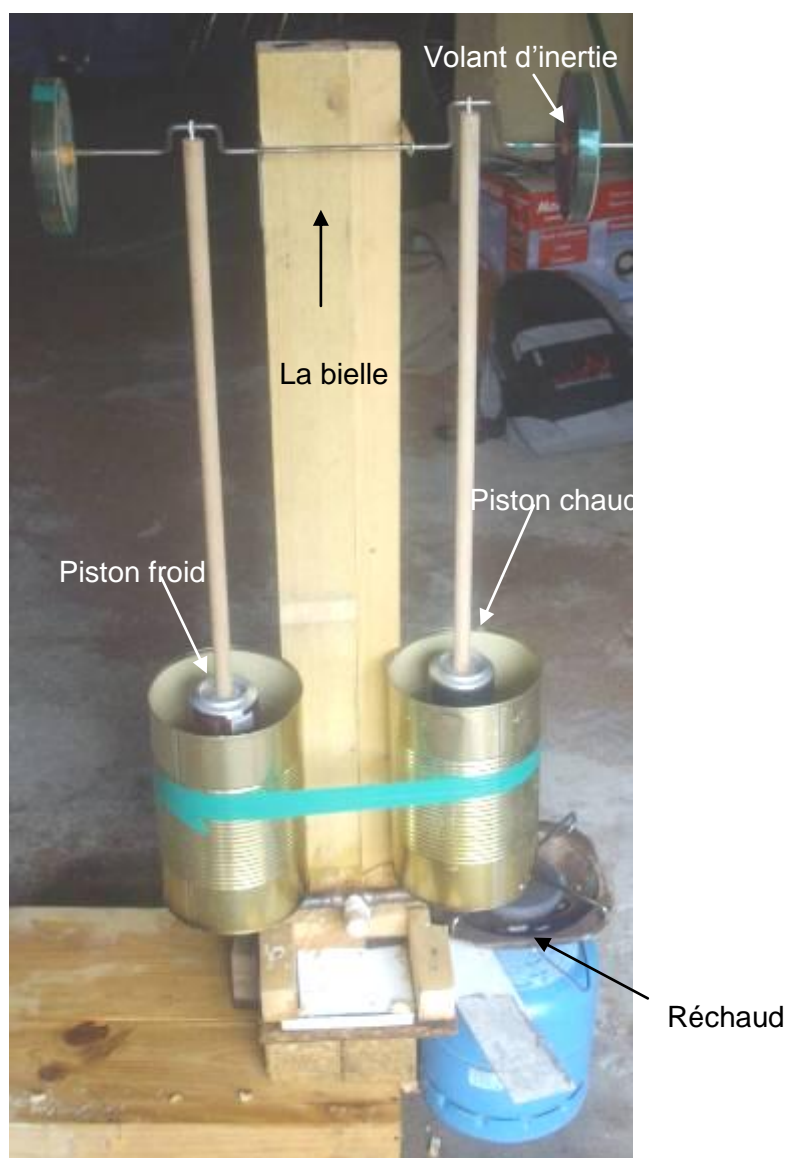
Ci-contre, nous avons réalisé une coupe du moteur. Vous pourrez noter que sur cette coupe, il manque des pièces. Ces pièces appartiennent à la même catégorie de pièces (paliers, boulons, rondelle, écrou...). Il faut souligner qu'elles sont disponibles sur internet grâce à une bibliothèque « traceparts », mais malheureusement payante. Par ailleurs, elles sont disponibles chez des fournisseurs, comme Konrad, pour sa fabrication réelle.



A-A (1 : 2)

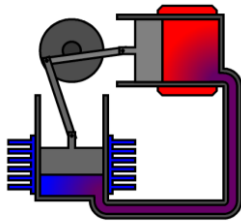
### 3.2. Moteur Stirling de William Gurstelle

#### 3.2.1. Fonctionnement du moteur

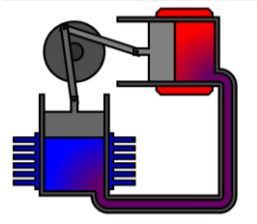


La photo ci-dessus montre le moteur Stirling de William Gurstelle en tentative de fonctionnement. Nous pouvons voir que le cylindre de droite (le cylindre chaud) a été chauffé grâce à un réchaud de camping accompagné d'un petit chalumeau (non représenté sur la photo)

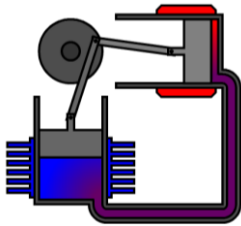
Le principe du moteur Stirling de William Gurstelle (de type alpha) est relativement simple : le fluide principal qui produit un travail est un gaz (ici de l'air) soumis à un cycle comprenant 4 phases : chauffage isochore (à volume constant), détente isotherme (à température constante), refroidissement isochore puis compression isotherme (voir explication page suivante).



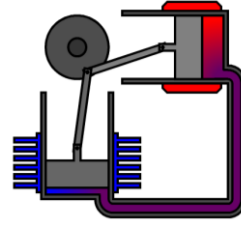
1. Chauffage : Le gaz de travail est en contact avec la paroi chaude (en rouge) du cylindre de la partie chaude. Il est chauffé et voit donc son volume augmenter. L'expansion du gaz pousse le piston chaud au fond de sa course dans le cylindre (ici vers la gauche). Le piston chaud pousse grâce à la bielle le piston froid vers le bas, ce qui concentre le gaz dans la partie chaude.



2. Détente : Le gaz est maintenant à son volume maximal. L'expansion du gaz ne peut plus se faire vers la droite (piston chaud en bout de course), et se fait maintenant (à droite) vers le cylindre froid (en bleu), lequel est de 90° moins chaud. Le piston chaud (rouge) envoie la plus grande partie du gaz vers le piston froid. Le piston bleu remonte, et par la bielle, pousse le piston rouge vers la droite, contribuant à la circulation du gaz vers le piston bleu. Dans le piston froid (bleu), la température baisse, et le volume du gaz diminue (il se contracte).

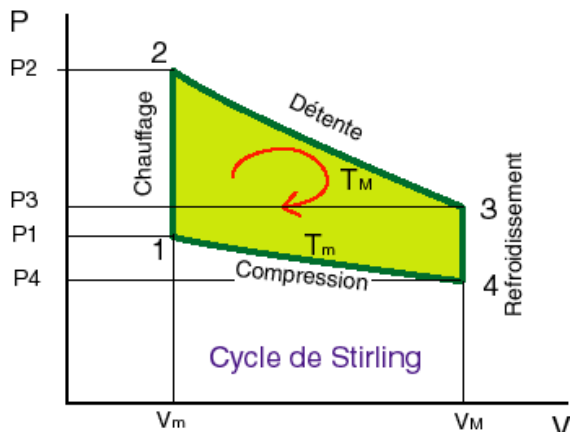


3. Refroidissement : Presque tout le gaz est maintenant dans le piston froid (bleu) et le refroidissement du gaz continue. La pression du gaz est à son minimum. Plus la différence de température entre les pistons est importante, plus les variations de pression sont fortes, et plus le moteur est puissant. Pour maintenir le point froid, le piston bleu est entouré d'un système de dissipation thermique (dans notre cas des glaçons). Le piston froid, alimenté par l'inertie des pistons, commence à redescendre en re-compressant le gaz, et la pression du gaz recommence à augmenter.



4. Compression : Poussé par l'inertie des pistons en mouvement, le gaz remonte vers le cylindre chaud où il sera chauffé une fois de plus, recommençant le cycle.

### Description du cycle :



Sur ce diagramme, nous voyons les quatre phases détaillées plus haut en images, en n'oubliant pas que détente et compression se font à températures constantes ( $T_M$  et  $T_m$ ).

L'aire colorée comprise entre les quatre segments décrivant le cycle est représentative du travail recueilli au cours d'un cycle. Ce travail peut être déterminé expérimentalement grâce à un planimètre. Malheureusement, le moteur ne fonctionnant pas, nous n'avons pas pu expérimenter ce principe de calcul.

### 3.2.2. *La réalisation du moteur*

#### a- La structure du moteur

Nous avons commencé par construire la structure de notre moteur. Nous avons choisis de la réaliser en bois comme sur les plans. De plus, il est assez facile de travailler sur ce type de matériau.



La structure était destinée à supporter les boîtes remplies d'eau et l'axe du moteur. Notre objectif était de réaliser une base solide et droite afin de bien supporter le système. Le caractère droit est primordial pour avoir un bon positionnement des canettes par rapport aux boîtes remplies d'eau.

Nous nous sommes appliqués à respecter la hauteur minimale dont nous aurions besoin pour ensuite fixer l'axe assez haut afin d'avoir la haute nécessaire pour places les tiges.

Afin de fixer les différentes parties de la structure, nous avons utilisé des clous et des vis. L'utilisation d'un niveau a permis de vérifier que l'ensemble était droit.

La principale difficulté a été de prévoir le positionnement des autres parties du moteur sur la structure afin de ne pas avoir à la refaire ensuite.

#### b- Les pistons



La deuxième étape consistait à fabriquer les pistons. Les pistons sont composés de cannettes ouvertes sur leur partie supérieure. Ces cannettes sont reliées à des tiges en bois par des vis sur leur partie inférieure. Cette fixation devait à la fois être solide et étanche. En effet, l'air contenu dans les cannettes ne devait pas s'échapper



Comme le montre cette photo, nous avons dû ruser pour trouver le centre du fond des cannettes. Nous avons placé une bille sur le fond de la cannette. Comme ce fond est arrondi, la bille s'est arrêtée au centre de l'arrondi, là où elle était au plus bas. La partie supérieure de la canette a été préalablement découpée grâce à un ouvre-boîte.

Nous avons ensuite percé le trou dans lequel allait se placer la vis. Mais la vis devait traverser la canette de l'intérieur vers l'extérieur. Toute la difficulté était donc de visser alors que l'espace dans la canette était très réduit. Nous avons donc fixé la vis au tournevis avec du silicone (voir cahier de labo).



### c- L'axe et le volant d'inertie

L'axe est constitué d'une tige métallique. Il s'agit du Vilebrequin.



Nous avons réalisé cette pièce en utilisant un étau dans lequel nous avons bloqué la tige. Nous l'avons chauffée afin de pouvoir la tordre plus facilement. Encore une fois, il est indispensable de vérifier que les angles sont droits.

Nous avons malheureusement cassé la première tige en lui faisant subir de trop fortes contraintes mécaniques. Nous avons donc été obligés d'en refaire une seconde.

L'axe est fixé sur la structure à l'aide de deux équerres. Nous avons été très minutieux quand à l'alignement horizontal des équerres. L'axe doit être droit, sinon une des canettes remontera trop haut et l'étanchéité ne sera plus assurée.



L'avant dernière étape était de construire le volant d'inertie de notre moteur. N'ayant pas trouvé des poulies adéquates, nous avons décidé de coller des CD entre eux.



Le diamètre de notre axe était bien inférieur à celui du trou au centre des CD. Nous avons fabriqué un support en bois percé en son centre. Ce support nous assurait une solidarité entre l'axe et les CD, nous avons ainsi réalisé une liaison d'encastrement.



Notre principale inquiétude était le poids de notre volant d'inertie. Nous ne savions pas combien de CD nous devions utiliser. Nous espérions adapter notre volant d'inertie en fonction des performances du moteur.

#### d- Les boîtes



Nous avons ensuite percé les boîtes. Pour cela, nous avons commencé par déterminer le centre grâce à un modèle. Ce modèle était constitué d'un cercle de papier marqué en son centre.

Le perçage des boîtes devait être le plus propre possible. Nous avons commencé par réaliser un « pré trou » constitué de plusieurs petits trous faits au compas. Nous avons ensuite percé le grand trou.



La soudure était techniquement la partie la plus difficile à réaliser. Comme nous l'avons expliqué dans notre cahier de laboratoire, nous avons brasé les 2 boîtes ; à la fois la source chaude et la source froide.

Le tuyau est constitué de quatre parties reliées entre elles par des raccords. La longueur de tuyau qui est à l'intérieur de la boîte doit absolument être conforme au plan.

#### e- L'assemblage

Après avoir réalisé chaque partie du moteur, nous l'avons assemblé. L'assemblage demande de la mise au point et de la patience. C'est à ce moment précis que l'on voit si les différentes parties du moteur ont bien été réalisées.

Nous n'avons pas rencontré de gros problèmes. Nous avons dû limer la partie de la structure en bois sur laquelle repose les boîtes et le tuyau afin de bien stabiliser le tout. De plus, nous avons à ce moment là amélioré notre volant d'inertie en rajoutant des CD.



Malheureusement, après diverses modifications, beaucoup de persévérance et 40 minutes de chauffage, le moteur ne fonctionne pas.

### **Pourquoi le moteur ne marche pas ?**

Nous avons décrit précédemment le fonctionnement du moteur d'un point de vue théorique. Sur le papier, il n'y a aucune raison pour que le moteur ne fonctionne pas. Par conséquent, le problème vient de la fabrication du moteur et non de son principe de fonctionnement. La première question qui nous vient à l'esprit est : quel est cette erreur ? Comment peut-on la réparer ?

La première étape est de vérifier son étanchéité, pour être concret il ne faut pas que le gaz de travail, ici l'air, ne s'échappe. Cette dernière est assurée par l'eau et par les soudures entre les différentes pièces du moteur. Après vérification, aucune anomalie n'est à constater.

La seconde étape est de vérifier l'équilibre ou plus précisément la stabilité des pistons à tout instant. Cette stabilité est garantie par les volants d'inertie, grâce à un équilibrage des ces 2 roues, le système doit être stable quelque soit sa position. Malheureusement, nous n'avons pas pu assurer cette dernière. Ainsi, les étapes 3 et 4 du cycle du moteur Stirling n'ont pas pu être réalisées. En effet, le refroidissement et la compression sont en partie effectuées par l'inertie du moteur, ce qui implique que celui-ci doit être équilibré durant tout ce cycle.

### 3.3. Moteur Nivéa



Après l'échec du premier moteur, Mr Rello nous a proposé de faire ce moteur qui utilise principalement des matériaux de récupération. Nous avons, au début de nos recherches considéré faire ce moteur mais nous l'avons exclus pensant que le moteur à canettes serait plus simple à réaliser.

Nous avons donc suivi les conseils de Mr Rello et avons réalisé ce moteur que nous nommerons moteur « Nivea » pour des raisons évidentes.

Le moteur « Nivea » est un moteur Stirling type Gamma. En effet, le piston de déplacement réalisé en polystyrène occupe successivement la zone chaude et la zone froide. La variation de pression met en mouvement le piston moteur réalisé avec un

morceau de gant en latex.

#### 3.3.1. Fonctionnement du moteur

Le deuxième moteur que nous avons construit (le « moteur nivéa ») est du type gamma, comme nous l'avons dit précédemment. Les moteurs de ce type ont un fonctionnement divisé en quatre étapes : un chauffage isochore, une détente isotherme, un refroidissement isochore, et enfin une compression isotherme. Ils fonctionnent avec une source chaude et une source froide : nous avons choisi pour la première de l'eau bouillante contenue dans une grande tasse, et pour la deuxième des glaçons.

##### 1. Le chauffage (entre D et C sur le diagramme)

Au cours de cette phase, le piston est peu mobile, et le volume global est minimal. En revanche, le déplaceur effectue un long trajet et le gaz se réchauffe car le brûleur cède de l'énergie thermique. La pression augmente également.

##### 2. La détente (entre C et B)

Ici, le volume augmente et la pression diminue. Le déplaceur ne bouge pas beaucoup, mais le piston moteur réalise plus de 70% de sa course et récupère l'énergie motrice (produite au cours de cette phase).

##### 3. Le refroidissement (entre B et A)

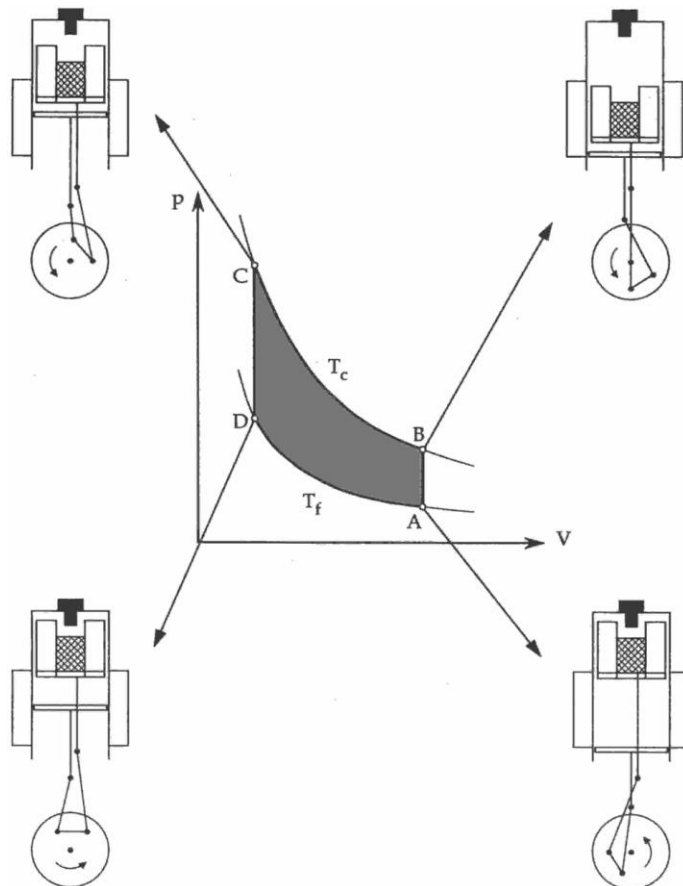
Le déplaceur effectue une grande partie de sa course et pendant ce temps le gaz se refroidit, car la source froide récupère de l'énergie thermique de la source chaude. Ceci diminue par conséquent la pression. Le piston moteur bouge peu.

##### 4. La compression (entre A et D)

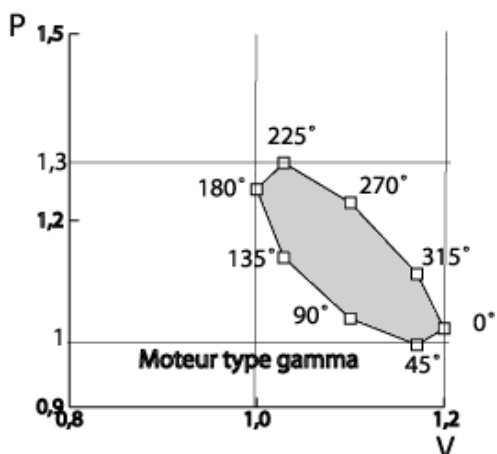
Le déplaceur reste à présent en partie supérieure : globalement le gaz est froid. A l'inverse, le piston moteur effectue la majorité de sa course : il comprime le gaz en lui cédant de l'énergie mécanique. La pression du gaz s'accroît au fur et à mesure que son volume diminue.



Voici ci-dessous le détail du diagramme (P, V) de ce type de moteur. Les illustrations sont celles d'un moteur de type alpha mais étant donné qu'il s'agit du cycle théorique le type de moteur n'a pas d'importance.

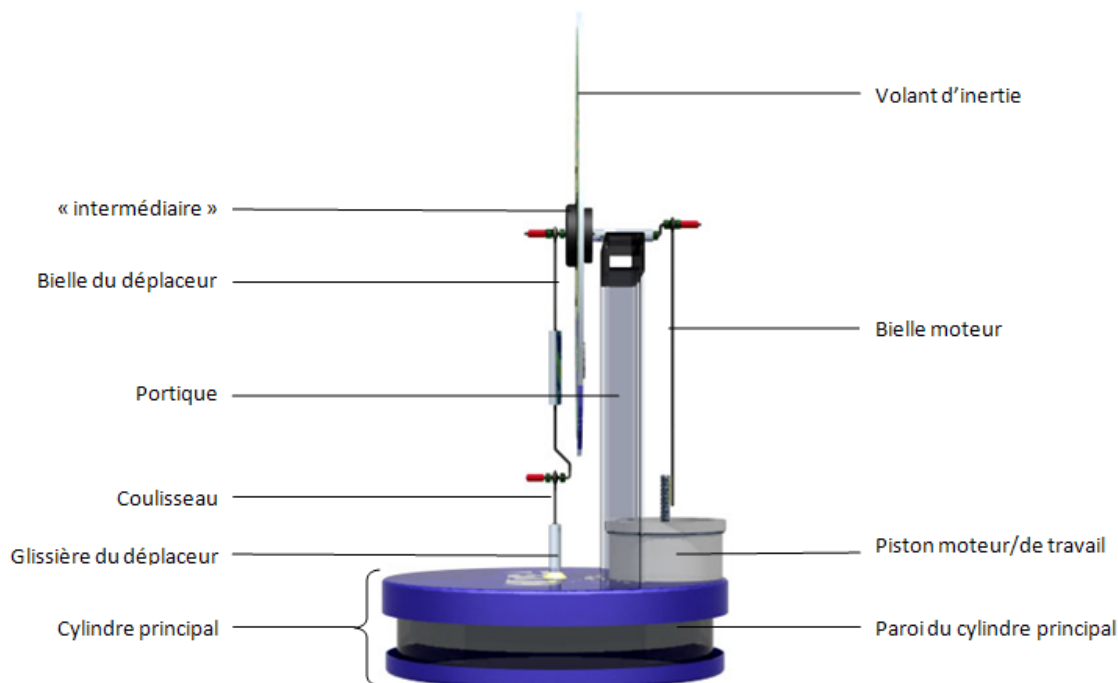


Voici par contre le cycle « réel » d'un moteur gamma avec  $T_M = 290\text{ K}$  ( $17^\circ\text{C}$ ),  $T_m = 348\text{ K}$  ( $75^\circ\text{C}$ ), et un volume couvert par le piston moteur 5 fois inférieur à celui couvert par le déplaceur :



On peut remarquer que celui-ci s'éloigne un peu du cycle théorique.

### 3.3.2. La réalisation du moteur



#### a- Le cylindre principal

La première étape a consisté à trouver les matériaux nécessaires à la fabrication du moteur. Bien que ce moteur ne se construise qu'à partir de matériaux de récupération, la plupart des pièces ont dû être achetées.

La première étape a consisté à découper la boîte de Nivea. Une tâche assez compliquée puisque l'utilisation d'une scie à métaux aurait totalement déformée la boîte. La boîte a donc été découpée au cutter et le résultat fut assez satisfaisant.

Le piston de déplacement fut réalisé en 3 exemplaires en 3 matériaux différents (mousse de matelas et 2 types différents de polystyrène) pour maximiser les chances de succès. Un tracé au compas ainsi qu'une découpe au cutter dans le sens longitudinal nous ont permis d'obtenir la bonne épaisseur. Pour finir, nous avons rattrapé le déplaceur avec des ciseaux afin d'obtenir la pièce requise.



La paroi du cylindre est une portion d'une bouteille de soda, et sa découpe s'est avérée assez pénible. La principale difficulté était d'avoir un cylindre d'une hauteur de 24mm et d'avoir les bords les plus droits possibles. Grâce à une bonne paire de ciseau, beaucoup de patience et de nombreux essais la paroi finale fut plus ou moins réussie.

Une autre étape, à première vue assez compliquée, était le perçage du trou de 22.4mm sur le sommet de la boîte. Ceci fut réalisé de manière assez précise grâce à l'outil phare du Stirling : le compas. Le trou fut en effet percé grâce à un compas à 2 pointes en grattant tout le contour du trou jusqu'à ce que la paroi cède. Puis nous avons collé de façon hermétique la boîte de pellicule qui servira de cylindre pour le piston moteur, et percé le trou pour la glissière du déplaceur.



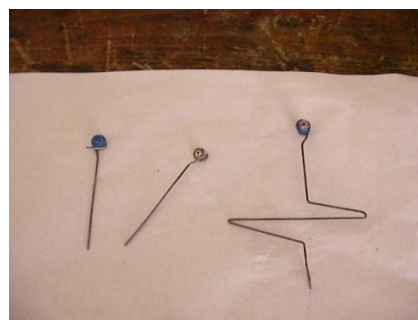
Puis, le portique fut ensuite construit et collé sur la boîte, et la glissière pour le déplaceur réalisée et introduite dans le trou central. Cette glissière est un tube de laiton, avec des perles de verres collées à chaque extrémité. Leur rôle est de diminuer le jeu entre le déplaceur et le tube.

### b- Les bielles et le déplaceur

Après avoir réalisé la structure principale du moteur, la seconde étape a consisté à réaliser les bielles et les déplaceurs qui sont en fait des morceaux de corde à piano en acier auxquels on colle des billes de verre creuses pour faire communiquer entre elles les différentes bielles et déplaceurs.

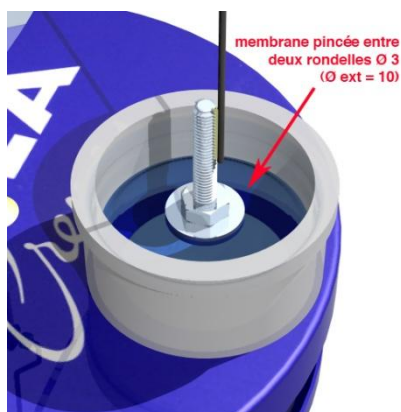
Cette tâche s'est avérée assez difficile. En effet, la corde à piano ne se tordait pas facilement et son pliage faisait souvent éclater la bille de verre. Pour éviter ce problème, nous avons préalablement collé la bille de verre dans un petit cylindre en plastique qui lui-même était collé à la corde à piano.

Sur cette photo nous pouvons voir les bielles et déplaceurs. On remarquera que la bielle du déplaceur est en forme de Z pour amortir les chocs lors de la montée et descente du piston de déplacement.



### c- Le piston moteur

Le piston moteur est réalisé grâce à un morceau de gant en latex. Une vis passe au travers de la membrane, avec celle-ci pincée entre deux rondelles. Le problème ici a été l'impossibilité de trouver les bonnes dimensions pour le vis et les rondelles. Par conséquent nous avons choisi les modèles qui nous semblaient les plus légers (à l'exception des rondelles) dans l'optique d'augmenter l'inertie du système.



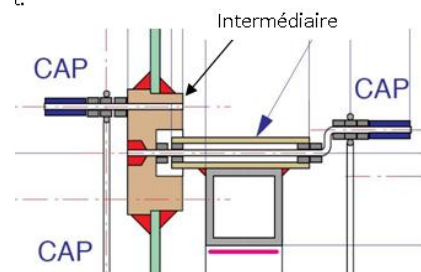
#### d- Le volant d'inertie et l'axe

La réalisation de l'axe de ce moteur est sans doute l'étape qui a demandé le plus d'attention dans la fabrication de ce moteur. L'axe a été réalisé avec des tubes de laiton et de la corde à piano avec encore l'utilisation de perle de verre. Dans un premier temps, nous avons réalisé le tube en laiton que nous avons ensuite collé sur le portique. Ensuite une étape difficile fut la réalisation de l'intermédiaire, c'est-à-dire la pièce centrale qui passe au milieu du volant d'inertie (un CD dans notre cas). L'intermédiaire utilisé est un cylindre de bois dont le diamètre est quasiment égal à celui du CD, et par conséquent son insertion a nécessité l'utilisation d'une lime à bois. Cet intermédiaire a été percé en son centre pour permettre l'insertion de la pièce en laiton préalablement collée sur le portique. Ce perçage s'est révélé difficile et a nécessité de nombreux essais car le diamètre du trou était trop petit pour utiliser une perceuse électrique. Il a donc été percé à la main grâce à des « vilebrequins ».

Comme on peut le voir sur ce plan, l'intermédiaire est percé une deuxième fois pour pouvoir faire passer la corde à piano qui est reliée à la bielle de déplacement.

Ce trou extrêmement fin et donc impossible à percer avec les outils dont nous disposons a révélé une fois de plus la polyvalence du compas dans la réalisation de ce moteur. La pointe du compas a en effet permis de percer ce second trou.

Le CD a ensuite été collé sur l'intermédiaire, lui-même étant collé sur l'axe en faisant attention d'avoir un déphasage de  $90^\circ$  entre les 2 bielles. A ce stade, le CD n'est pas très droit (il est « voilé ») et l'équilibrage n'est pas parfait.



#### e- L'assemblage final et conclusion

Pour finir le moteur, nous avons d'abord collé le déplaceur au piston de déplacement (le polystyrène) puis nous avons collé le cylindre entre les 2 parties de la boîte de Nivea grâce à du silicone pour rendre le cylindre bien étanche. Nous avons ensuite collé la bielle motrice sur la vis du piston de travail et rajouté de la colle autour de la glissière pour assurer l'étanchéité. Nous avons ensuite relié les différents déplaceurs aux bielles et ajouté de l'huile notamment au niveau de la glissière pour minimiser les frottements et aussi assurer l'étanchéité.

Les premiers tests ne furent pas concluants et beaucoup de pièces ont dû être refaites. Cependant, **le Jeudi 5 juin à 3h40 du matin** le miracle se produisit et le moteur tourna pour la première fois (Bravo Alex).

Malgré cela, quelques imperfections n'ont pas été améliorées notamment l'équilibrage du volant d'inertie. Comme nous avons le seul moteur qui fonctionnait à ce moment là (et c'est normalement toujours le cas à l'heure où nous écrivons ces lignes), nous avons décidé qu'il fallait mieux ne pas trop toucher au moteur de peur de le casser et de ne pas avoir le temps de le réparer. La vitesse maximale du moteur est pour l'instant de 93 tours/minute en utilisant un bol d'eau bouillante en dessous du moteur et des glaçons au dessus.

## 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### Conclusions sur le travail réalisé

En cinq mois passés sur ce projet nous avons essayé de concevoir trois moteurs et avons pensé à plusieurs modifications permettant d'améliorer ces derniers. Cependant après l'échec cuisant concernant notre moteur à conserve et la déception d'apprendre que nous ne pourrions pas usiné le moteur LES-01 nous nous sommes tournés sur notre dernière chance qui était le moteur Nivea et nous nous sommes rendus compte qu'avant de faire des modifications sur un modèle, il fallait tout d'abord en construire un qui fonctionne. C'est donc le moteur Nivea qui a conclut le projet moteur Stirling en étant le seul de nos moteurs à fonctionner mais au prix d'un nombre d'heures de travail bien supérieur à celui des 1H30 par semaine prévues pour l'U.V. Nos objectifs de départ ont donc été vraiment revus à la baisse.

En effet, au début de nos projets, nous nous étions mis d'accord pour fabriquer 3 moteurs différents et ajouter des pièces que nous avons créés de façon à améliorer l'efficacité du moteur. Mais malgré tout, nous avons quand même pu constater l'impact du volant d'inertie, celui des frottements, celui de l'étanchéité, et enfin celui de la différence de température, ce qui est d'après ce que nous avons compris, était le principal but de ce projet.

### Conclusions sur l'apport personnel de cette U.V. projet

#### Sébastien

« Le but de ce projet était de construire un moteur Stirling. Pour ma part, j'ai réalisé plusieurs projets à l'INSA et plus particulièrement au lycée. En ayant fait la filière Science de l'Ingénieur. J'avais par conséquent une idée précise des caractéristiques du travail en groupe et des difficultés que nous aurions à rencontrer durant ce projet.

Après plusieurs heures de travail, semaines de travail, et mois de travail, mes a priori ont été confirmés au fil du temps. Mis à part le fait que j'ai appris de ce projet que rien n'était jamais perdu, et qu'il fallait toujours croire en cette réalisation. Ainsi, l'abnégation est la première chose que je retiendrais de cette UV. Et cela pour une raison simple, elle a conduit à la réussite de notre second moteur Nivea.

L'une des raisons indispensable à la réussite d'un groupe est bien entendu la communication, mais j'ajouterais que la qualité essentielle est d'avoir des individus différents les uns des autres et qui ont des compétences différentes. En effet, chacun apprend aux autres une méthode, un regard, une approche différente sur le travail à effectuer. Ainsi, la confrontation des idées a renforcé notre groupe et a aboutit à un meilleur résultat dans notre travail.

Finalement, j'aimerais souligner que ce projet m'a conforté dans mon choix professionnel. En effet, mon seul et unique but est de travailler dans la formule 1. Avec le moteur Stirling j'ai appris le plaisir de la compétition, et surtout l'envie perpétuelle d'apporter de nouvelles évolutions technologiques à notre moteur pour gagner quelques tours/minute, qui étaient souvent synonyme de réel plaisir. »

### Denis

« Au départ, la construction d'un moteur Stirling me paraissait très difficile, voire presque irréalisable. Mais les personnes du groupe ont su me motiver et me faire croire en ce projet. N'étant pas spécialement très doué en bricolage, je me suis demandé ce que j'allais pouvoir apporter au groupe et au projet. Je me suis rendu compte que chacun peut apporter quelque chose à son niveau. La bonne entente entre les membres du groupe est primordiale. Nous n'avons eu aucun problème à ce niveau. Je ne connaissais pas tout le monde au début du projet. J'ai donc appris à les connaître.

Nous avons réalisé un vrai travail en groupe du début à la fin. Nous avons aussi fait appel à des professionnels pour réaliser les pièces hors de notre portée. Dans tout projet, il y a des responsabilités à assumer vis-à-vis des autres.

Pour conclure, je pense que cette UV est très formatrice car nous devons nous débrouiller par nos propres moyens pour trouver les matériaux, trouver des solutions techniques, ... Le travail en grande autonomie est l'un des points fort de cette UV. La satisfaction de voir enfin notre moteur tourner est déjà une grande récompense! »

### Gautier

« Durant ce projet nous avons eu le temps de construire deux moteurs Stirling, mais malheureusement seulement l'un d'entre eux tourne de manière autonome et cela à notre grand regret.

Ce projet nous a appris la démarche que tout ingénieur est censé réaliser. En effet, nous avons tout d'abord étudié les plans, et compris le fonctionnement. Puis par la suite, nous nous sommes penchés sur la réalisation, et enfin sur les différents problèmes rencontrés et sur des tentatives d'améliorations des moteurs.

Comme cela a été mentionné plus haut, nous avons essayé d'alléger le premier moteur, de réduire les frottements mais sans succès et d'avoir une étanchéité maximale. Concernant le second moteur, nous avons essayé encore une fois de réduire les frottements notamment en fabriquant un nouveau déplaceur, de maximiser la différence de température entre la source chaude et la source froide et de l'équilibrer le plus correctement possible de façon à rendre l'impact du volant d'inertie maximal.

La construction de ces 2 moteurs nous a donc permis de bien nous rendre compte des difficultés et de la complexité de la modélisation et de la construction de ce type de moteur, notamment au niveau de l'étanchéité et de la réduction des frottements. Mais également, de nous montrer, ce qu'est véritablement un projet de groupe où la répartition des tâches joue un rôle essentiel dans l'efficacité. Il est évident qu'il s'agit une expérience concrète qui nous sera sûrement utile dans l'avenir, et qui nous a changés des UV habituelles. »

### Alexandre L.

« En ce qui concerne plus particulièrement ce que m'a apporté cette U.V., je dirais tout d'abord que grâce à elle j'ai rencontré des personnes fortes sympathiques que je ne connaissais pas avant telles que Gautier, Denis et Sébastien. Ensuite j'ai dû réévaluer ma perception du travail de groupe. En effet travailler en groupe n'était pas du tout une chose que j'appréciais, je préférais réaliser les choses par moi même. Cependant durant ces cinq mois j'ai vu que réaliser seul un projet aussi vaste était impossible et aussi que chacun possédait des qualités qui m'étaient complémentaires et avait des idées auxquelles je n'avais pas obligatoirement pensées. Pour continuer, un autre point fort du projet fut qu'il m'a permis de rencontrer des personnes possédant des savoirs très variés et auxquels je n'avait jamais eu à faire. Je parle par exemple de Mr Viallon le verrier de l'Ircocf, de Mr Paresy qui devait se charger de l'usinage, ou encore de Mr Renard qui a brasé les conserves. Ceci m'amène à dire que cette U.V. m'a aussi amené à me rendre compte de la manière dont peu se dérouler un projet. J'entends par là que dans un projet (le notre par exemple) nous n'avions pas tout le nécessaire pour le réaliser, il nous a donc fallu prendre contact avec des personnes extérieures afin de trouver une solution et ne pas rester cloisonné au sein de notre groupe de travail. Enfin ce projet m'a aussi permis de toucher plus concrètement une notion vue en P1 et de réaliser un moteur Stirling qui fonctionne, chose que j'avais en vue depuis plus d'un an maintenant. »

### Nicolas

« Durant ce projet on a réussi à construire 2 moteurs dont un seul fonctionne. Bien qu'assez satisfaisant, nous avons sans cesse revus à la baisse nos attentes et je pense sincèrement que c'est l'une des choses les plus importantes qu'il ma était donnée d'apprendre. En effet ce projet ma permis de voir qu'il était nécessaire d'être réaliste, « d'éviter de vendre la peau de l'ours avant de l'avoir tué », en d'autre terme d'avoir un moteur qui marche avant d'essayer de l'améliorer.

Concernant l'UV, je pense que P6-3 et surtout ce projet de réalisation se démarque totalement des autres matières étudiés jusqu'à maintenant. Il nous a permit de réaliser un moteur, un projet concret, chose qu'il m'est encore difficile de cerner dans la plupart des matières enseignées en STPI. J'ai eu la chance de rencontrer de sympathique personnes et de voir l'importance du travail en groupe, pas seulement pour répartir le travail, mais surtout trouver des idées qu'individuellement nous n'aurions certainement pas eux ce qui nous a permit d'avoir un moteur Stirling opérationnel.

Pour conclure je pense que cet UV fut très intéressante car vraiment différente des autres. La réalisation d'un moteur Stirling fut très enrichissante sur bien des aspects et je pense sincèrement que ce type de projet devrait être réalisé par tous les élèves STPI pour montrer un lien concret entre théorie et pratique. »

### Alexandre S.

« Nous ne nous connaissions pas tous lorsque nous avons commencé ce projet, et travailler à plusieurs de cette manière est souvent assez difficile car il faut pouvoir trouver des horaires de rencontre qui conviennent à tout le monde et bien se répartir les tâches. Cependant malgré cela je pense que nous ne nous en sommes pas mal sortis. Il est certes quasi-impossible que chacun participe exactement autant que les autres, mais chaque membre a apporté ses qualités et ses idées. J'ai trouvé ceci très intéressant car cela nous a préparé à une des activités prépondérantes de l'ingénieur : le travail en équipe autour d'un projet. C'était pour moi la première fois que nous faisons cela car même si nous avons bien entendu déjà réalisé des travaux en groupe, ce n'était jamais autour d'un sujet aussi concret et appliqué à notre futur métier. En outre, nous étions très autonomes (même si notre enseignant nous donnait quelques indications parfois), ce qui est également plaisant, car même s'il est toujours plus difficile de travailler sans aide extérieure (au groupe j'entends), cela permet de se confronter davantage au projet et de s'investir. Il est vrai qu'au bout de plusieurs tentatives nous étions relativement déçus de constater qu'aucun de nos moteurs ne fonctionnait, mais quelle joie lorsque nous en avons eu un opérationnel! C'était pour nous la récompense des efforts fournis tout au long du projet. »

## Perspectives pour la poursuite de ce projet

### 1) Perspectives personnelles

#### Alexandre L.

« Concernant les perspectives pour la suite du projet, je pense que j'essaierai tout d'abord de faire fonctionner cet été le moteur à conserve. Ensuite je pense qu'avec un peu de motivation je réaliserai un autre moteur Nivea. Et enfin à une plus longue échéance j'espère usiner un moteur Stirling sur lequel je pourrai appliquer les modifications auxquelles nous avons pensé au début du projet mais que nous n'avons pu appliquer faute de temps et de réalisme. »

#### Alexandre S.

« Souhaitant intégrer le département EP, j'envisage bien sûr d'approfondir mes connaissances sur les moteurs en général et sur leur fonctionnement, car c'est un domaine qui m'attire. Quant au projet « Stirling », j'en suis très satisfait et je le recommande à quiconque aime appliquer la physique dans des situations concrètes, et aime les moteurs. »



## 2) Perspectives concernant le projet

### Le groupe

« Concernant le projet en lui même, nous pensons que c'est l'un des projets les plus intéressants et qu'il mérite d'être proposé chaque année. Cependant il est vrai que les objectifs de départ devront surement être vus à la baisse si l'usinage est impossible. Cependant même si l'usinage est possible, nous pensons que certains objectifs tels que le tracé du diagramme ou la mise en marche du Stirling dans son sens inverse ne sont pas réalisables dans la mesure où un moteur Stirling opérationnel est difficile à réaliser et que par conséquent le modifier risque d'entraîner un usinage inutile. En plus de cela il ne faut pas oublier que l'usinage d'un moteur est un travail long et méticuleux (environ 40h par moteur selon Mr Paresy). Il est donc impossible ou vraiment très difficile de demander à une personne d'usiner 4 moteurs.

Enfin un dernier point qui peut être abordé est l'orientation du projet. Bien que nous ne soyons pas tous d'accord, la majorité de notre groupe pense qu'il serait nécessaire d'être plus guidé sur le type de moteur à choisir pour éviter de se perdre en allant dans toutes les directions. Cependant l'argument s'opposant montre qu'en limitant dès le départ le projet, bien des apports de cette UV seront perdus. On peut en effet citer l'apport que cette UV a eu sur notre conception du réalisme et de la faisabilité d'un projet. »

## 5. BIBLIOGRAPHIE

[1] Noms des auteurs, "Nouvelles technologie pour l'exploration des ressources", *Edition Technip*, 1986.

[2] Noms des auteurs, "Système énergétique application ", *Les Presse- Mines de Paris*, 2001.

[3] lien internet : <http://www.moteurstirling.co3333.m/plans.php> (valide à la date du 20/06/2008)

[4] lien internet : [http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/mk\\_l01.htm](http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/mk_l01.htm) (valide à la date du 20/06/2008)

[5] lien internet : <http://www.makezine.com/images/07/stirlingengine.pdf> (valide à la date du 20/06/2008)

[6] lien internet : <http://www.photologie.fr/stirling/stirling.html> (valide à la date du 20/06/2006)

[7] lien internet : [http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/mk\\_t03.htm](http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/mk_t03.htm) (valide à la date du 20/06/2008)

[8] lien internet : [www.discountmétaux.fr](http://www.discountmétaux.fr) (valide à la date du 20/06/2008)

[9] lien internet : [www.qualichutes.com](http://www.qualichutes.com) (valide à la date du 20/08/2008)

[10] lien internet : <http://www.photologie.fr/stirling/assembleage.html> (valide à la date du 20/08/2008)

## 6. ANNEXES

### 6.1. Les moteurs

#### 6.1.1. Moteur 1 : Chenapan

Origine : <http://www.moteurstirling.co3333.m/plans.php>

Caractéristiques principales :

- Puissance : 2W
- RPM : 800 à 1000 tours par minute
- Type : Gamma

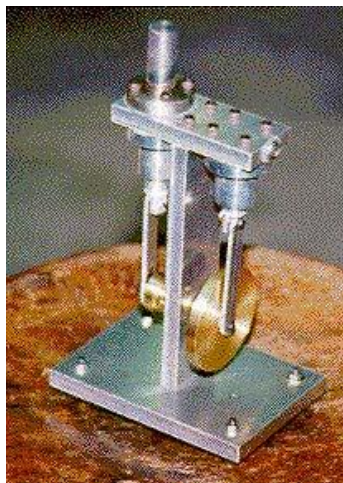


#### 6.1.2. Moteur 2 : LES-01

Origine : [http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/mk\\_l01.htm](http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/mk_l01.htm)

Caractéristiques principales

- RPM : 3000 tours par minute
- Type : alpha



### 6.1.3. Moteur 3 : Moteur de William Gurstelle

Origine : <http://www.makezine.com/images/07/stirlingengine.pdf>

Caractéristiques principales :

- RPM : 20 tours par minute
- Type : alpha



### 6.1.4. Moteur 4 : Moteur Nivea

Origine : <http://www.photologie.fr/stirling/stirling.html>

Caractéristiques :

- Puissance : 1mW
- RPM : 170 tours par minutes
- Type : Gamma

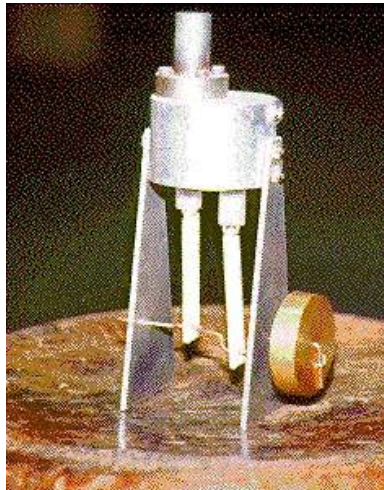


### 6.1.5. Moteur 5 : TSE-03

Origine : [http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/mk\\_t03.htm](http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/mk_t03.htm)

Caractéristiques :

- Type : alpha



NB : Ce moteur fait seulement l'objet d'une remarque. Il n'a pas été usiné ni même étudié, il n'y a donc aucune autre partie le concernant. Il n'est présent que pour montrer qu'avec un peu plus de temps et une moins grande focalisation sur les performances des moteurs nous aurions sûrement pu l'usiner.

## 6.2. Plans, notices, détails

### 6.2.1. Le chenapan

Plans :

Voir le fichier PDF intitulé « plans chenapan » donné sur le site

Notice :

Voir la notice de construction intitulée « tutoriel Chenapan » donnée sur le site

### 6.2.2. Le LES-01

Plans :

Voir les plans fournis sur le site et mise en plan solidworks (ci-après dans le document)

Notice :

Ce référer au lien : [http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/I01\\_k3.htm](http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/I01_k3.htm)

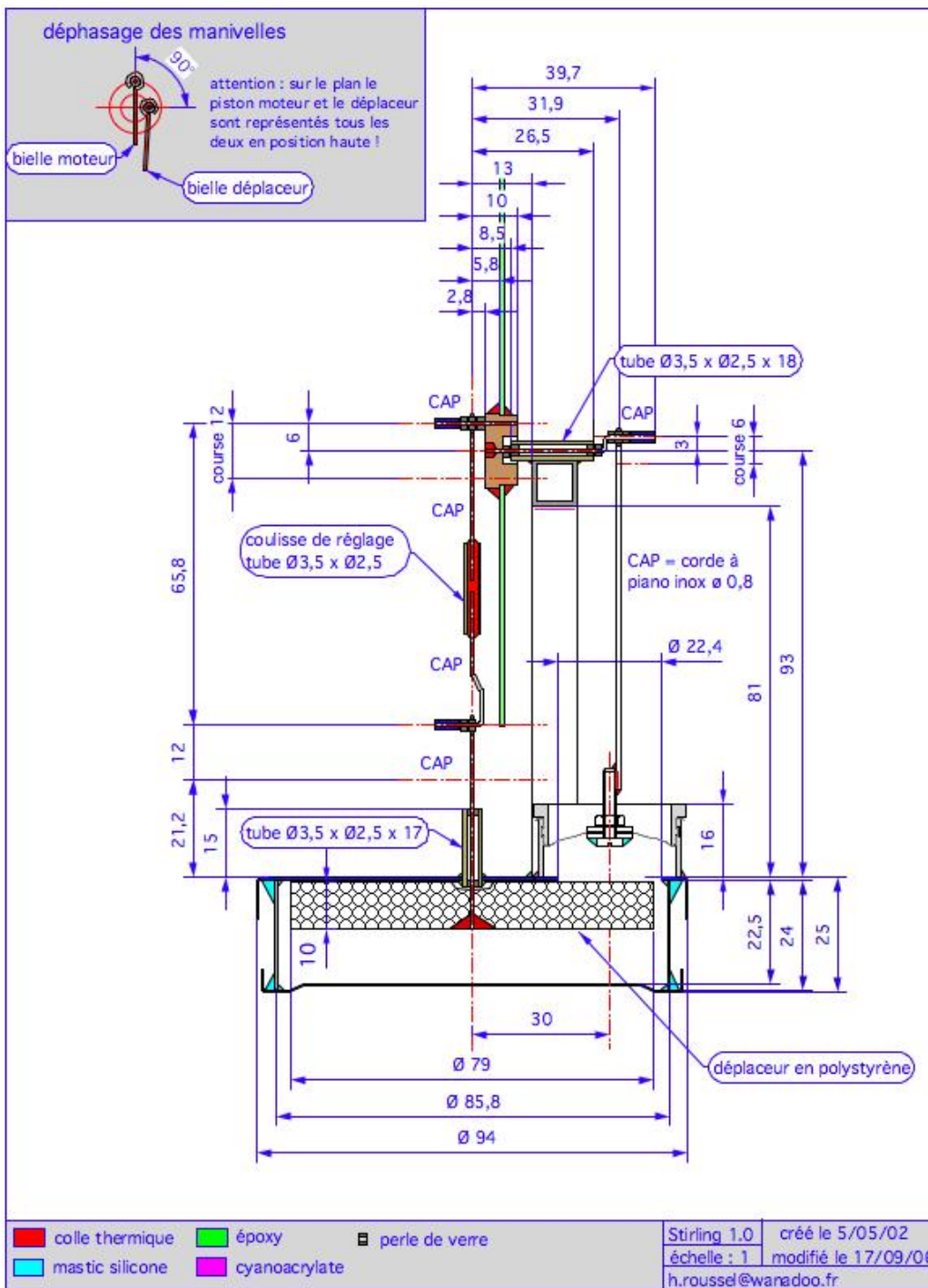
### 6.2.3. Le moteur à conserve

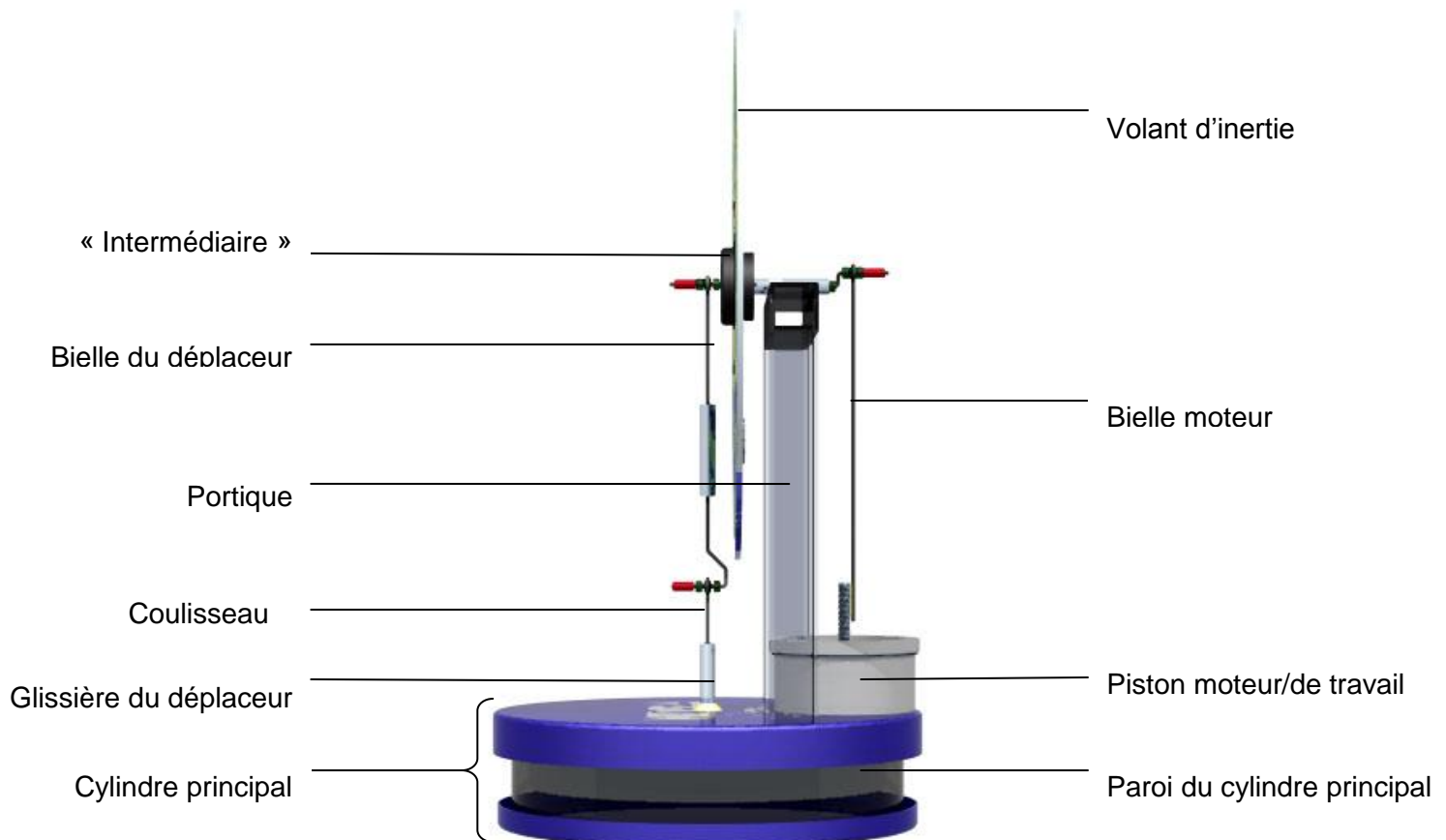
Plan et notice :

Voir le fichier pdf sur le site.

### 6.2.4. Le Nivea

Plan :



Nom des parties :Notices :

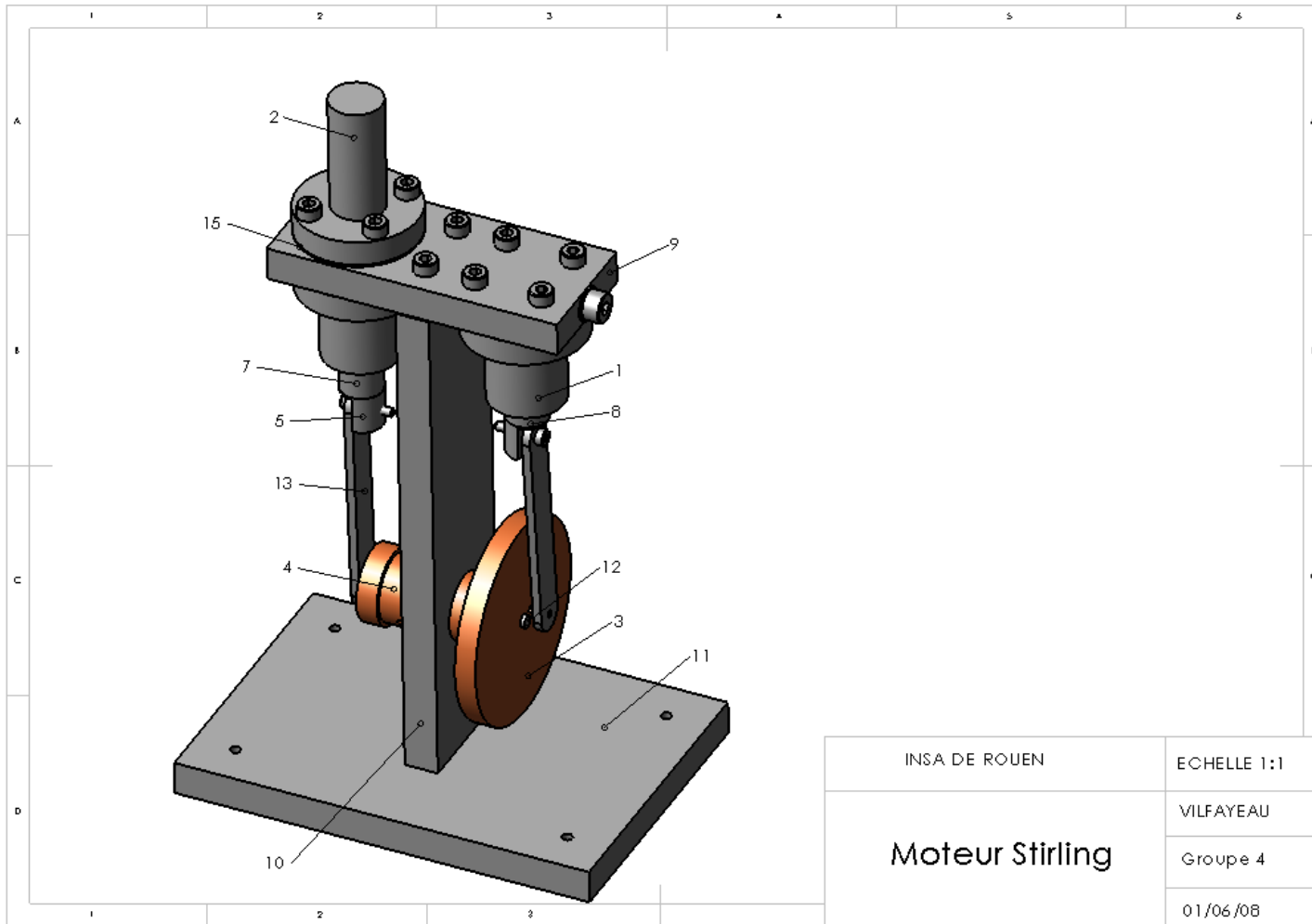
Ce référer aux liens :

<http://www.photologie.fr/stirling/stirling2.html#construction>

<http://www.photologie.fr/stirling/assemblage.html>

### 6.3. Schémas de montages, plans de conception

Voici l'ensemble des plans réalisé à l'aide Solidworks (un logiciel de Conception Assisté par Ordinateur). La mise en plan 3D a été réalisé grâce E-Drawings (un module de Solidworks)



INSA DE ROUEN	ECHELLE 1:1
<b>Moteur Stirling</b>	VILFAYEAU
	Groupe 4
	01/06/08



