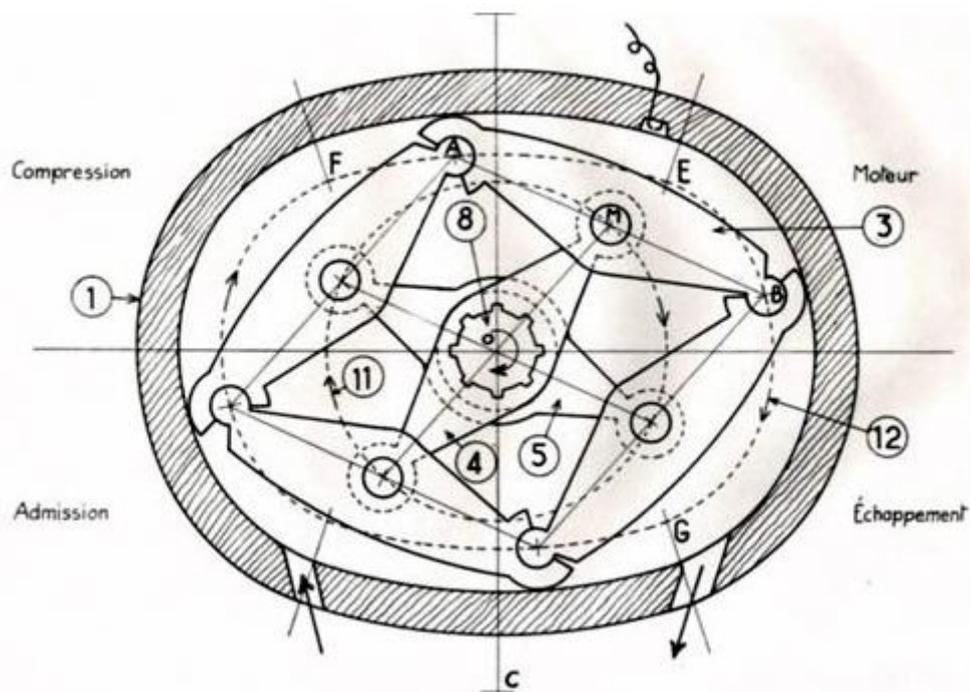


## Modélisation du moteur en losange



### Étudiants :

Saba ARAPISHVILI  
David BERTHET  
Ali FEKI  
Théo GARIN  
Antoine QUEDEVILLE  
Chen XIONG

Enseignant-responsable du projet :  
Didier VUILLAMY



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

**Référence du projet :** STPI/P6/2019 – 20

**Intitulé du projet :** Modélisation du moteur en losange

**Type de projet :** Bibliographie et calculs

**Objectifs du projet :**

- Découvrir et comprendre le fonctionnement de ce type de moteur.
- Obtenir un modèle numérique du moteur en losange.
- Déterminer le taux de compression de ce moteur.
- Déterminer le couple moteur.

**Mots-clés du projet :** Recherche, modélisation, mécanique.

# Table des matières

<b>Notations et Acronymes</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>Organisation du travail</b>	<b>5</b>
<b>1 Présentation du moteur en losange</b>	<b>6</b>
1.1 Ses origines . . . . .	6
1.2 Ses particularités . . . . .	7
<b>2 Modélisation du moteur en losange</b>	<b>8</b>
2.1 Recherches théoriques sur la forme du moteur . . . . .	8
2.2 Modèles utilisés et calculs . . . . .	8
2.2.1 Description du prototype . . . . .	9
2.2.2 Description du modèle elliptique . . . . .	9
2.2.3 Le modèle final . . . . .	10
2.3 Modélisation sur Excel . . . . .	12
2.3.1 La méthode de résolution numérique pour le calcul de l'aire . . . . .	13
2.3.2 La méthode de résolution numérique pour le calcul du taux de compression . . . . .	13
2.3.3 La méthode de résolution numérique pour le calcul du couple moteur . . . . .	13
2.4 Résultats . . . . .	14
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>16</b>
<b>Annexes</b>	<b>19</b>

# Notations

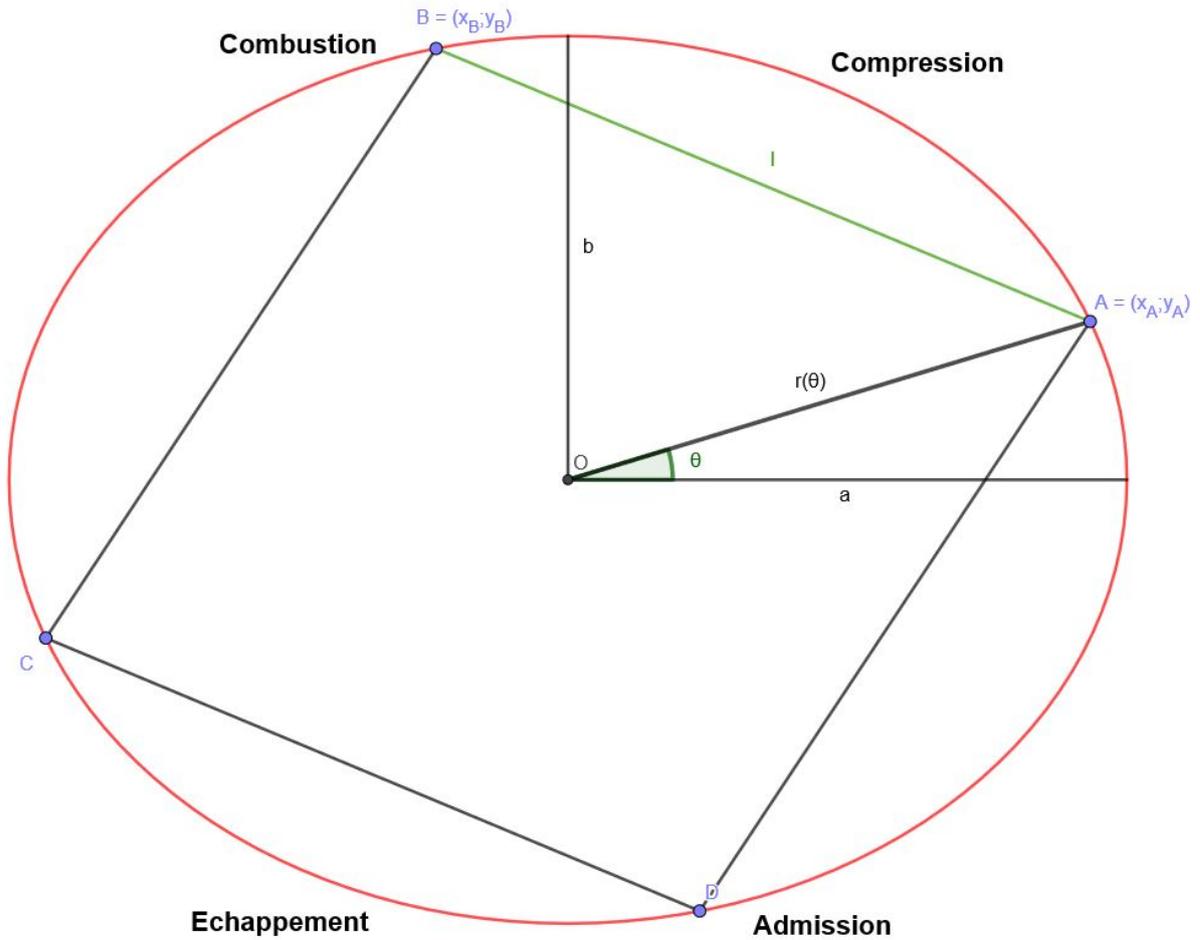


FIGURE 1 – Notations utilisées

# Introduction

Ce projet est issu de la théorie du moteur rotatif à losange déformable présenté par Jean-Pierre Ambert au début des années 2000. Comme le souligne M. Ambert dans son article[1], il est étonnant d'utiliser des moteurs fonctionnant grâce à des mouvements de translation pour induire des mouvements de rotation. Le moteur rotatif à losange déformable s'inspire donc du mouvement cycloïdal du moteur Wankel[6] tout en augmentant le nombre d'explosions par tour d'arbre et en supprimant les temps mort. Il utilise pour cela une propriété géométrique du losange : ses diagonales sont perpendiculaires quelle que soit la déformation qu'on lui fait subir.

Malgré des avantages certains comme la réduction de vibrations lors de son fonctionnement et son rapport puissance/poids, la réalisation d'un tel moteur n'est pas adapté pour l'industrie car il présente trop de désagréments (frottements importants, étanchéité, ...). De plus, la documentation liée à ce sujet est très faible. Elle reste centrée sur la demande de brevet de M.Ambert. C'est donc dans l'idée de comprendre le fonctionnement du moteur à losange déformable et de l'approfondir que nous avons choisi de réaliser ce projet. Pour cela, notre enseignant responsable, M. Vuillamy, nous a demandé de réaliser un modèle numérique de ce moteur sous Excel. Notre modélisation ne tient pas compte des problèmes de frottements et d'étanchéité que nous avons cité ci-dessus, nous nous sommes avant tout concentrés sur la modélisation d'un modèle simpliste afin de déterminer son taux de compression et son couple moteur. Il s'agit donc des objectifs à atteindre pour ce projet.

Nous commencerons ce rapport par décrire l'organisation du travail dans ce projet. Ensuite, nous réaliserons une présentation détaillée de ce moteur méconnu du grand public. Nous analyserons alors les propriétés géométriques qu'il utilise et décrirons les avantages et les inconvénients qu'il présente par rapport à d'autres moteurs. Suite à cette présentation, nous allons chercher à répondre aux objectifs de ce projet. Cela nous demandera de choisir un modèle adapté à l'étude du moteur.

# Organisation du travail

Nous avons commencé l'étude de ce sujet par des recherches sur les origines de ce moteur et ses caractéristiques. La documentation sur le sujet étant particulièrement faible, cette tâche a occupé une partie importante du projet. Cependant, nous avons pu bénéficier de l'aide de notre enseignant responsable dans cette tâche et ainsi gagner un temps précieux. Après quelques semaines de recherches, nous avons pu commencer à créer un modèle numérique du moteur. Pour cela, nous nous sommes répartis les tâches de cette manière :

	1-2	3-5	6-7	8-9
Saba	Recherche documentaire	Calculs	Calculs	Rapport Diapo
David	Recherche documentaire	Calculs	Calculs Excel	Rapport Diapo
Antoine	Recherche documentaire	Geogebra	Calculs Excel	Rapport Excel
Chen	Recherche documentaire	Calculs	Recherche	Poster
Théo	Recherche documentaire	Calculs	Recherche	Rapport
Ali	Recherche documentaire	Calculs	Recherche	Rapport

FIGURE 2 – Répartition des tâches par élève en fonction des semaines

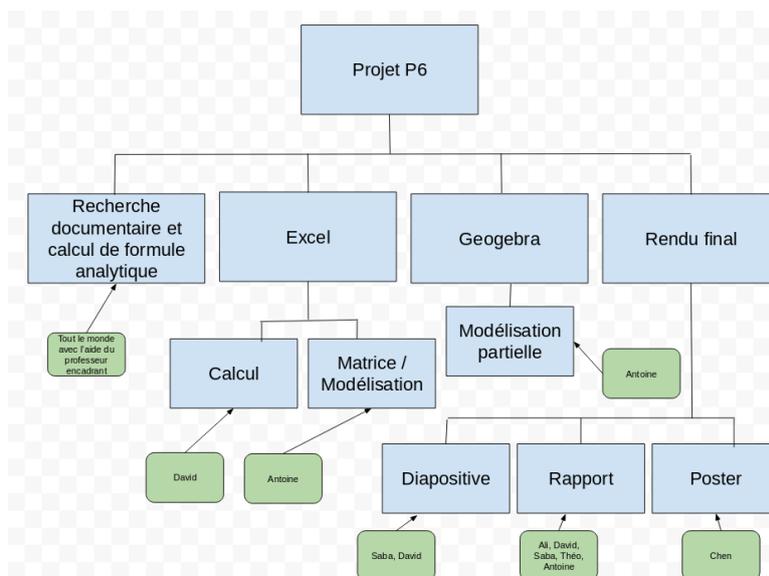


FIGURE 3 – Répartition globale des tâches par élèves dans ce projet

# Chapitre 1

## Présentation du moteur en losange

### 1.1 Ses origines

En août 2008, les trois français Vincent Genissieux, Jean-Thomas Collomb et Jean-Pierre Ambert déposent une demande de brevet d'invention intitulé « Machine rotative à losange déformable comportant un mécanisme de transmission perfectionné »[5].

Cette invention est décrite comme « une machine rotative à losange déformable comportant un rotor qui est un losange déformable en contact avec la surface interne d'une enceinte formant un stator ». Elle fait suite au travail de Jean-Pierre Ambert sur la théorie des moteurs à losange déformable. En effet, M.Ambert nous explique sur son site[1] que le moteur rotatif l'a toujours attiré. C'est donc tout naturellement qu'il s'est intéressé de près au moteur Wankel qui est un moteur à piston rotatif créé suite aux travaux de l'allemand Felix Wankel dans la première moitié du  $XX^e$  siècle. Ce moteur nécessite toutefois la transmission du mouvement à l'arbre par l'intermédiaire d'un excentrique et l'arbre doit faire trois tours pour que le piston en fasse un. C'est à partir de cet inconvénient que M.Ambert a cherché à savoir si « la propriété toute simple du losange d'avoir ses diagonales perpendiculaires quelle que soit la déformation qu'on lui fait subir permettrait la création d'un moteur »[1]. Il a alors schématiser ce moteur rotatif (voir Figure 1.1) en réalisant une première demande de brevet qu'il s'est vu refusé pour raison d'antériorités.

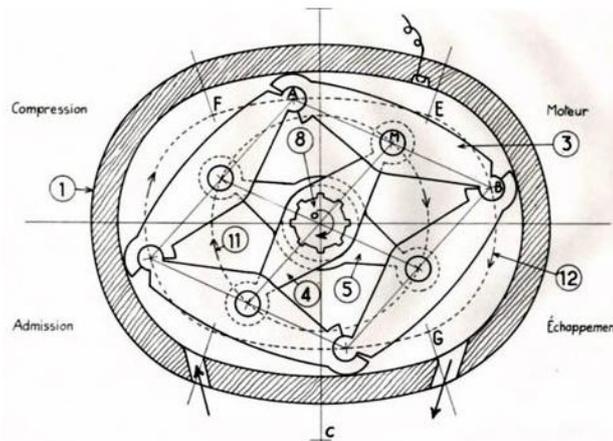


FIGURE 1.1 – Schéma du moteur rotatif en losange réalisé par M.Ambert

De plus ce type de moteur est semblable au moteur quasiturbine créé par la famille Saint-Hilaire à la même période que M.Ambert. En effet, suite à une petite aventure marine durant laquelle la famille Saint Hilaire était quotidiennement confrontée aux bruits des moteurs, Gilles Saint Hilaire, un physicien et inventeur canadien, va mener des recherches afin de créer un nouveau moteur. Avec l'aide de sa famille, il parvient à déposer un brevet en 1996[4], soit seulement quelques années avant M.Ambert. C'est ainsi que le moteur quasiturbine passe au premier plan lorsqu'on parle de moteur rotatif. En septembre 1999, il est même désigné « Moteur du  $XXI^e$  siècle par le magazine European Automotive Design[3] et en 2004, une voiture a été conçue avec un moteur quasiturbine[2].

## 1.2 Ses particularités

Le moteur à losange déformable est un ensemble rotatif fonctionnant en moteur thermique à combustion interne. Il est caractérisé par une enceinte dans laquelle tourne quatre pistons articulés en losange déformable. Il est important de constater que l'ensemble des pistons reste, à chaque instant, symétrique par rapport à l'arbre et que l'ensemble enceinte-pistons permet les quatre temps d'un cycle (admission, compression, combustion et échappement) sur chaque piston à chaque tour. Cela permet de créer quatre explosions par tour. M.Ambert nous indique également que cet ensemble rotatif peut être utilisé en pompe rotative ou en compresseur à deux entrées et deux sorties symétriques par rapport à l'arbre. Dans la suite de ce rapport, nous donnerons un modèle de ses deux types de fonctionnement.

L'avantage de ce type de moteur par rapport à des moteurs utilisant un mouvement de translation ou encore le moteur Wankel qui est un moteur à piston rotatif est qu'il ne contient aucun engrenage et peu de pièces mobiles. Cela permet de réduire les coûts de production. De plus, son centre de masse reste immobile et grâce à son cycle ininterrompu sans temps mort, il peut être alimenté par de l'air comprimé ou avec du liquide.

Suite à cette description des avantages, on se demande pourquoi les constructeurs n'utilisent pas ce type de moteur pour leurs engins. On s'aperçoit toutefois rapidement que les moteurs de ce type présentent un problème important au niveau des frottements. En effet, le stator se trouve toujours en contact avec le rotor ce qui fait que les pièces se dilatent avec la chaleur engendrée par les frottements et provoque ainsi des problèmes d'étanchéité.

## Chapitre 2

# Modélisation du moteur en losange

### 2.1 Recherches théoriques sur la forme du moteur

Après avoir effectué nos premières recherches sur ce moteur en losange, nous avons souhaité connaître les conditions permettant de le modéliser. En effet, cela nous permettrait de réaliser un modèle numérique pour répondre aux objectifs de notre projet.

Pour cela, on commence par poser la fonction  $r$  qui représente la longueur  $OA$  de notre losange en fonction de l'angle  $\theta$  (voir Notations page 3). On a alors les conditions suivantes :

- La fonction  $r$  doit présenter des extrema pour  $\theta = k\frac{\pi}{2}$  avec  $k$  un entier. On a donc

$$r' \left( k\frac{\pi}{2} \right) = 0 \quad (2.1)$$

- $r(\theta)$  maximum pour  $k\pi$ . Le maximum de notre fonction étant  $a$  on a

$$r(0) = r(\pi) = a \quad (2.2)$$

- $r(\theta)$  minimum pour  $\frac{\pi}{2} + k\pi$ . Le minimum de notre fonction étant  $b$  on a

$$r \left( \frac{\pi}{2} \right) = r \left( \frac{3\pi}{2} \right) = b \quad (2.3)$$

- La fonction  $r$  est  $\pi$ -périodique.

$$\forall \theta \in [0; 2\pi], r(\theta) = r(\theta + \pi) \quad (2.4)$$

- Une des propriétés du losange est que ces diagonales sont perpendiculaires et ses côtés sont égaux. Cela se traduit par :

Soit  $l$  le côté d'un losange, on a en appliquant le théorème de Pythagore :

$$\underbrace{l^2}_{=constante} = r^2(\theta) + r^2\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)$$

Donc en dérivant, on obtient

$$r'(\theta) \times r(\theta) + r' \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) \times r \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) = 0 \quad (2.5)$$

Cette dernière propriété est difficile à satisfaire, nous avons dû nous tourner vers des modèles simplifiés.

### 2.2 Modèles utilisés et calculs

Suite au problème évoqué dans la section précédente, nous avons cherché des modèles se rapprochant le plus de la réalité en respectant le maximum de propriétés. Pour cela, notre professeur nous a présenté un prototype de moteur en losange réalisé par M.Meyer, un professeur de l'INSA Rouen-Normandie. La stator de ce moteur est composé de deux droites et de deux demi-cercles et le rotor est un losange.

### 2.2.1 Description du prototype

Contrairement au moteur en losange du brevet qui est un moteur à combustion, ce prototype, lui, est un moteur à air comprimé. Il n'a pas de phase de combustion et une géométrie légèrement différente (voir Figure 2.1). Il possède deux entrées et deux sorties symétriques par rapport à l'arbre. Il respecte les 4 premières propriétés évoquées et réalise 8 compressions par tour.



FIGURE 2.1 – Prototype de moteur en losange réalisé par M.Meyer

Cependant, le moteur en losange du brevet a une forme plus elliptique. Notre but étant de se rapprocher au maximum de ce modèle, nous avons choisi de représenter notre stator par une autre forme plus adaptée.

### 2.2.2 Description du modèle elliptique

Nous avons décidé de prendre pour contour de ce moteur une forme elliptique. En effet, ce modèle est celui qui se rapproche le plus de la réalité tout en simplifiant les calculs. Tout comme le prototype, ce modèle satisfait les 4 premières propriétés tout en respectant davantage la forme initiale du moteur rotatif en losange du brevet. Ce moteur réalise 4 compressions par tour.

Nous avons déterminé les équations paramétriques de l'ellipse et les positions du point  $A$  en fonction de l'angle  $\theta$  (voir Notations page 3) afin de visualiser la déformation du losange tout au long de sa rotation.

Les équations paramétriques d'une ellipse est :

$$\begin{cases} x(\theta) = r(\theta) \cos(\theta) \\ y(\theta) = r(\theta) \sin(\theta) \end{cases}$$

avec  $\theta \in [0; 2\pi]$ ,  $x(0) = r(0) \cos(0) = a$  le demi grand-axe,  $y(\frac{\pi}{2}) = r(\frac{\pi}{2}) \sin(\frac{\pi}{2}) = b$  le demi petit-axe de l'ellipse (voir Notations page 3).

Ainsi, on a

$$\begin{aligned} \frac{x^2(\theta)}{a^2} + \frac{y^2(\theta)}{b^2} &= 1 \\ \frac{r^2(\theta) \cos^2(\theta)}{a^2} + \frac{r^2(\theta) \sin^2(\theta)}{b^2} &= 1 \\ r^2(\theta) (b^2 \cos^2(\theta) + a^2 \sin^2(\theta)) &= a^2 b^2 \end{aligned}$$

D'où

$$r(\theta) = \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2(\theta) + a^2 \sin^2(\theta)}}$$

avec  $\theta \in [0; 2\pi]$ .

À ce stade, notre objectif est de déterminer les coordonnées d'un des sommets du losange déformable afin de modéliser le fonctionnement de notre moteur.

Les sommets du losange appartiennent à la fois au losange et à l'ellipse pour toutes les positions du losange. Ainsi, soit  $A = (x_A; y_A)$  un sommet du losange, on a en coordonnées polaires :

$$\begin{cases} x_A = r(\theta) \cos(\theta) \\ y_A = r(\theta) \sin(\theta) \end{cases}$$

De plus, les diagonales d'un losange sont perpendiculaires, donc  $B = (x_B; y_B)$  est déterminé par :

$$\begin{cases} x_B = r\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ y_B = r\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

Notre objectif final étant de déterminer le taux de compression et le couple moteur, on doit tout d'abord calculer le volume disponible pour le gaz en fonction de la position du losange. Pour cela, on commence par remarquer qu'avec une profondeur constante, on peut déterminer ce volume à partir de l'aire prise dans le plan  $z = cte$ . On peut alors réduire notre étude à l'aire entre  $[AB]$  et l'ellipse car soit  $\mathcal{A}_1$  l'aire entre  $[AB]$  et l'ellipse et  $\mathcal{A}_2$  l'aire entre  $[BC]$  et l'ellipse alors on a  $2\mathcal{A}_1 + 2\mathcal{A}_2 = \mathcal{A}_{ellipse} - \mathcal{A}_{losange}$  que l'on a déjà déterminé (voir Figure 2.2).

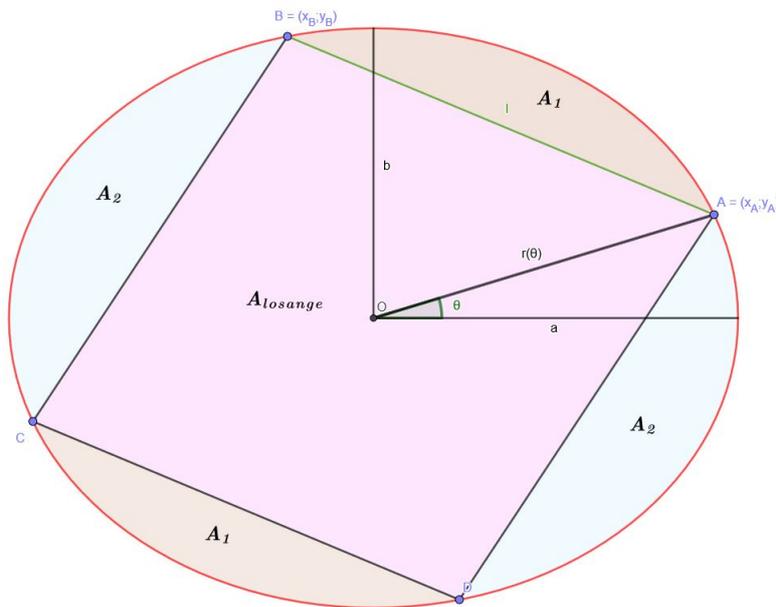


FIGURE 2.2 – Décomposition de l'aire disponible à l'intérieur de l'ellipse.

### 2.2.3 Le modèle final

Après de nombreuses heures passées à tenter de trouver une fonction satisfaisant les cinq propriétés énoncés précédemment, nous sommes parvenus, grâce à notre enseignant responsable, à obtenir la bonne fonction conduisant ainsi à un modèle reproduisant fidèlement le moteur en losange déformable de M.Ambert (voir Figure 2.3).

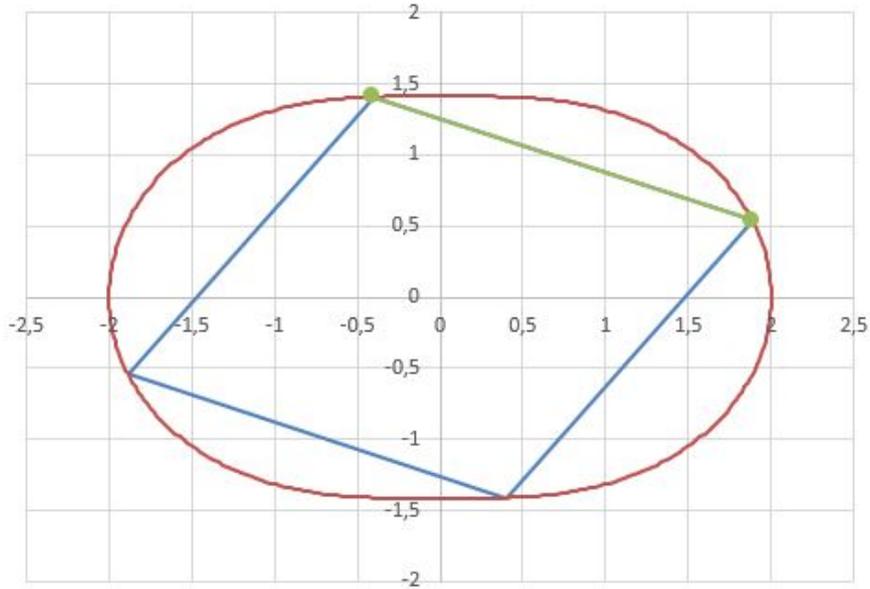


FIGURE 2.3 – Modèle reproduisant le moteur du brevet de M.Ambert

Pour résoudre l'équation 2.5 qui nous a posé tant de problèmes, on commence par définir

$$f(\theta) = r(\theta) \times r'(\theta)$$

L'équation devient alors

$$f(\theta) + f\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = 0$$

Cela implique que

$$f(\theta) = -f\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)$$

De cette égalité on déduit plusieurs choses :

- Connaître  $f(\theta)$  entre 0 et  $\frac{\pi}{2}$  veut dire que l'on connaît  $f(\theta)$  entre  $\frac{\pi}{2}$  et  $\pi$  et ainsi de suite.
- Cette fonction est impaire et  $\pi$ -périodique.

Une fonction respectant toutes ces conditions est  $f(\theta) = \sin(2\theta)$ . Essayons d'en déduire  $r(\theta)$  :

$$r(\theta) r'(\theta) = \sin(2\theta)$$

Calculons la solution homogène

$$\begin{aligned} r(\theta) r'(\theta) &= 0 \\ r(\theta) &= 0 \text{ ou } r'(\theta) = 0 \end{aligned}$$

Or il est impossible que le rayon de notre forme externe soit nul, donc :

$$\begin{aligned} \frac{dr}{d\theta}(\theta) &= 0 \\ \frac{r(\theta)^2}{2} &= K \\ r(\theta) &= \sqrt{2K} \end{aligned}$$

Ainsi on en déduit que

$$r'(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{dK}{d\theta} \frac{1}{\sqrt{K}}$$

En revenant à l'équation générale, on peut en déduire une formule de  $K$  en fonction de  $\theta$  :

$$\begin{aligned} r(\theta) r'(\theta) &= \sqrt{2K} \times \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{dK}{d\theta} \frac{1}{\sqrt{K}} = \sin(2\theta) \\ \frac{dK}{d\theta} &= \sin(2\theta) \end{aligned}$$

En intégrant on obtient finalement :

$$K = -\frac{1}{2} \cos(2\theta) + K_1$$

avec  $K_1$  une constante.

Ainsi

$$\frac{r^2(\theta)}{2} = -\frac{1}{2} \cos(2\theta) + K_1$$

$$r(\theta) = \sqrt{K_1 - \cos(2\theta)}$$

À présent, on peut déterminer la constante  $K_1$  avec les conditions initiales. On souhaite que à  $\theta = 0$ , le rayon ait la valeur du demi grand axe  $a$  de la forme. Donc

$$a = \sqrt{K_1 - 1}$$

$$K_1 = a^2 + 1$$

Finalement, pour l'équation du rayon on a :

$$r(\theta) = \sqrt{a^2 + 1 - \cos(2\theta)}$$

On remarque immédiatement que  $b$  ne fait pas partie de la formule de ce rayon. Cela signifie que le fait de forcer la longueur des pistons à être constante fixe la valeur de  $b$ .

Nous avons par la même occasion obtenu un autre modèle en changeant simplement le valeur de  $a$  qui s'avère particulièrement intéressant pour la suite lors des calculs du taux de compression et du couple moteur (voir Figure 2.4). Bien que sa forme soit différente de celle du schéma de M.Ambert, elle correspond tout au fait aux indications qu'il a donné sur son moteur.

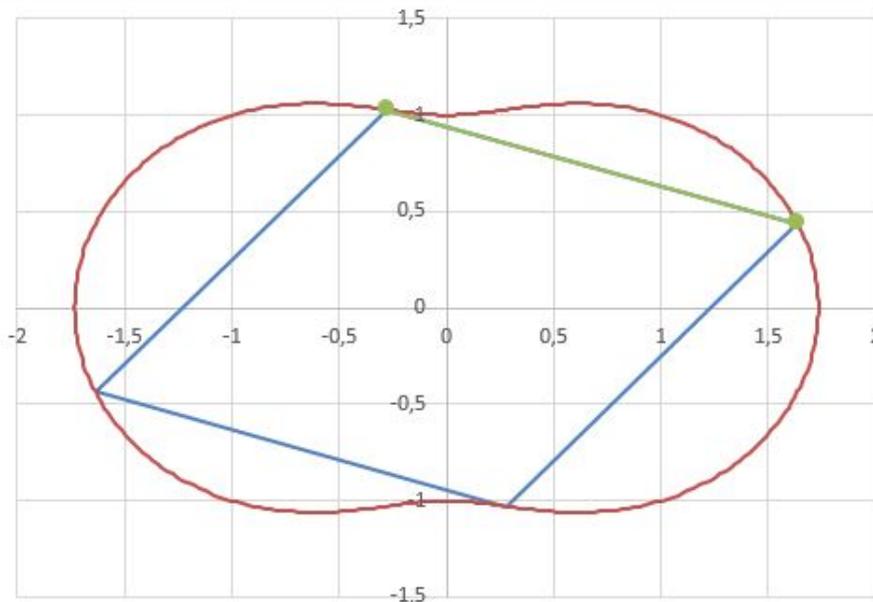


FIGURE 2.4 – Modèle final utilisé pour les calculs

## 2.3 Modélisation sur Excel

Dans cette section nous nous intéresserons à la manière dont nous avons implémenté les outils de la section précédente dans Excel afin d'obtenir des résultats. Dans le but d'être aussi général que possible, nous travaillerons dans cette partie avec  $r_{Ext}(\theta)$ , fonction qui représentera le rayon de la forme du stator à un angle donné. Ainsi pour tester une nouvelle forme, il suffira de remplacer la fonction  $r_{Ext}$  pour avoir tous les résultats correspondants.

### 2.3.1 La méthode de résolution numérique pour le calcul de l'aire

Pour commencer, il nous faut calculer l'aire, cependant une approche mathématique est impossible car la fonction du rayon  $r_{Ext}$  est inconnue. C'est pour cela que l'on a implémenté une méthode de résolution numérique à l'aide d'une macro Excel.

Nous avons choisi d'implémenter la méthode des rectangles car c'est une méthode très simple dont la précision est facilement manipulable en modifiant le nombre de rectangles. Cependant nous utiliserons une variation de cette méthode en coordonnées polaires, ce qui simplifie grandement les calculs étant donné que l'on ne travaille qu'avec des équations polaires. Pour calculer l'aire entre le piston et la forme extérieure, il nous faut l'angle de départ et l'angle d'arrivée.

Soient  $A$  d'angle  $\theta_A = \theta$  et  $B$  d'angle  $\theta_B = \theta + 90$  (voir Notations page 3).

En notant  $N$  le nombre de découpages de l'aire et  $h = \frac{\theta_B - \theta_A}{N} = \frac{90}{N}$  l'écart entre deux valeurs consécutives de l'angle on a :

$$\mathcal{A} = h \sum_{n=0}^N (r_{Ext}(\theta + nh) - r_{Piston}(\theta + nh))$$

En implémentant cette équation dans une macro Excel, on peut donc calculer l'aire entre un piston et le stator pour n'importe quelle forme et n'importe quel angle de départ  $\theta$ .

### 2.3.2 La méthode de résolution numérique pour le calcul du taux de compression

Maintenant que l'on a l'aire pour tout angle, on peut calculer très facilement le taux de compression en utilisant la formule

$$\tau = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

On peut également l'utiliser pour calculer la pression.

En effet, les différentes phases du moteur se déroulent et se succèdent très rapidement, on peut donc les considérer comme adiabatiques. Pour cette raison, on peut appliquer l'équation de Laplace qui stipule que lors d'un processus adiabatique, la quantité  $P \times V^\gamma$  est constante. Ainsi, si l'on considère  $P_0$  et  $V_0$  comme la pression et le volume à l'admission et  $P_\theta$  et  $V_\theta$  la pression et le volume à un angle  $\theta$ , on a :

$$P_0 \times V_0^\gamma = P_\theta \times V_\theta^\gamma$$

Or on connaît la valeur initiale de la pression (pression atmosphérique) ainsi que le volume initial et à tout angle  $\theta$ . On peut donc en déduire la pression pour tout angle  $\theta$  :

$$P_\theta = P_0 \times \left( \frac{V_0}{V_\theta} \right)^\gamma$$

Cette équation n'est valide qu'à partir de la fin de l'admission jusqu'à l'explosion. En effet, l'énergie générée par celle-ci va créer un surplus de pression, qui permet de faire tourner le moteur. On pourra cependant appliquer cette même formule pendant la phase d'expansion mais avec une pression initiale différente, qui résulte de la combustion. Entre le début de l'échappement et la fin de l'admission, on considérera la pression comme constante à la pression atmosphérique.

### 2.3.3 La méthode de résolution numérique pour le calcul du couple moteur

À présent nous pouvons calculer la force exercée par la pression sur le piston. On la calcule très simplement avec  $F_\theta = P_\theta \times S_\theta$  sachant que  $S_\theta$  représente la surface du piston. Pour calculer la surface, il nous faut la hauteur du piston ainsi que la longueur  $AB$ . La première a été fixée à 10 cm et est identique pour toutes les formes afin que les performances soient comparables et la seconde est facilement calculable comme vu lors de l'établissement des conditions sur la forme idéale.

Enfin, nous pouvons calculer le couple avec la formule suivante :

$$C_\theta = \vec{OC} \wedge \vec{F}$$

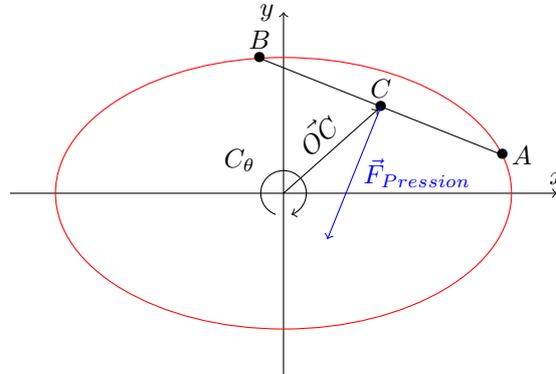


FIGURE 2.5 – Représentation de la situation

$$C_\theta = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ 0 \end{pmatrix}$$

Or, pour obtenir  $x_F$  et  $y_F$ , il faut trouver un vecteur unitaire perpendiculaire à  $\vec{AB}$ , qui est simplement  $\begin{pmatrix} -y_{AB} \\ x_{AB} \end{pmatrix}$  divisé par sa norme. Ainsi on a :

$$C_\theta = \frac{F_\theta}{\|\vec{AB}\|} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} -y_{AB} \\ x_{AB} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C_\theta = \frac{F_\theta}{\|\vec{AB}\|} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ x_c x_{AB} + y_c y_{AB} \end{pmatrix}$$

En projetant sur l'axe  $z$  on obtient enfin  $C_\theta = \frac{F_\theta}{\|\vec{AB}\|} (x_c x_{AB} + y_c y_{AB})$  qui nous donne bien le couple en fonction de l'angle pour un seul piston.

Pour avoir le vrai couple en sortie du moteur, il faut ajouter quatre fois le couple à lui-même en le décalant de  $90^\circ$  à chaque fois.

## 2.4 Résultats

Nos objectifs étaient les suivants :

- Découvrir et comprendre le fonctionnement de ce type de moteur.
- Obtenir un modèle numérique du moteur en losange.
- Déterminer le taux de compression de ce moteur.
- Déterminer le couple moteur.

Comme nous l'avons vu, les deux premiers objectifs ont été atteints et nous possédons les outils permettant de déterminer le taux de compression du moteur et son couple.

Le taux de compression  $\tau$  est défini par la relation suivante :

$$\tau = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

avec  $V_{max}$  et  $V_{min}$  respectivement le volume maximal et minimal lors de la phase de compression.  $V_{max}$  est obtenu pour  $\theta = 0$  et  $V_{min}$  est obtenu pour  $\theta = \frac{\pi}{4}$ .

On a obtenu les données suivantes (voir Tableau 2.1) :

	$V_{max}(m^3)$	$V_{min}(m^3)$	$\tau$
Prototype	0,046	0,004	11,5
Modèle elliptique	0,048	0,010	4,8
Modèle du brevet	0,083	0,025	3,3
Modèle final	0,078	0,006	13

TABLE 2.1 – Données permettant de déterminer le taux de compression pour chacun de nos modèles

Le taux de compression des modèles elliptique et de celui du brevet restent faible devant le taux de compression d'un moteur de ce type qui avoisine habituellement 13. Cela s'explique par une forme de stator plus convexe et des pistons droits contrairement au modèle original qui possède des pistons courbés. Néanmoins, nous sommes parvenus à obtenir avec le modèle final un taux de compression égal à 13 qui est parfaitement cohérent avec ce que l'on peut attendre de ce type de moteur.

Concernant le couple moteur, nous avons obtenu les valeurs suivantes :

	Couple moyen (N.m)
Prototype	94,4
Modèle elliptique	421
Modèle du brevet	1483
Modèle final	199,8

TABLE 2.2 – Données permettant de déterminer le couple moyen pour chacun de nos modèles

Ces données ont été obtenues grâce à des graphiques réalisés sur Excel (voir Annexes Figures 2.6 à 2.9). En comparant les courbes obtenues avec celle d'un moteur 4 cylindres en ligne (voir Annexes Figure 2.10), on s'aperçoit que nos modèles sont bien cohérents avec la réalité. La différence entre les valeurs du couple moyen et nos modèles réside quant à elle simplement dans la géométrie du stator comme on pouvait s'y attendre. La valeur du couple moyen du modèle du brevet s'explique par la valeur de son  $V_{max}$ . Pour les autres modèles, les valeurs sont cohérentes avec ce qu'on peut trouver chez d'autres moteurs.

# Conclusion et perspectives

Pour faire le bilan de notre projet, nous avons tout d'abord dû faire de longues recherches afin de rassembler le peu d'informations disponibles sur le moteur à losange déformable. À la suite de cela, nous avons décidé que la manière la plus simple de modéliser ce moteur, tout en restant cohérent avec la réalité, était de passer par un modèle elliptique. Nous avons alors réalisé ce modèle sur Excel grâce à l'aide précieuse de M. Vuillamy. Cependant, ce modèle n'était pas assez satisfaisant car il ne validait pas tous les critères imposés. Enfin, après de nombreux calculs et tests, nous avons réussi à réaliser un modèle exploitable remplissant tous nos critères en plus d'avoir un taux de compression très proche de la réalité. Nous avons donc pu conclure ce projet en répondant à tous les objectifs que nous nous étions fixés grâce à notre travail d'équipe et notre cohésion de groupe.

Concernant le moteur en losange, on peut dire que c'est un moteur fort intéressant car il a un fonctionnement unique dont les moteurs futurs pourraient bien s'inspirer. En effet, ce moteur réalise 4 explosions par tour et peut se passer de soupapes car l'admission se fait en continu. Cependant, il possède encore trop de défauts, que ce soit au niveau des frottements ou sur l'étanchéité. De plus, la fréquence d'explosion du moteur est fixée à une explosion tous les quarts de tour, ce qui laisse peu de place à l'adaptabilité. On peut tout de même espérer voir un jour un moteur inspiré du moteur à losange déformable en application. En effet, ce type de moteur présente une bonne alternative aux moteurs traditionnels sur le plan écologique car il peut fonctionner grâce à de l'air comprimé. C'est ce qui a été réalisé en 2004 par l'Association de Promotion des Usages de la Quasiturbine (APUQ[2]) sur une voiture munie d'un moteur quasiturbine et destinée à un usage urbain à basse vitesse.

Sur l'aspect personnel, ce projet nous a tout d'abord permis de découvrir un nouveau moteur méconnu du grand public et d'ainsi développer notre culture mécanique. Il nous a également permis d'approfondir notre habilité à raisonner sur des problèmes nouveaux et rechercher des informations difficiles d'accès. Cela nous a permis de nous préparer à la difficulté de nos futurs projets en tant qu'ingénieur pendant lesquels la rigueur et le travail d'équipe seront primordiales.

Pour finir, nous aimerions remercier M. Vuillamy pour sa compréhension, sa bonne humeur et son investissement, sans qui la réalisation de ce projet n'aurait pas été possible.

# Table des figures

1	Notations utilisées . . . . .	3
2	Répartition des tâches par élève en fonction des semaines . . . . .	5
3	Répartition globale des tâches par élèves dans ce projet . . . . .	5
1.1	Schéma du moteur rotatif en losange réalisé par M.Ambert . . . . .	6
2.1	Prototype de moteur en losange réalisé par M.Meyer . . . . .	9
2.2	Décomposition de l'aire disponible à l'intérieur de l'ellipse. . . . .	10
2.3	Modèle reproduisant le moteur du brevet de M.Ambert . . . . .	11
2.4	Modèle final utilisé pour les calculs . . . . .	12
2.5	Représentation de la situation . . . . .	14
2.6	Couple moteur en fonction de l'angle du modèle elliptique . . . . .	21
2.7	Couple moteur en fonction de l'angle du modèle du brevet . . . . .	21
2.8	Couple moteur en fonction de l'angle du prototype . . . . .	21
2.9	Couple moteur en fonction de l'angle du modèle final . . . . .	22
2.10	Couple moteur en fonction de l'angle vilebrequin d'un moteur 4 cylindres en ligne . . . . .	22

# Bibliographie

- [1] J.P Ambert. Théorie du moteur rotatif à losange déformable. [http://ifact.free.fr/sysdoc/rubrique.php3?id\\_rubrique=121](http://ifact.free.fr/sysdoc/rubrique.php3?id_rubrique=121), 2006. (document), 1.1
- [2] APUQ. Voiture à quasiturbine et air comprimé. <http://www.apuq.com/autopneu.html>. 1.1, 2.4
- [3] European Automotive Design. Quasiturbine turns on the power. <http://quasiturbine.promci.qc.ca/EADSept99.html>, 1999. 1.1
- [4] Saint Hilaire Roxane, Saint-Hilaire Ylian, Saint-Hilaire Gilles, and Saint-Hilaire Françoise. Quasiturbine zero vibration-continuous combustion rotary engine compressor or pump. <https://patents.google.com/patent/CA2192714C/fr>, 1996. 1.1
- [5] Genissieux Vincent, Collomb Jean Thomas, and Ambert Jean Pierre. Machine rotative à losange déformable comportant un mécanisme de transmission perfectionné. <https://patents.google.com/patent/EP2356318B1/fr>, 2008. 1.1
- [6] Wikipédia. Moteur Wankel. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_Wankel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Wankel). (document)

# Annexes

## Code utilisé pour la modélisation sur Excel

```

1  Function computeTorque(theta, xa, ya, xb, yb, F) As Double
2      'Calcul du milieu du piston
3      xc = -(xa + xb) / 2
4      yc = -(ya + yb) / 2
5
6      'Calcul du vecteur AB
7      xab = -(xb - xa)
8      yab = -(yb - ya)
9
10     computeTorque = F * (xc * xab + yc * yab) / Sqr(xab ^ 2 + yab ^ 2)
11 End Function
12
13 Function computePressure(theta, V_theta, P_0, V_0, P_exp, V_exp, gamma) As Double
14     If (theta > 3 * pi / 4) And (theta < 7 * pi / 4) Then
15         computePressure = P_0 'Phase d'admission ou d'echappement
16     Else
17         If (theta < pi / 4) Or (theta > 7 * pi / 4) Then
18             computePressure = P_0 * (V_0 / V_theta) ^ gamma 'Phase de compression
19         Else
20             If theta < 3 * pi / 4 Then
21                 computePressure = P_exp * (V_exp / V_theta) ^ gamma 'Phase d'expansion
22             End If
23         End If
24     End If
25
26 End Function
27
28 Function rayonPerfectShape(theta, a, b) As Double
29     'Formule déterminée avec l'equation différentielle
30     rayonPerfectShape = Sqr(a ^ 2 + 1 + Cos(2 * theta))
31 End Function
32
33
34 Function rayonModelePhysique(theta, a, b) As Double
35     'Calcul du rayon du modèle physique avec rectangles et demi cercles
36     rect_side = a - b
37     delta_theta = Atn(rect_side / b)
38
39
40     If (Abs(theta - pi / 2) < delta_theta) Then
41         rayonModelePhysique = b / Sin(theta)
42
43     Else
44         If Abs(theta - pi * 3 / 2) < delta_theta Then
45             rayonModelePhysique = -b / Sin(theta)

```

```

46     Else
47         If Abs(theta - pi) < (pi / 2 - delta_theta) Then
48             ' https://en.wikipedia.org/wiki/Circle#Equations
49             rCercle = rect_side * Cos(theta + pi) + Sqr(b ^ 2 - rect_side ^ 2 *
↪ Sin(theta + pi) ^ 2)
50             rayonModelePhysique = rCercle
51         Else
52             rCercle = rect_side * Cos(theta) + Sqr(b ^ 2 - rect_side ^ 2 * Sin(theta) ^
↪ 2)
53             rayonModelePhysique = rCercle
54         End If
55     End If
56 End If
57 End Function
58
59
60 Function RayonEllipse(theta, a, b) As Double
61     'Calcul du rayon de la forme elliptique
62     RayonEllipse = a * b / Sqr((b * Cos(theta)) ^ 2 + (a * Sin(theta)) ^ 2)
63 End Function
64
65 Function RayonPiston(theta, xa, ya, xb, yb) As Double
66 Dim m As Double, b As Double
67     'Calcule le rayon de la droite passant par les points A et B à l'angle theta
68     tmp_theta = pi / 2 - theta
69     m = (ya - yb) / (xa - xb)
70     b = (xa * yb - xb * ya) / (xa - xb)
71
72     RayonPiston = b / (Cos(tmp_theta) - m * Sin(tmp_theta))
73
74 End Function
75
76 Public Function calculAire(theta_a, theta_b, xa, ya, xb, yb, theta_epsilon, a, b) As Double
77 Dim curr_theta As Double, height As Double, sum As Double
78     'Calcule l'aire entre le piston et la forme exterieure entre theta a et theta b
79     curr_theta = theta_a
80     Do
81         height = rayonCurrentCasing(curr_theta, a, b) - RayonPiston(curr_theta, xa, ya, xb,
↪ yb)
82         sum = sum + height
83         curr_theta = curr_theta + theta_epsilon
84     Loop Until curr_theta > theta_b
85
86     calculAire = sum * theta_epsilon
87 End Function

```

## Courbes utilisées pour déterminer le couple moteur

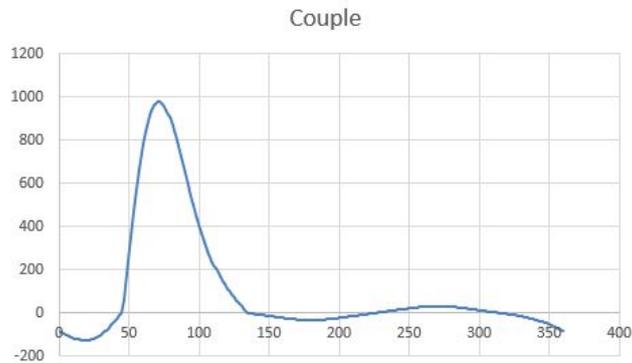


FIGURE 2.6 – Couple moteur en fonction de l'angle du modèle elliptique

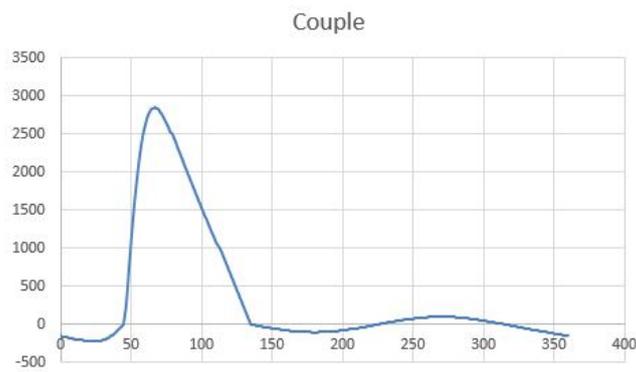


FIGURE 2.7 – Couple moteur en fonction de l'angle du modèle du brevet

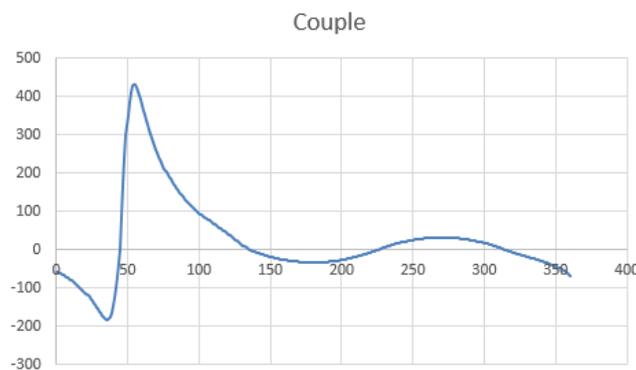


FIGURE 2.8 – Couple moteur en fonction de l'angle du prototype

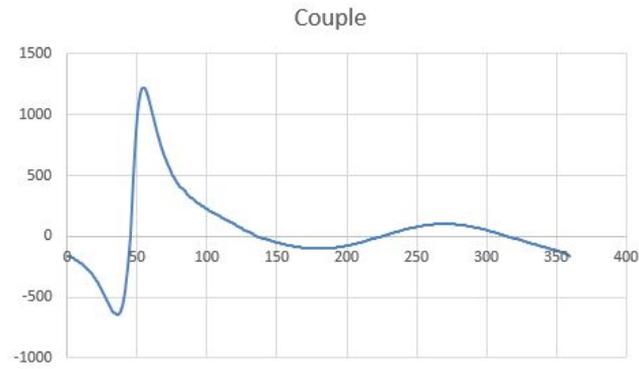


FIGURE 2.9 – Couple moteur en fonction de l’angle du modèle final

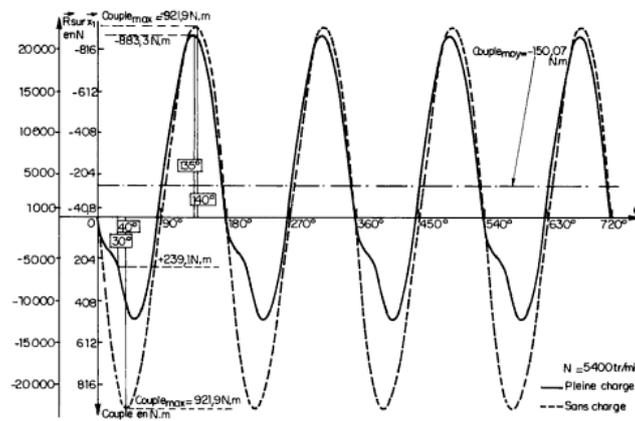


Fig. 3.34. Couple moteur en fonction de l’angle vilebrequin. Moteur 4 cylindres en ligne.

FIGURE 2.10 – Couple moteur en fonction de l’angle vilebrequin d’un moteur 4 cylindres en ligne