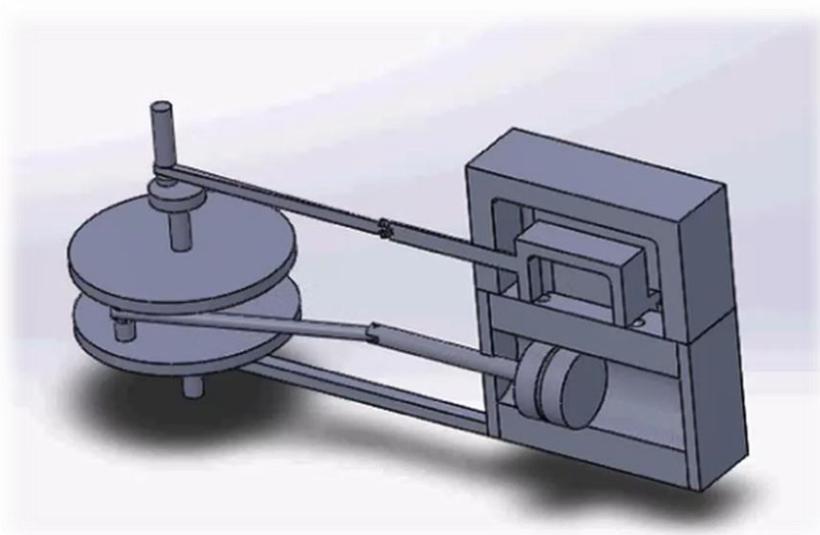


DIMENSIONNEMENT D'UN PISTON A VAPEUR



Etudiants :

Marine CERES

Lucile NAMUR

Thibaud COENE

Blandine PRUDON

Emilie HENRIQUES

Selena SAINT-PRIX

Enseignant-responsable du projet :

Clément BRUNET

Date de remise du rapport : **17/06/2019**

Référence du projet : **STPI/P6/2019 – 12**

Intitulé du projet : ***Dimensionnement d'un vérin à vapeur***

Type de projet : ***Bibliographie, Conception Assistée par Ordinateur, Thermodynamique***

Objectifs du projet :

- Dimensionner un système en respectant des contraintes de coût et de possibilité de création.
- Utiliser un logiciel de CAO pour modéliser notre projet.
- Prendre en compte la thermodynamique pour dimensionner correctement notre vérin.

Mots-clefs du projet : ***Recherches***

Dimensionnement

Validation théorique

Conception

Table des matières

INTRODUCTION.....	5
ORGANISATION.....	6
1 – PARTIE HISTORIQUE.....	7
1.1. Evolution des machines à vapeur.....	7
1.1.1. Les précurseurs	7
1.1.2. James WATT et la révolution industrielle.....	8
1.1.3. La locomotive à vapeur	8
2 – CALCULS THÉORIQUES	9
3 – CONCEPTION	11
3.1 – Fonctionnement technique.....	11
3.2 – Elaboration du modèle	13
3.3 – Conception assistée par ordinateur.....	16
3.3.1 – Le cylindre.....	16
3.3.2 – Le tiroir	17
3.3.3 – Le réservoir	18
3.3.4 – Le piston	18
3.3.5 – La manivelle	19
CONCLUSION	21
BIBLIOGRAPHIE.....	22
ANNEXE	24

INTRODUCTION

Dans le cadre de notre projet de physique nous avons eu pour but de dimensionner et de concevoir un piston à vapeur. Celui-ci réunit la conception assistée par ordinateur à des calculs théoriques thermodynamiques.

Dans un premier temps, grâce à nos questionnements et nos recherches, nous avons convenu que notre piston aurait des dimensions de l'ordre d'une quinzaine de centimètres. En effet, la taille est un paramètre essentiel. Notre piston ne devait pas être trop imposant pour une question de poids, de coût et de facilité de fabrication.

Dans un second temps, la simplicité de technique et de réalisation est un facteur qui a orienté notre projet. Effectivement, lors de nos recherches, nous avons rencontré de nombreux modèles possibles de pistons à vapeur. La principale différence entre ces modèles résidait dans le système d'admission de la vapeur. Nous nous sommes donc orientés vers un des plus réalisable à notre échelle.

Par la suite, l'efficacité de notre piston est également un aspect non négligeable. Afin d'avoir un projet réalisable et efficace, nous avons dimensionné notre piston à vapeur grâce à des calculs thermodynamiques.

Finalement, nous nous sommes rendu compte que l'objectif majeur de ce projet, au-delà du dimensionnement d'un piston à vapeur, était de travailler notre Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Ajouter à cela, réaliser les difficultés du travail de conception fait aussi parti des finalités du projet.

ORGANISATION

À chaque étape de notre projet nous nous sommes réparti le travail de la manière la plus équitable possible.

Voici un tableau récapitulatif de ce que chacun a pu faire durant ce projet.

	Recherches	Calculs théoriques	Schématisation	CAO
Marine	<ul style="list-style-type: none"> • Histoire des machines à vapeur • Diagramme PV 	/	<ul style="list-style-type: none"> • 1^{er} piston 	<ul style="list-style-type: none"> • Réservoir (non utilisé)
Thibaud	<ul style="list-style-type: none"> • Locomotive à vapeur • Etanchéité du piston • Diagramme PV 	<ul style="list-style-type: none"> • Calculs thermiques • Diagramme PV 	/	<ul style="list-style-type: none"> • Support (non utilisé)
Emilie	<ul style="list-style-type: none"> • Histoire • Etanchéité • Manivelle 	/	<ul style="list-style-type: none"> • Contacteur • Soupapes • Bascule 	<ul style="list-style-type: none"> • Piston • Manivelle • Mise en plan • Tiges
Lucile	<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement machine à vapeur • Cylindre / Piston • Types de tiroirs • Rapport d'excentrique • Etanchéité 	<ul style="list-style-type: none"> • Calculs thermiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Versions 1, 2 et 3 du système • Tiroir plan 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en plan (dessin)
Blandine	<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement machines à vapeur/ Soupapes • Etanchéité • Tiroir plan • Manivelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Calculs thermiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Manivelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en plan (dessin)
Selena	<ul style="list-style-type: none"> • Calculs de rendement et puissance pour une machine à vapeur • Diagramme PV 	/	<ul style="list-style-type: none"> • Cylindre • Tiroir • Réservoir 	<ul style="list-style-type: none"> • Réservoir • Cylindre • Tiroir • Mise en plan

Au niveau de la communication, nous avons créé un groupe pour s'envoyer des messages afin de se tenir au courant des avancées de notre projet. Nous avons aussi créé un dossier sur Google Drive où chacun a mis ses notes, les documents utiles...

Nous nous sommes parfois vus en dehors des heures de P6, en groupe entier ou seulement en partie, lorsque cela a été nécessaire.

1 – PARTIE HISTORIQUE

1.1. Evolution des machines à vapeur

1.1.1. Les précurseurs

Les premiers prototypes de machines à vapeur ont fait leur apparition dès l'Antiquité. En effet durant le 1^{er} siècle, Heron d'Alexandrie conçut pour la toute première fois une machine utilisant de la vapeur d'eau (image ci-dessous). Appelée Eolipyle, cette machine avait pour unique but de mettre en rotation la sphère autour de son axe horizontale grâce à la pression de la vapeur.



Figure 1 - Eolipyle de Heron

Ensuite, entre le XVII^{ème} et le XVIII^{ème} siècle, Denis PAPIN un physicien français mit au point un système de pompage de l'eau grâce à un piston et de la vapeur d'eau. Cette machine fut par la suite améliorée par Thomas Savery, un mécanicien anglais qui la rendit utile à l'exploitation minière. Cependant ces deux machines possèdent un rendement trop faible, nous ne pouvons donc pas nous baser sur celle-ci pour dimensionner notre piston à vapeur. De plus, elles devaient être relancées couramment, car elles ne pouvaient pas fonctionner continuellement.

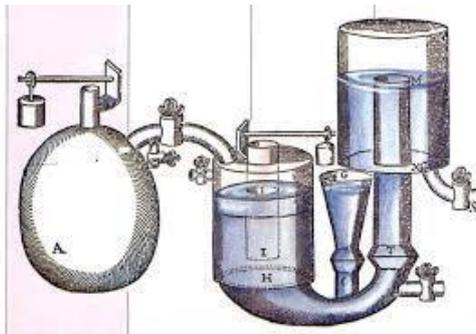


Figure 2 - Machine de Denis PAPIN

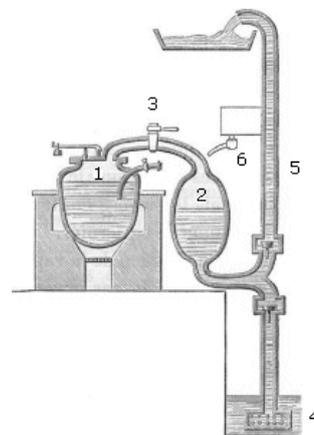


Figure 3 - Machine de Thomas Savery

1.1.2. *James WATT et la révolution industrielle*

Courant XVIII^{ème} siècle, James Watt perfectionna les modèles précédents afin d'obtenir une machine à vapeur fonctionnant en continu avec un meilleur rendement. Dans ce modèle, la vapeur est utilisée sous pression.

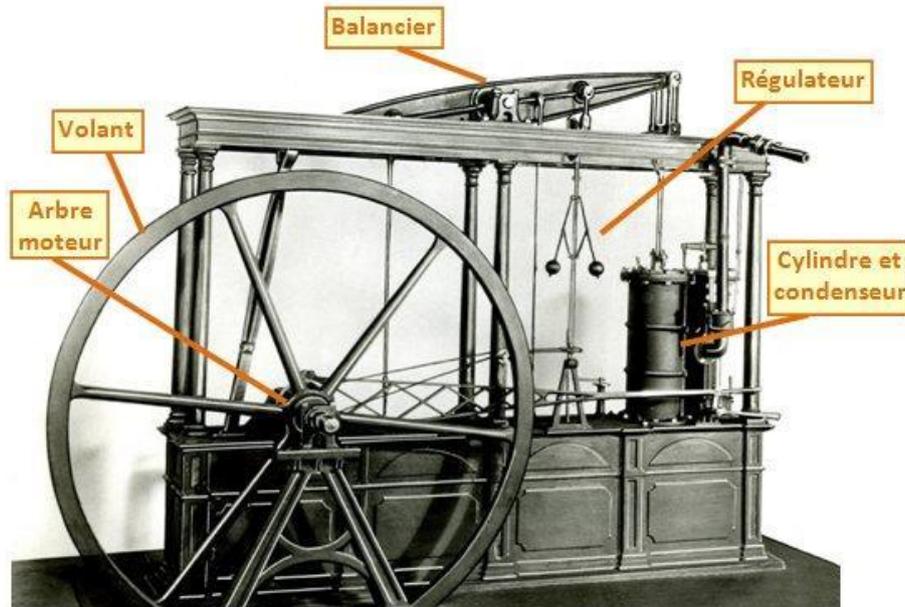


Figure 4 - Machine de James Watt

À travers ces recherches, nous avons convenu que le modèle de la machine à vapeur de Watt était le plus intéressant pour notre projet étant donné son fonctionnement et son efficacité.

1.1.3. *La locomotive à vapeur*

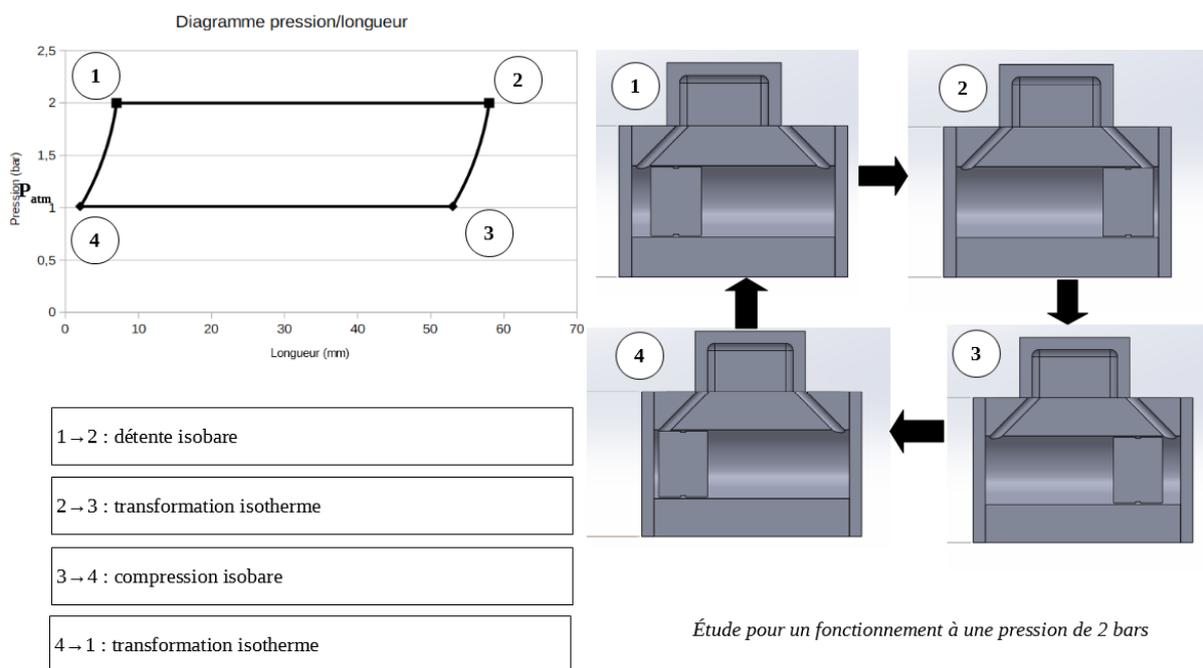
Nous avons aussi eu l'occasion de nous pencher sur les locomotives à vapeur. En effet, quand on parle de moteur à vapeur, les locomotives sont la première invention qui nous vient à l'esprit. Elles sont apparues au XIX^{ème} siècle, pendant la révolution industrielle et sont un symbole de cette époque. Elles sont aussi très intéressantes pour notre projet, puisque le moteur qu'elles contenaient était très similaire au nôtre avec un piston et un tiroir à mouvement alternatif.

2 – CALCULS THÉORIQUES

Après avoir imaginé un modèle de piston à vapeur, et avant d'envisager de le créer, il a bien sûr été nécessaire d'effectuer quelques calculs. En effet, cela permettait de prévoir un peu mieux le fonctionnement du système.

Diagramme PV

Nous avons donc étudié le diagramme pression/volume du piston qui aide à mieux visualiser son comportement. Il a fallu poser le problème et envisager les différentes étapes de déplacement du piston dans son cylindre pour créer le diagramme ci-dessous :



Il faut noter que ce diagramme a été imaginé pour notre piston fonctionnant à une pression de 2 bars, mais il est possible de l'adapter pour toute pression supérieure à la pression atmosphérique. De plus, pour simplifier la lecture, on a choisi de ne pas afficher le volume mais la longueur entre le début du cylindre à gauche, et la face gauche du piston. Pour obtenir le volume, il faut simplement multiplier la longueur par la surface du piston. Enfin, l'étude est faite du côté gauche du piston.

Ici, les étapes 1→2 et 3→4 représentent le déplacement du piston. Ce sont des étapes classiques qui sont respectivement une détente isobare et une compression isobare. Les étapes les plus intéressantes sont celles qui ont une forme logarithmique. En théorie, pour l'étape 2→3, cette forme ne devrait pas apparaître si l'échappement du gaz était instantané mais en pratique, lors du déplacement du tiroir dans notre piston, l'échappement du gaz ne se fait pas subitement. Il y a un court laps de temps pendant lequel le trou pour l'échappement n'est pas complètement ouvert, donc le gaz passe difficilement, d'où l'aspect logarithmique.

Ici, le volume V_4 à 58mm est le volume atteint à cet instant particulier où l'échappement n'est pas complètement ouvert et où la pression commence seulement à diminuer.

De même pour l'étape 4→1, sauf que cette fois-ci, ce n'est plus l'échappement qui est ralenti mais l'admission.

3 – CONCEPTION

3.1 – Fonctionnement technique

Les différentes pièces :

- Piston et son support

Le piston glisse dans son support sous la pression des gaz entraînant ainsi la manivelle.

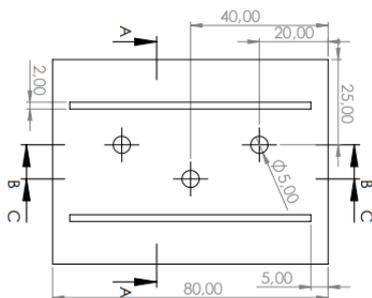


Figure 5 - Réservoir vu du dessus



Figure 6 - Piston

- Tiroir

Posé sur des rails, le tiroir bouge latéralement. Il va bloquer ou non les trous d'admission et d'échappement en fonction de sa position. Son mouvement est entraîné par la manivelle.

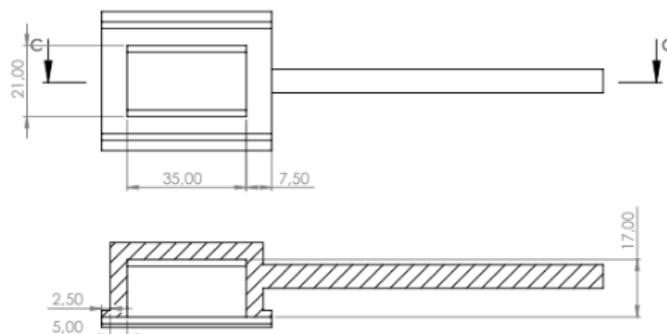


Figure 7 - Tiroir vu du dessus et vue latérale

- Réservoir

Sa fonction est de stocker le gaz avant son entrée dans le cylindre contenant le piston

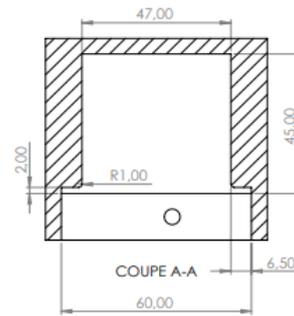


Figure 8 - Réservoir vu de face

- Manivelle

La manivelle sert à coordonner les mouvements du tiroir et du piston afin que la machine à vapeur fonctionne correctement.

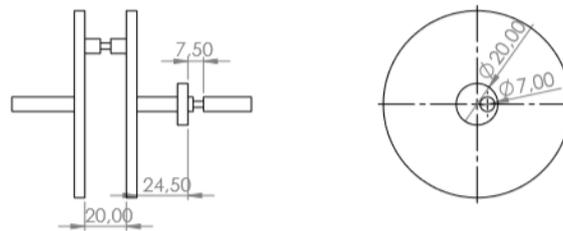


Figure 9 - Manivelle vue latérale et vue du dessus

Fonctionnement :

Lors de nos recherches au début de ce projet, nous avons rencontré deux types de tiroir : le tiroir cylindrique et le tiroir plan, leur fonctionnement étant presque similaire. Nous avons également pensé à un système de soupapes ainsi qu'un système avec un contacteur (cf. Annexe).

Cependant nous nous sommes rapidement rendu compte que cela n'était pas réalisable : en effet les soupapes étaient compliquées à produire ainsi qu'à mettre en place.

Quant au contacteur, ce système n'était pas assez étanche et difficile à maintenir sur le piston.

Pour la réalisation de notre projet, nous sommes partis sur l'idée d'un tiroir plan, par soucis d'étanchéité.

Le fonctionnement commence par une admission de gaz venant du réservoir (1). La pression va alors pousser le piston dans un sens (2). De l'autre côté du piston, le gaz pression va être évacué en passant sous le tiroir {(3) et (4)}. De là, l'évacuation se fait par un trou percé dans le support du piston. (5).

En même temps, le piston est relié à une manivelle qui va tourner entraînant la tige du tiroir (6). Ainsi, le tiroir va bouger de telle manière que lorsque le gaz rentre, le trou d'admission soit directement relié au réservoir et que le trou d'expulsion se situe sous le tiroir, afin de permettre une évacuation du gaz.

Ensuite, le schéma s'inverse. Le tiroir va bouger pour bloquer le trou qui permettait l'admission et ainsi permettre une admission par le trou qui servait auparavant d'évacuation. Et ainsi de suite.

Mouvement du piston de la gauche vers la droite :

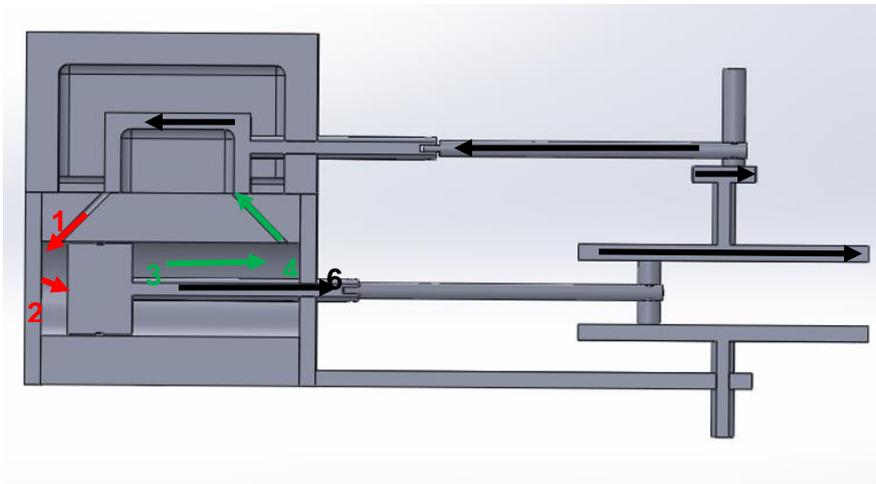


Figure 10 - Système de lumières d'admission et d'échappement

Echappement :

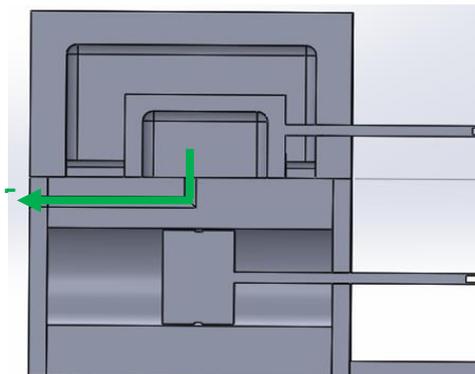


Figure 11 - Echappement vers l'extérieur

3.2 – Elaboration du modèle

Après avoir identifié les enjeux techniques de la machine que nous devons réaliser, nous avons entamé une phase d'élaboration d'une machine en réalisant des plans 2D.

En effet, nous connaissons les différents composants nécessaires à la création d'une machine à vapeur avec un système d'admission à tiroir plan, mais il fallait dès lors concevoir l'assemblage de toutes ces pièces de façon optimisée.

Pour cela, nous avons réalisé des maquettes qui ont évoluées en fonction des contraintes techniques, mais aussi des contraintes de taille ou encore de coût.

1er modèle :

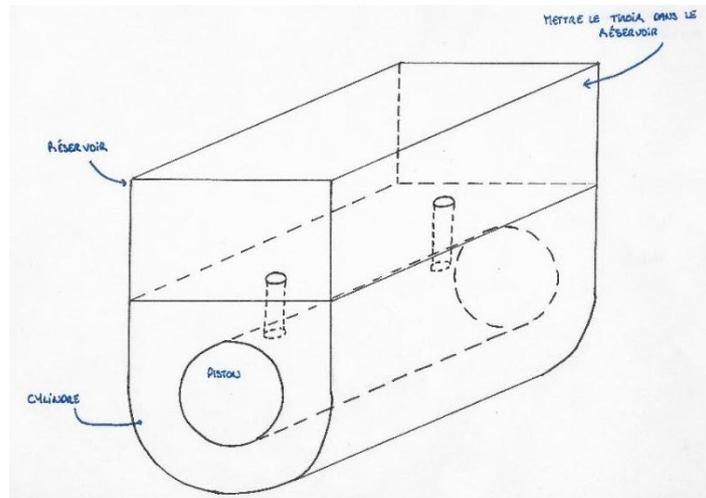


Figure 12- 1er modèle du cylindre

La première version de notre machine consistait en un demi cylindre creusé pour accueillir le piston et au-dessus de celui-ci venait se souder le réservoir permettant de contenir la vapeur et le tiroir.

Nous avons choisi de créer ce demi-cylindre afin d'utiliser le moins de matière possible. Toutefois, au vu des petites dimensions choisies pour l'ensemble, nous avons abandonné l'idée d'un extérieur utilisant peu de matière car le coût n'en serait pas supérieur.

De plus, ce modèle permettait de visualiser l'aspect extérieur ainsi que l'emplacement des différents composants mais celui-ci ne prenait pas en compte les mouvements de translation du tiroir.

2ème modèle :

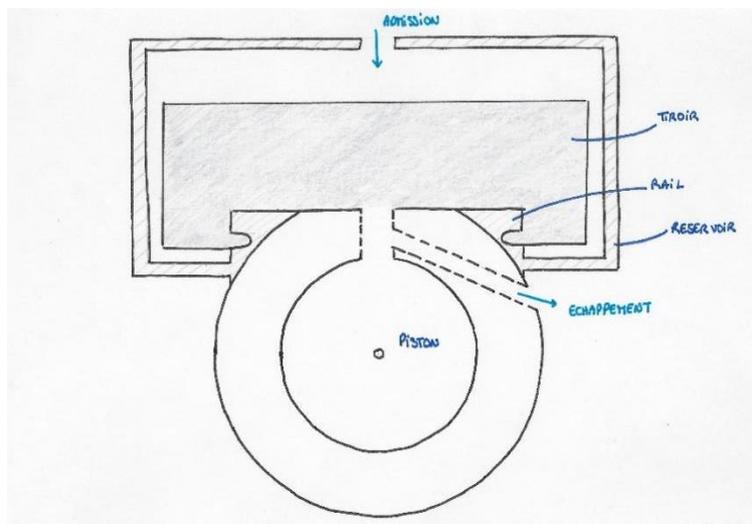


Figure 13- 2nd modèle – Vue de face

Lors de la conception de ce modèle nous avons voulu préciser le mode d'installation du tiroir. En effet, cette pièce de la machine doit pouvoir coulisser fluidement tout en restant collée au haut du cylindre, faisant ainsi la jonction avec l'enceinte contenant le piston.

Nous avons donc pensé un système de rails de chaque côté du cylindre (voir plan en vue de face ci-dessus). Par ailleurs, la rainure de ces rails aurait été arrondie afin de limiter les frottements.

Nous avons pensé notre tiroir de sorte que celui-ci vienne s'encaster dans les rainures en entourant alors le rail. Ce modèle permettait donc la translation horizontale, tout en bloquant la translation verticale, collant ainsi le tiroir contre la paroi.

Toutefois, encastrement une pièce de cette manière n'est pas simple d'un point de vue technique, il aurait donc fallu des outils perfectionnés, augmentant ainsi le coût de production de ces pièces mais aussi le temps de fabrication.

De plus, la disposition des rails comme défini sur le schéma, nécessitait l'ajout de matière sur le cylindre pour permettre l'encastrement du tiroir et du réservoir, ce qui d'un point de vue technique n'est pas réalisable. En effet, l'assemblage de ces différents composants aurait été complexe et n'aurait pas permis de pouvoir démonter simplement l'ensemble, car nous aurions dû souder les différents composants.

3^{ème} modèle :

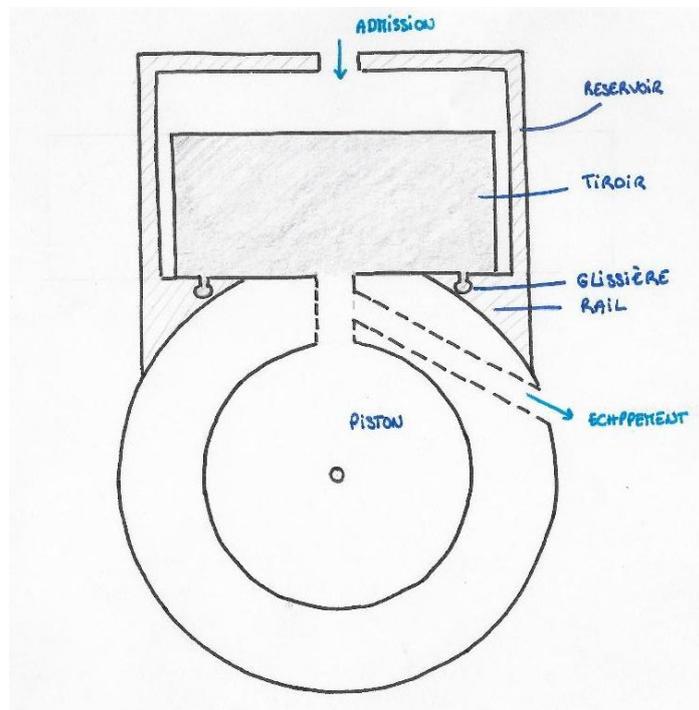


Figure 14 – 3^{ème} modèle

Nous avons donc dans un troisième temps simplifié le modèle vu précédemment en plaçant les glissières sur le dessus. Nous partions avec l'idée que l'enceinte du piston ne serait plus totalement cylindrique mais serait rectangulaire sur le dessus, facilitant ainsi la pose du tiroir mais surtout celle du réservoir qu'il suffirait de fixer sur celui-ci.

Cependant, cette méthode-ci s'est aussi révélée complexe à réaliser d'un point de vue technique et posait donc les mêmes sortes de problème que le modèle n°2.

Or, nous avons décidé d'approfondir cette maquette pour créer notre machine finale.

3.3 – Conception assistée par ordinateur

Ayant choisi notre modèle final, et ses dimensions, nous avons pu nous atteler à la modélisation de celui-ci sur SolidWorks. La réalisation de notre assemblage nécessitait la création de 5 pièces. Soit le cylindre, le piston, le réservoir, le tiroir plan et la manivelle.

3.3.1 – Le cylindre

En tout premier lieu nous avons modélisé le cylindre, car c'est cette pièce qui allait nous permettre par la suite de dimensionner celles restantes. Le cylindre a été l'une des pièces les plus difficiles à concevoir. En effet, au fur et à mesure que celui-ci avançait, nous nous sommes rendu compte de bien des problèmes.

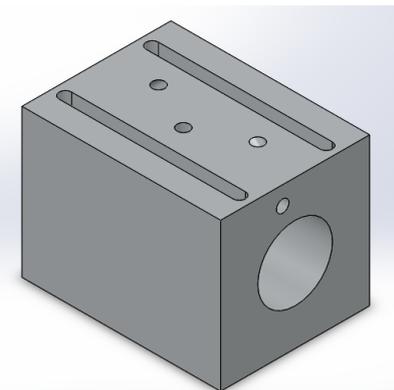
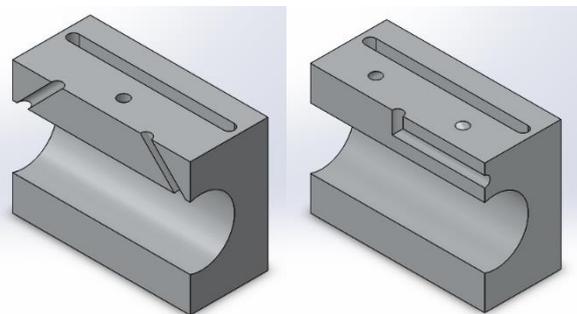


Figure 16 - Le cylindre



Tout d'abord il y a eu la question des lumières d'admissions et d'échappement. Sur la plupart des modèles que nous avons trouvés, et dont nous nous inspirions, ces trois trous étaient sur un même plan. Or, dans notre cas, on ne pouvait faire de même car l'échappement aurait croisé l'une des admissions. Il a donc fallu créer deux plans différents tout en veillant à ce que les orifices d'admissions coïncident bien avec la chambre du piston.

Pour la réalisation de ces perçages et des deux rails il a fallu tenir compte de l'usinage et penser à la façon dont ils allaient être réalisés. En effet, après notre première conception nous avons dû modifier plusieurs fois le modèle, car certaines de nos idées n'étaient pas réalisables. Notre modèle final contient donc deux orifices d'admission creusés avec un angle de 45° par rapport à l'horizontale, un orifice d'émission à angle droit qu'il faudra creuser en deux temps et de deux rails permettant le guidage en translation du rail. La pièce mesure huit centimètre de long pour une face carré de côté six centimètre.

Nous avons ensuite modélisé les deux faces refermant le cylindre avec pour idée de les visser sur celui-ci. Pour l'étanchéité nous avons décidé d'opter pour de la pâte à joint, plutôt que pour un joint, car plus facile à mettre en œuvre et moins coûteuse.

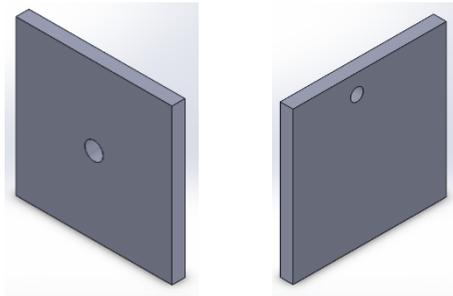


Figure 17 - Les orifices d'échappement

3.3.2 – Le tiroir

Nous avons particulièrement travaillé sur le tiroir qui se devait de répondre à certains critères afin de distribuer correctement la vapeur d'un côté du piston tout en échappant correctement la vapeur de la précédente admission vers l'extérieur. Afin de réussir cela nous nous sommes basé sur nos recherches. En effet, nous

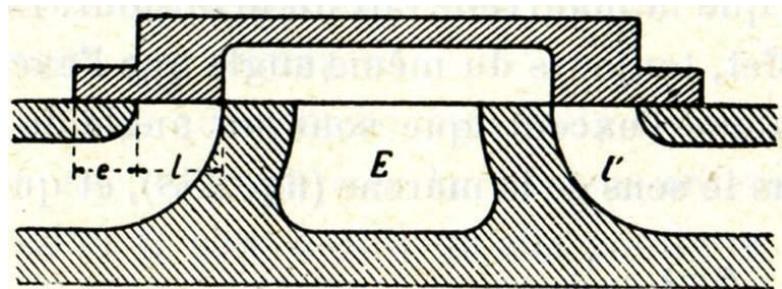


Figure 18 - Tiroir plan

avons trouvé une corrélation entre la course de notre tiroir, le diamètre de nos orifices d'admission, le rayon de notre excentrique pour la manivelle ainsi que l'épaisseur du tiroir.

Dans notre modèle le petit rebord d'une longueur e a été supprimée dans un souci de facilité de conception. Cependant grâce à ce schéma nous avons pu établir un lien entre course et excentrique. La course de notre tiroir est de 10 millimètres, notre excentrique devra donc avoir un rayon de 5 millimètres.

La conception du tiroir final est le fruit de multiples esquisses et de bien des changements depuis le modèle initial. En effet, en premier lieu nous avons créé un tiroir assez fin et dont nous avons choisi de bloquer la translation suivant l'axe Y grâce à un petit support. Afin de minimiser les frottements les rails étaient arrondis.

Nous avons modifié ce modèle car il était beaucoup trop difficile à usiner.

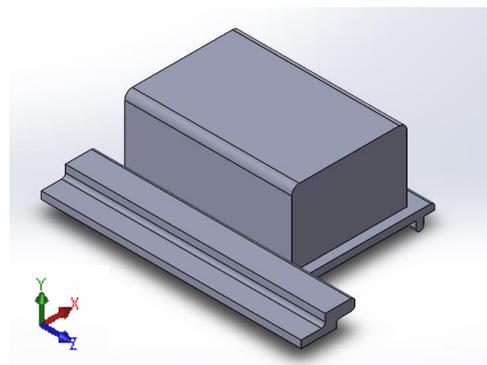


Figure 19 - Le tiroir et son support

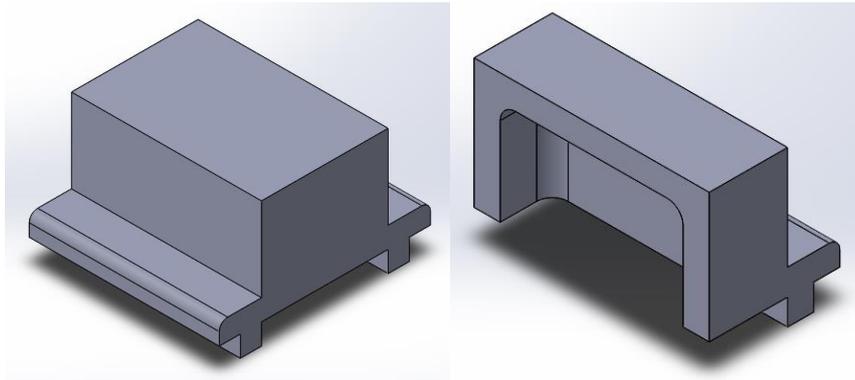


Figure 20 - Le tiroir final

Notre tiroir final est beaucoup plus épais et donc plus résistant (la paroi et les rails du modèle précédent ne faisaient que 2 mm d'épaisseur). Le rebord que l'on peut voir sur la vue de face à également été supprimé.

Le petit support qui avait été créé n'est plus nécessaire car c'est le réservoir qui en s'appuyant directement sur le tiroir va bloquer sa translation selon l'axe Y.

3.3.3 – Le réservoir

Pour la modélisation du réservoir nous avons longuement hésité entre différents modèles. Nous nous sommes finalement décidés et avons choisi de modéliser un réservoir dont toutes les faces sont de même épaisseur. Cela permettra ainsi de faciliter la conception de celui-ci. Comme on peut le voir sur l'image nous avons extrudé de la matière le long de l'arrête intérieur afin de permettre au réservoir de se poser sur le tiroir pour que celui-ci ne puisse se soulever. En effet, il est important que le gaz à pression atmosphérique à l'intérieur du tiroir ne rentre pas en contact avec le gaz sous pression à l'intérieur du réservoir. Celui-ci sera fixé sur le cylindre grâce à de longues vis. L'étanchéité serait assurée une fois encore par de la pâte à joint.

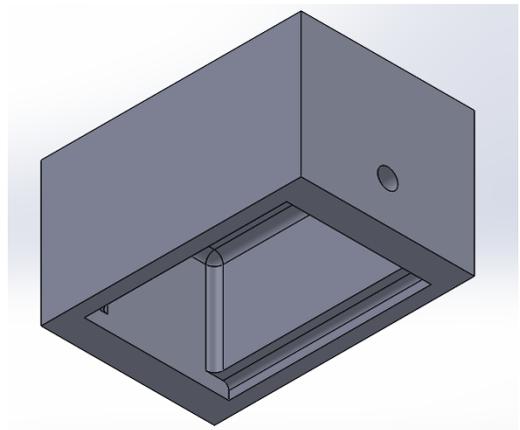


Figure 21 - Le réservoir

3.3.4 – Le piston

Au niveau de la conception du piston, elle n'a pas été très compliquée. Cependant il y avait certaines contraintes à prendre en compte. En effet, il fallait penser au fait qu'on puisse, s'il était réalisé, mettre un joint d'étanchéité au niveau de la tête du piston : les deux chambres devant être totalement isolées l'une de l'autre. Nous avons donc fait sur la tête du piston une fente de 2 mm pour pouvoir y mettre un joint torique.

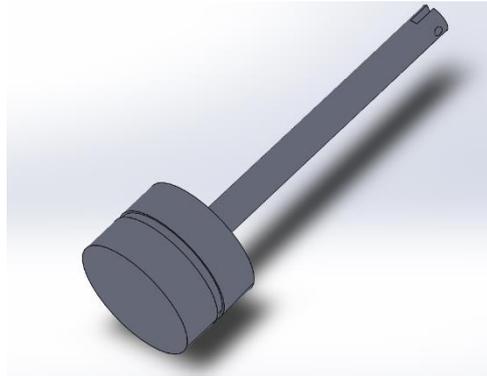


Figure 22 - Le piston

De plus, la liaison entre le piston et la manivelle ne pouvait pas simplement être une tige. Du fait de la rotation de la manivelle, la tige n'est pas tout le temps dans l'axe du piston et aurait donc cassé. Nous avons donc créé une liaison pivot entre la tige du piston et celle reliée à la manivelle.

Il a fallu être très précis au niveau de la longueur des tiges, autrement le système n'aurait pas fonctionné correctement.

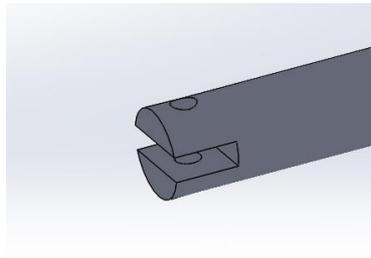


Figure 23 - Liaison entre le piston et la manivelle

3.3.5 – La manivelle

En ce qui concerne la manivelle, qui n'est autre qu'un vilebrequin, nous avons commencé par réaliser une tige coudée avec des espaces pour pouvoir relier les tiges. Toutefois nous nous sommes aperçus que cela demandait de plier une tige plutôt fine et que cela n'était donc pas réalisable.

Nous avons alors décidé de faire de grands cercles, plus simples à produire et tout aussi efficaces.

Pour connaître les dimensions de notre manivelle, nous avons la relation suivante : la course du piston (mais aussi du tiroir) est égale à deux fois le rayon de la manivelle.

Pour des soucis de résistance, l'épaisseur de la manivelle a été revue à plusieurs reprises. En effet, pour que notre modèle soit à peu près proportionnel, la tige ne mesure que 7 millimètres d'épaisseur. Au début, les espaces pour les tiges n'étaient donc épais que de 3 millimètres de diamètres. Mais cela nous paraissait trop juste pour résister à un tel système. Nous avons donc augmenté son diamètre de 2 millimètres ce qui nous amène à 5 millimètres de diamètre.

Pour ce qui est du montage, afin de pouvoir placer les tiges sur la manivelle, il aurait fallu faire une petite pièce qui serait allée autour de son emplacement au niveau de la manivelle, et que l'on aurait vissé à la tige. Cependant par manque de temps, cela n'a pas pu être réalisé.

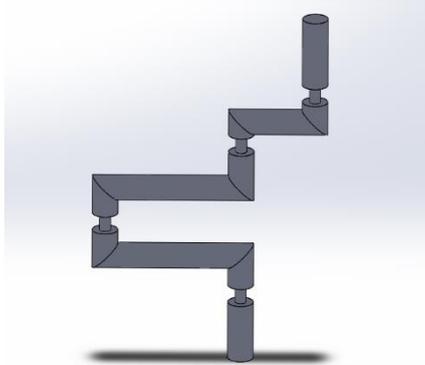


Figure 24 - 1^{er} modèle de la manivelle

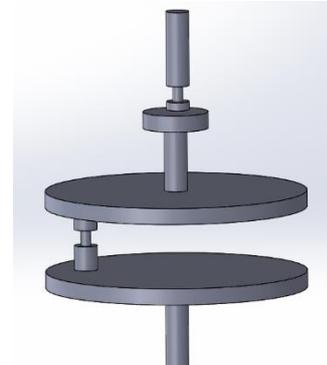


Figure 25 - La manivelle finale

CONCLUSION

Pour conclure, ce projet nous a beaucoup apporté tant au niveau de l'organisation mais aussi dans la manière d'aborder un vrai problème d'ingénieur. Ce projet était le premier qu'il a fallu penser du début à la fin, c'est-à-dire en partant d'un simple cahier des charges pour en arriver à un modèle usinable.

Pour un tel projet, l'organisation est primordiale. Nous avons su nous répartir les tâches chaque semaine de manière équitable et logique afin de terminer dans les meilleurs délais.

Dans un groupe, il n'est pas toujours simple de trouver sa place ou de s'imposer face aux autres, cependant, nous avons eu la chance d'avoir un groupe qui s'est toujours bien entendu et où chacun a pu proposer ses idées et se sentir totalement intégré au projet.

Malgré le fait qu'aucun de nous n'avaient continué la thermodynamique ce semestre, nous n'avons pas hésité à revoir nos cours des semestres précédents, afin que notre projet soit le plus réaliste et réalisable possible.

Nous avons passé beaucoup de temps en dehors des heures de cours à travailler sur ce projet, et nous sommes fiers de rendre un système fini et que l'on pourrait concevoir.

Enfin, si nous pouvions améliorer notre piston à vapeur, nous aimerions prévoir un système permettant la récupération de l'énergie mécanique du piston pour la transformer, par exemple, en électricité.

BIBLIOGRAPHIE

Histoire de la machine à vapeur :

« **Livret_machines_thermiques.pdf** »

[En ligne : http://beaumont-col.spip.ac-rouen.fr/IMG/pdf/livret_machines_thermiques.pdf].

« **Comprendre le fonctionnement de la machine de Newcomen (machine à vapeur)** »

[En ligne : https://www.editions-petiteelisabeth.fr/fonctionnement_de_la_machine_de_newcomen_machine_a_vapeur.php].

« **Cours de Histoire-géographie - La machine à vapeur - Maxicours.com** »

[En ligne : <http://www.maxicours.com/se/fiche/6/6/276266.html>].

« **Histoire des machines à vapeur** »

[En ligne : http://freveille.free.fr/Pages%20vapeur/Histoire_machines_vapeur.html].

« **L'invention de la machine à vapeur (1712)** »

[En ligne : <https://www.histoire-pour-tous.fr/inventions/308-invention-machine-a-vapeur.html>].

« **La Locomotive - Description raisonnée de ses organes - Partie II** »

[En ligne : http://www.tassignon.be/trains/legein/legein_2.htm].

« **Les machines à vapeur du Musée des Arts et métiers : Machine de Papin, de Savery, de Newcomen et de Watt.** »

[En ligne : http://visite.artsetmetiers.free.fr/machine_vapeur.html].

« **Machine à vapeur** », *Wikipédia*, 2019,

[En ligne : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Machine_%C3%A0_vapeur&oldid=158508649].

« **Média : Machine à vapeur : les premières machines - Encyclopædia Universalis** » [En ligne : <https://www.universalis.fr/media/AN030001/>].

Fonctionnement de la machine à vapeur :

« **11414v01.pdf** »,

[En ligne : <http://histoire.ec-lyon.fr/docannexe/file/1809/11414v01.pdf>].

« **Animation machines à vapeur : Distributions simple excentrique, Stephenson, Walschaerts, Marshall** »

[En ligne : http://freveille.free.fr/Pages%20vapeur/Animation_machines_vapeur.html#Steph].

« **Commande-du-tiroir.pdf** »,

[En ligne : <http://www.vapeuretmodelesavapeur.com/moteursatiroir/commande-du-tiroir.pdf>].

« **Elmer-13-open-twin-poppet-ok-1-.pdf** »,

[En ligne : <http://www.vapeuretmodelesavapeur.com/telechargements2/elmer-13-open-twin-poppet-ok-1-.pdf>].

« **Fonctionnement des machines à vapeur : distribution** »

[En ligne : http://freveille.free.fr/Pages%20vapeur/Machines_vapeur_distribution.html].

« **L'étanchéité du piston. - romubricoltout** »

[En ligne : <http://romubricoltout.canalblog.com/archives/2007/04/28/4772802.html>].

« **Moteurs à vapeur à tiroir cylindrique : la théorie** »

[En ligne : <http://www.vapeuretmodelesavapeur.com/moteuratiroir/index.html>].

« **Moteurs à vapeur à tiroir plan : la théorie** »

[En ligne : <http://www.vapeuretmodelesavapeur.com/moteursatiroir/>].

« **Piston (mécanique)** », *Wikipédia*, 2019,

[En ligne :

[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Piston_\(m%C3%A9canique\)&oldid=155840493](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Piston_(m%C3%A9canique)&oldid=155840493)].

« **Types de moteurs à vapeur** »

[En ligne : <https://fr.demotor.net/machine-a-vapeur/types>].

Calculs théoriques :

« **La puissance d'une machine à vapeur** »

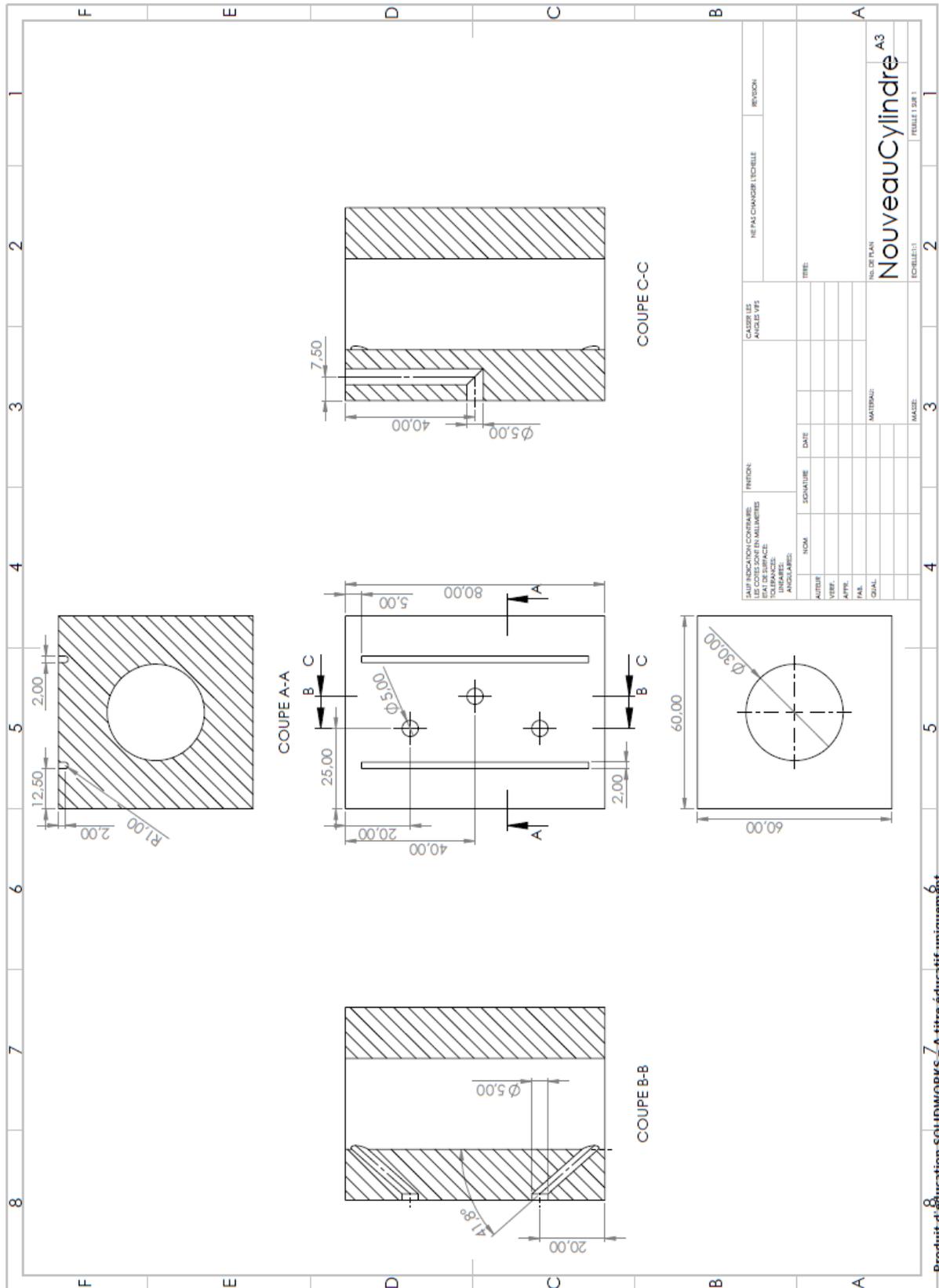
[En ligne : <http://marc-andre-dubout.org/cf/lvdc/lvdc0102/indicateur.htm>].

« **These.pdf** »,

[En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/110117/filename/These.pdf>].

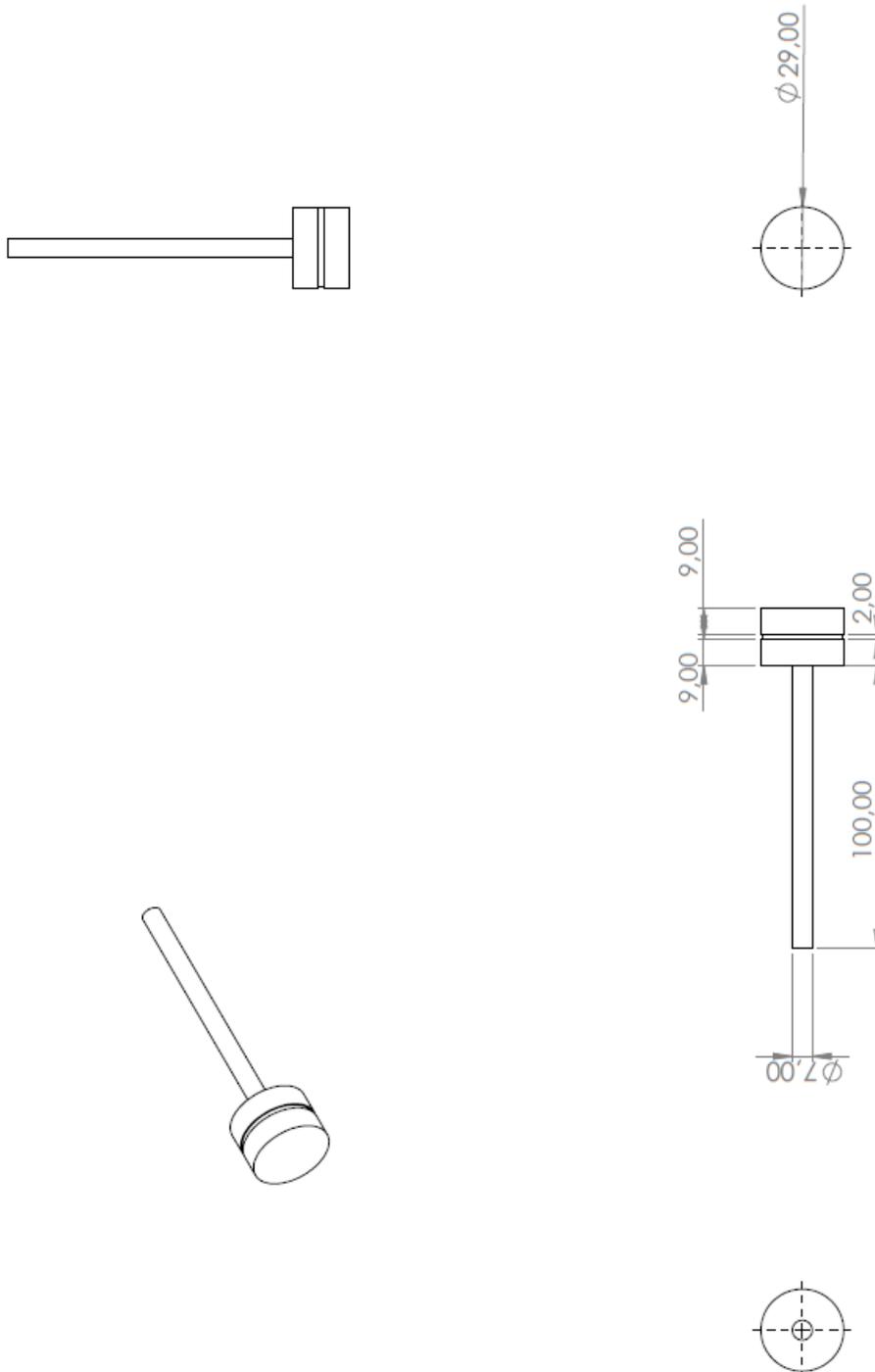
ANNEXE

Annexe 1 : Cylindre

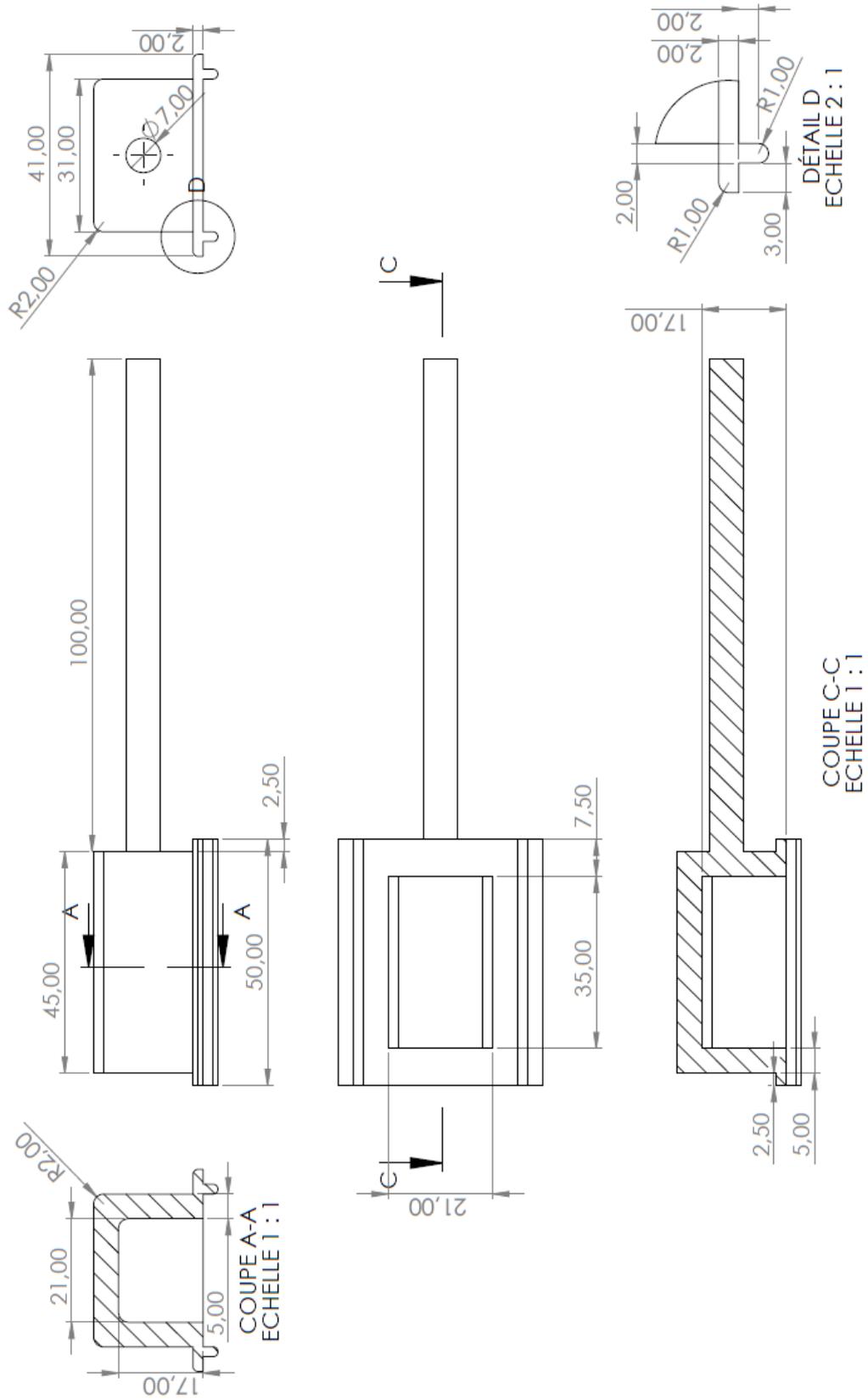


Produit d'éducation SOLIDWORKS - A titre éducatif uniquement.

Annexe 2 : Piston

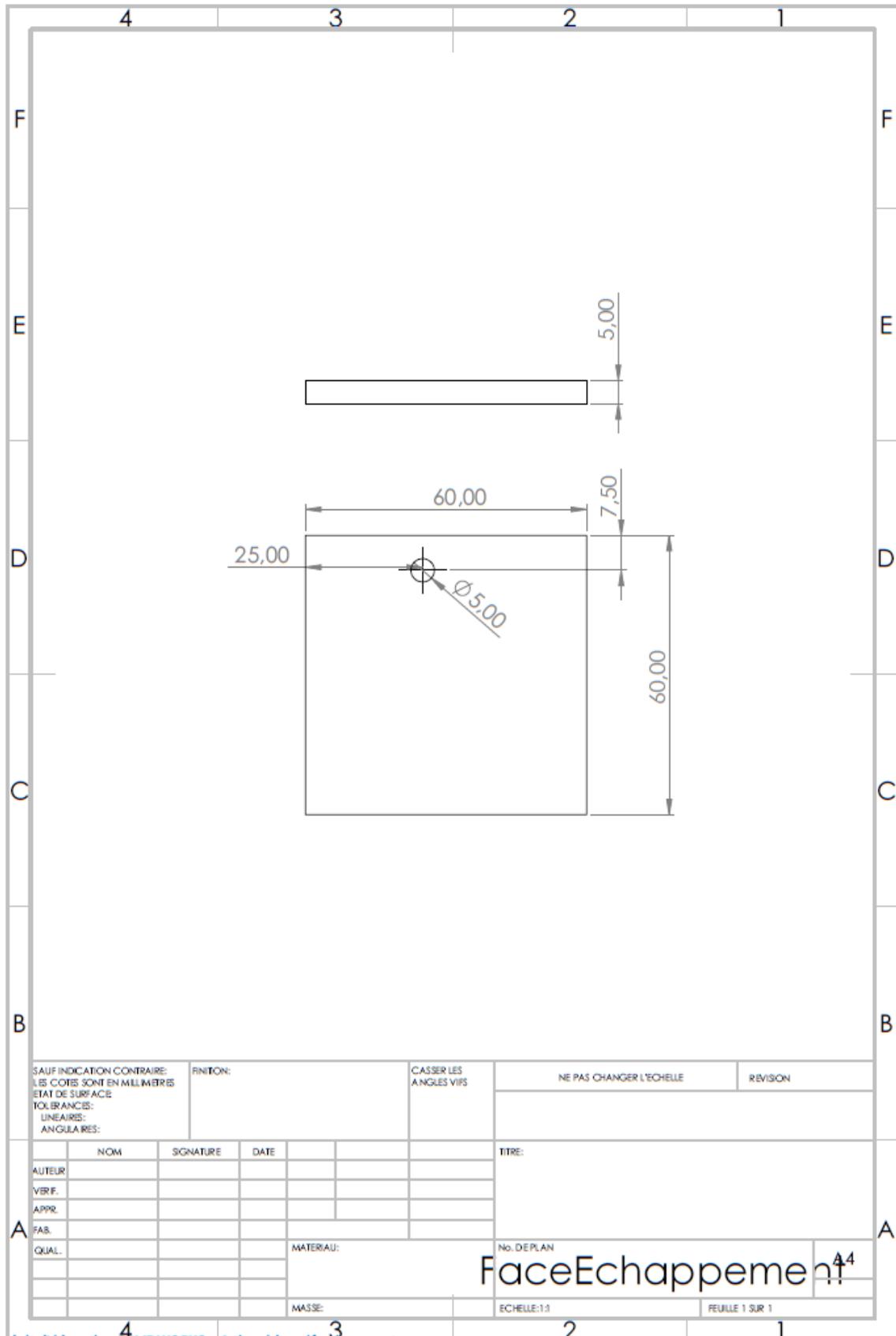


Annexe 4 : Tiroir plan



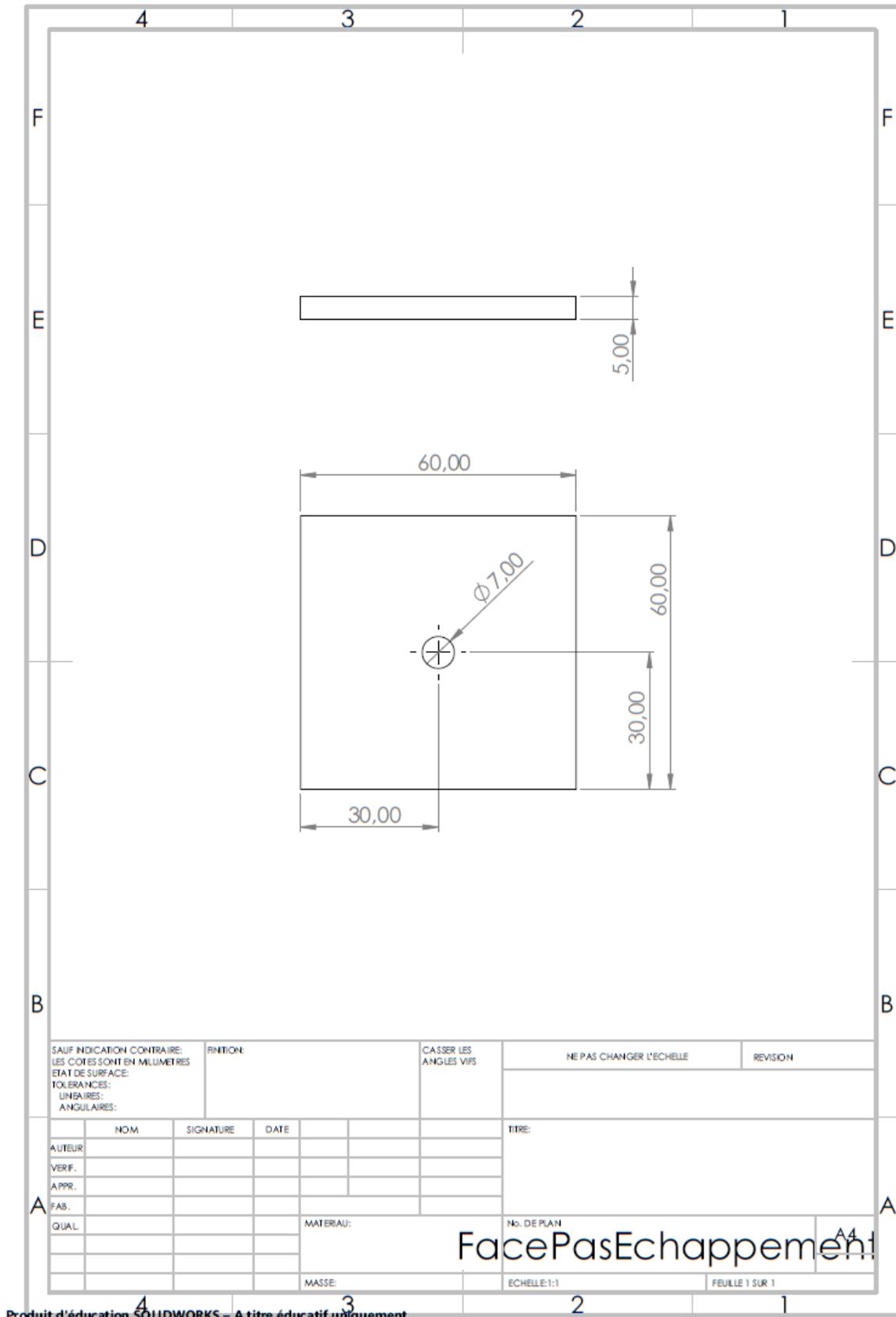
Produit d'éducation SOLIDWORKS - A titre éducatif uniquement.

Annexe 5 : Face Echappement



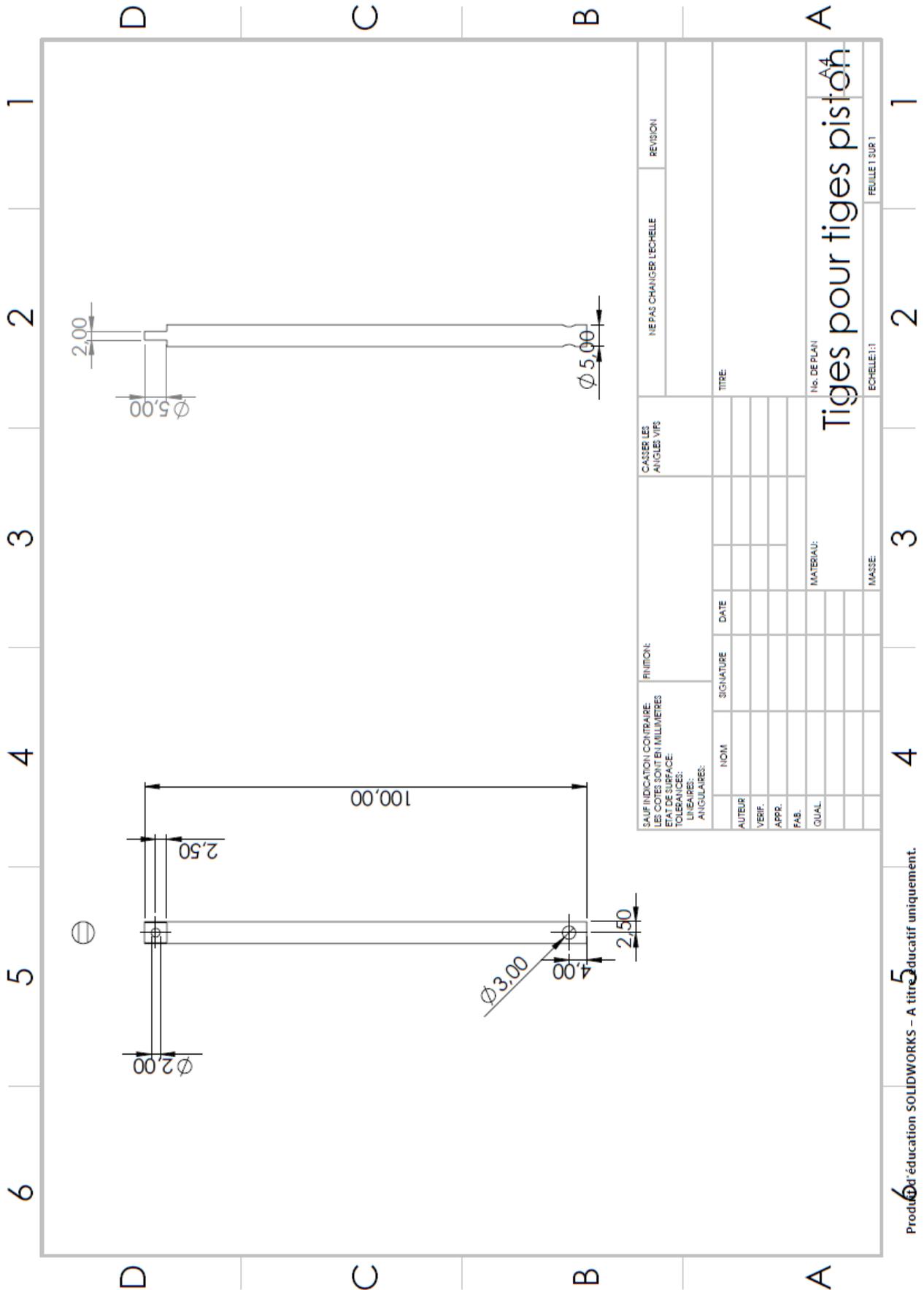
Produit d'éducation **SOLIDWORKS** – A titre éducatif uniquement.

Annexe 6 : Autre Face



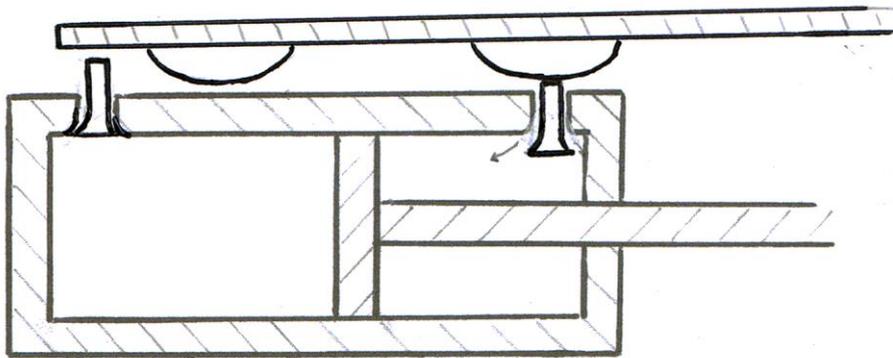
Produit d'éducation **SOLIDWORKS** – A titre éducatif uniquement.

Annexe 8 : Tige pour piston

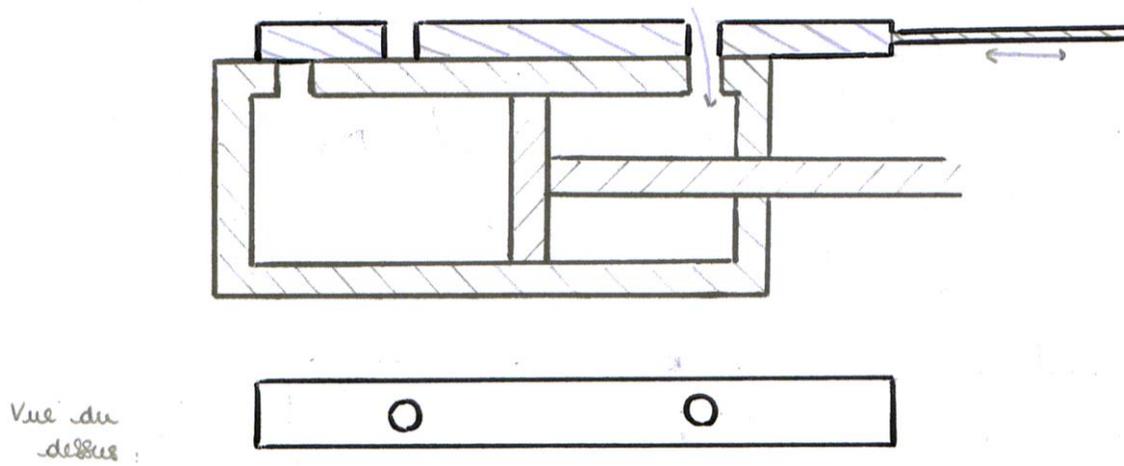


Produit par l'éducation SOLIDWORKS - A titre éducatif uniquement.

Annexe 9 : Schéma des soupapes



Annexe 10 : Schéma du contacteur



Annexe 11 : Schéma de la bascule

