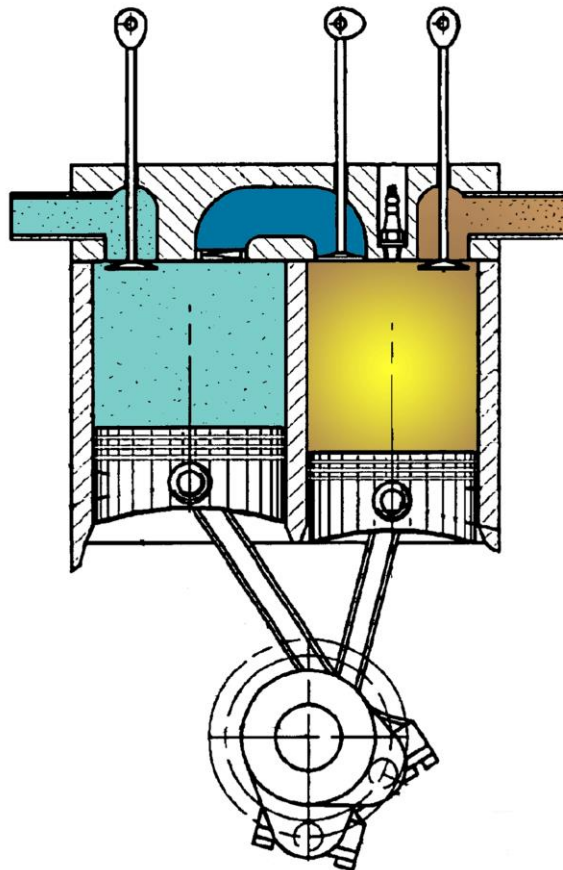


Projet de Physique P6
STPI/P6/2016 – 27

Modélisation du moteur Scuderi



Etudiants :

Alexandre BLONDEL

Paul CHAUVIN

Quentin PAUTONNIER

Thibault DURANTON

Vincent GUY

Enseignant-responsable du projet :

Didier VUILLAMY

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : **13/06/2016**

Référence du projet : **STPI/P6/2016 – 27**

Intitulé du projet : **Modélisation du moteur Scuderi**

Type de projet : **Simulation**

Objectifs du projet :

Il s'agit dans ce projet d'étudier par simulation numérique, la performance de ce moteur.

Il fait appel à de la modélisation thermodynamique, à de la cinématique, et à de la mécanique.

La cinématique : on se donne un schéma de l'ensemble du moteur et on calcule les mouvements, puis les accélérations et les efforts.

La thermodynamique permet de connaître les efforts internes.

Le travail consiste aussi en recherche sur les moteurs ou système qui poursuivent le but du moteur Scuderi. Moteur 5 temps ...

Cette étude est une introduction à l'étude des moteurs thermiques. Quels sont les principes de base de leur fonctionnement, comment les modélise-t-on en première approche.

Mots-clefs du projet : **Moteur, Cinématique, Thermodynamique, Modélisation.**

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **Aucun**

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre enseignant-encadrant, Monsieur Vuillamy pour son aide au cours des différentes séances ; notamment pour comprendre le fonctionnement du moteur Scuderi (partie mécanique du moteur) et la réalisation des différents calculs thermodynamiques (partie thermodynamique).

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats : Étude du moteur Scuderi.....	7
3.1. Caractéristiques et description du moteur Scuderi.....	7
3.1.1. Historique des moteurs thermiques	7
3.1.2. Description du moteur Scuderi.....	9
3.1.3. Comparaison moteur 4 temps/moteur 5 temps	11
3.2. Cinématique et mécanique du moteur Scuderi.....	14
3.2.1. Modélisation des pistons :.....	14
3.2.2. Explication des calculs : recherche de position du point H.	15
3.2.3. Mise en place de la représentations graphique en 2 dimensions	16
3.2.4. Calcul des volumes :.....	17
3.2.5. Fonctionnalités et utilisations du programme :.....	18
3.3. Etude thermodynamique	19
3.3.1. Gestion des soupapes :	19
3.3.2. Détermination des variables thermodynamique et calcul du travail.....	20
3.4. Modélisation thermodynamique	27
4. Conclusions et perspectives.....	30
4.1. Conclusions sur le travail réalisé.....	30
4.2. Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C. projet.....	30
4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet.....	32
5. Bibliographie	33
6. Credits d'illustrations.....	35

1. INTRODUCTION

Depuis quelques mois, l'industrie automobile est pointée du doigt par les autorités en matière de pollution. Tout débute en septembre dernier, lorsqu'une ONG dénommée « International Council on Clean Transportation » a dénoncé l'utilisation d'un logiciel de truquage des tests anti-pollution par Volkswagen concernant 11 millions de voitures dans le monde, afin de réduire leurs émissions polluantes. Suite à ce scandale, de nombreuses enquêtes ont ainsi été menées.

Dans le sillage de cette affaire, une commission a donc été mise en place par la ministre de l'Écologie Ségolène Royal. Membres de cette commission les deux associations France Nature Environnement (FNE) et le Réseau Action Climat (RAC) ont révélé des irrégularités chez de nombreuses marques françaises et étrangères au niveau des tests d'émissions polluantes en laboratoire et sur piste.

En cette période perturbée par des mouvements sociaux et les pénuries de carburants et plus généralement d'interrogations sur la démarche à suivre pour limiter notre impact environnemental, il est légitime de se poser cette question : l'avenir de l'automobile se fera-t-il avec ou sans le moteur à combustion interne ?

En effet, dans une société de plus en plus soucieuse de l'environnement avec des contrôles en matière de pollution de plus en plus strictes, il semble raisonnable de penser que l'avenir de l'automobile ne se dessine pas avec ce type de moteurs. D'autant plus que les constructeurs ont aujourd'hui l'embarras du choix. De nombreuses alternatives existent : le moteur électrique, la pile à combustible d'hydrogène, la voiture hybride. Le futur se profile certainement vers ce type de véhicules à faibles émissions de particules. Mais le moteur à combustion interne n'a pas dit son dernier mot avec l'entreprise Scuderì.

Lors du congrès RIVE à Ales en 2011, un nouveau moteur à combustion interne est présenté : « la plus grande révolution qu'ait connu le moteur à combustion interne en 130 ans » estime son concepteur, le groupe américain Scuderì Group. D'après lui, pas moins de 11 constructeurs automobiles seraient déjà intéressés par ce moteur. Afin de comprendre l'attente grandissante des constructeurs automobiles à propos de ce moteur, nous allons dans le cadre de ce projet étudier différents aspects du moteur Scuderì.

Tout d'abord, nous allons présenter et décrire les caractéristiques du moteur Scuderì. Dans cette première partie nous allons aborder l'évolution des moteurs thermiques au cours de l'histoire, de l'apparition de la machine à vapeur aux moteurs thermiques actuels. Nous tacherons également de comparer ce moteur avec ceux d'aujourd'hui.

Ensuite, nous nous intéresserons à proprement parler du moteur Scuderì avec une étude de sa cinématique et sa mécanique pour dans une dernière partie, aborder la modélisation thermodynamique du moteur.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Étant donné qu'aucun d'entre nous ne connaissait le moteur Scuderì, les premières séances étaient dédiées à la recherche d'informations sur ce moteur. En effet, cette étape était indispensable afin de comprendre le mécanisme et les technologies présentées comme révolutionnaires par le groupe Scuderì. Nous avons donc téléchargé le brevet déposé par l'entreprise et consulté leur site internet afin de récolter un maximum d'informations avant de passer à l'étude cinématique et thermodynamique. Nous avons également utilisé d'autres sources internet présentant le moteur Scuderì mais comme on pouvait s'y attendre, celles-ci étaient moins complètes.

Nous avons rencontré deux difficultés majeures dans la compréhension du fonctionnement de ce moteur. D'une part le brevet était en anglais, d'autre part certains points n'étaient pas clairement expliqués par le groupe. Durant les séances suivantes, le travail consistait avec l'aide de M.Vuillamy de comprendre au mieux la cinématique du moteur et notamment le mouvement des pistons en fonction de l'angle de la bielle. Afin de nous aider à modéliser ce mouvement M.Vuillamy nous a expliqué les différentes animations sous Excel, et nous a envoyé quelques programmes. L'étude de ce moteur consiste également en une modélisation thermodynamique. Pour cela, comme pour l'étude mécanique, nous nous sommes réunis autour de notre professeur encadrant afin d'aborder ce sujet et apporter des réponses à nos interrogations. Lorsque cela était nécessaire nous avons dû émettre certaines hypothèses.

Puis quand M.Vuillamy s'occupait du second groupe sur cette plage horaire, nous travaillions ensemble à la poursuite de ce projet.

Nous allons maintenant décrire plus en détails les tâches réalisées par chacun d'entre nous, qui s'est acquitté d'une tâche en fonction de ces compétences.

Ainsi, Thibault Duranton et Paul Chauvin ont réalisé l'étude cinématique et thermodynamique du moteur. Ils ont notamment su s'adapter à un nouveau langage de programmation afin de modéliser le mouvement des pistons.

Alexandre Blondel et Quentin Pautonnier se sont chargés de la partie description du moteur Scuderi et historique des moteurs thermiques, et plus généralement de la confection du rapport. Quentin Pautonnier a notamment décrit le moteur Scuderi ainsi que réaliser une comparaison avec les moteurs 4 temps et 5 temps. Quant à Alexandre, il s'est occupé de l'historique des moteurs thermiques, et du moteur 2 temps.

Enfin Vincent Guy a cherché de comprendre où en est le moteur Scuderi aujourd'hui et notamment si une commercialisation de ce moteur est envisageable dans ces prochaines années.

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS : ÉTUDE DU MOTEUR SCUDERI

3.1. Caractéristiques et description du moteur Scuderi

Comme nous l'avons dit précédemment, notre travail consistait d'abord à s'informer des caractéristiques du moteur Scuderi. Cependant il nous a semblé intéressant de retracer l'évolution du moteur thermique et de comparer les différents moteurs d'aujourd'hui au moteur Scuderi. Ce travail permet de se rendre compte des technologies utilisés par les moteurs actuels et notamment celles apportés par ScuderiGroup.

3.1.1. Historique des moteurs thermiques

Avant de décrire plus amplement le fonctionnement et les caractéristiques du moteur Scuderi. Retour au début du XVIII^e siècle dans les mines de charbon anglaises où les premières pompes, à l'origine de la machine à vapeur, sont utilisées. Ancêtre des moteurs de voitures d'aujourd'hui il est intéressant de voir comment cette technologie, pilier de la révolution industrielle est apparue et a évolué pour être progressivement remplacée par d'autres technologies.

La première ébauche de machine à vapeur a été réalisée par un médecin français, Denis Papin, en 1690. Puis en 1698, Thomas Savery propose une machine permettant de pomper l'eau des mines. Thomas Newcomen l'améliore quelques années plus tard mais malheureusement, ces premières machines à vapeur connaissent de réels problèmes de

rendement. Il faut attendre 1763 et James Watt pour que la machine à vapeur trouve de nombreuses applications dans le milieu industriel grâce à une économie de 75 % de combustible par rapport à ses prédécesseurs.

Les améliorations techniques apportées par James Watt notamment ont permis à la machine à vapeur de jouer un rôle prépondérant au cours de la révolution industrielle. Ce contexte favorable de la révolution industrielle au XVIII^e siècle explique en partie le succès rencontré par la machine à vapeur. Première source d'énergie mécanique contrôlable par l'homme, ce qui n'est pas le cas de l'eau ou du vent par exemple, elle est à l'origine de nouveaux réseaux de communication avec la mise en place du premier service de bateau à vapeur en 1807, puis celui de la locomotive en 1829.

Ce premier moteur à combustion externe transformait l'énergie thermique en énergie mécanique. Fonctionnant selon le principe de la cocotte-minute, la vapeur d'eau enfermée dans un réservoir crée une pression qui était utilisée pour déplacer des pistons. Le déplacement du piston est ensuite transformé en un mouvement de rotation par un système belle-manivelle, permettant de faire tourner des roues ou des turbines.

Aujourd'hui, la machine à vapeur a été remplacée par le moteur électrique et le moteur à explosion pour produire de l'énergie mécanique. Cependant, dans les centrales, la turbine à vapeur est toujours utilisée.

Durant la première moitié du XIX^e siècle, de nombreux moteurs sont mis au point notamment le moteur électrique et le moteur à air chaud de Stirling.

Mais la principale avancée dans l'industrie depuis la machine à vapeur de James Watt est celle apportée par Etienne Lenoir. Il invente en 1858 un nouveau type de moteur, le moteur à allumage commandée plus couramment appelé moteur à essence. Puis en 1862, Beau de Rochas théorise la thermodynamique du cycle à 4 temps (admission, compression, combustion-détente et échappement). Il n'a pu mettre en pratique ce nouveau moteur puisque le carburant nécessaire au fonctionnement n'existait pas encore. C'est en 1876 que le premier moteur à quatre temps est conçu par Nikolaus Otto à partir du cycle de Beau de Rochas. Cette date est le point de départ des moteurs à vocation automobile et industrielle.

Enfin en 1897, Rudolph Diesel invente un moteur à combustion interne, qui porte toujours son nom, dont l'allumage est spontané grâce au point d'auto-inflammation lié à la température importante dans la chambre de combustion. De cette invention de nombreuses innovations seront apportées au moteur à combustion interne pour arriver aux moteurs que nous connaissons aujourd'hui.

Finalement, ce rappel historique met en lumière l'évolution du moteur thermique au cours des siècles, pour atteindre les performances d'aujourd'hui. Le moteur contemporain est donc le fruit de difficiles démarches intellectuelles, scientifiques et technologiques permettant sa mise au point.

Moteur 2 temps

Nombre de cylindre considéré : 1

Le premier moteur 2 temps a été élaboré en 1860 par Etienne Lenoir et fonctionnait au gaz d'éclairage, c'est à dire au gaz de houille, résultat de la transformation de la houille en charbon. Puis en 1879, une amélioration de ce moteur par l'anglais Dugald Clerk permet de réaliser en un seul tour de vilebrequin le cycle moteur complet. Ce moteur se nomme ainsi car le cycle se fait sur 2 allers/retours du piston.

Cylindre 2 temps
Admission
Compression
Détente
Echappement

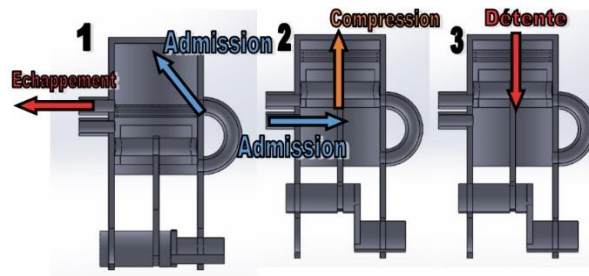


Figure 1: Cycle du moteur 2 temps

Le principal avantage de ce moteur concerne la mécanique qui est simple, puisqu'elle ne contient pas de soupapes. De plus, la puissance du moteur est importante grâce à une combustion à chaque tour du moteur. En revanche, ce type de moteur présente un risque d'encrassement si le mélange n'est pas réalisée correctement, et la température est élevée et nécessite un système de ventilation efficace.

Ce moteur est utilisé au début du XX^e siècle sur les motocyclettes. Aujourd'hui on le retrouve encore sur les cyclomoteurs, motocyclettes et tronçonneuses entre autres, alors qu'il n'est plus utilisé dans le monde automobile.

Vocabulaire pour explication moteur scuderi

Lumière d'admission: Les gaz frais entrent par ce conduit jusque dans la chambre.

Lumière de transfert: Les gaz frais sont poussés dans ce conduit et entrent dans la chambre de compression lorsque le piston redescend.

Lumière d'échappement: Les gaz brûlés sont expulsés par ce conduit.

Bougie: Elle permet l'explosion du mélange air/essence grâce à une étincelle.

Piston: Cette pièce cylindrique mobile permet de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique par la bielle qui va transmettre le mouvement.

Bielle: Cette pièce permet de transformer le mouvement linéaire du piston en un mouvement rotatif du vilebrequin.

Vilebrequin: Élément principal du système bielle/manivelle, il permet de transformer le mouvement rectiligne des pistons en un mouvement rotatif.

Chambres: Elles sont aux nombres de 2, une pour la compression et une pour l'admission des gaz frais.

3.1.2. Description du moteur Scuderi

Présenté comme le moteur à combustion interne le plus économe en carburant de ces dernières années, le moteur Scuderi est un moteur spécial. Il se compose de deux cylindres, un cylindre de compression et un cylindre de détente. A cause de cela on pourrait penser qu'à première vue, du fait qu'il fonctionne qu'avec deux pistons il serait moins intéressant qu'un moteur 4 temps classique. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'il soit plus lord ou bien qu'il y ait une perte de puissance avec deux pistons moteurs contre un pour le moteur 4 temps. Nous verrons donc par la suite si nos hypothèses de base se confirme ou bien si au contraire le moteur Scuderi présente plus d'avantage que le moteur 4 temps classique.

Ce moteur se compose de deux cylindres de volume V_{Cmax} pour le cylindre de compression avec un diamètre D_C et V_{Dmax} pour celui de détente avec un diamètre D_D . Il se compose donc de deux pistons reliés au même arbre moteur, via des bielles de longueurs L_{BC} et L_{BD} , L_{BC} pour la bielle reliée au piston de compression et L_{BD} pour celle reliée au piston de détente. Avec un angle d'inclinaison θ entre les manetons. Les axes des deux cylindres sont décalés par rapport à l'axe de l'arbre moteur d'une distance L_{OC} et L_{OD} . La liaison entre le cylindre de compression et le cylindre de détente se fait via un conduit de transfert.

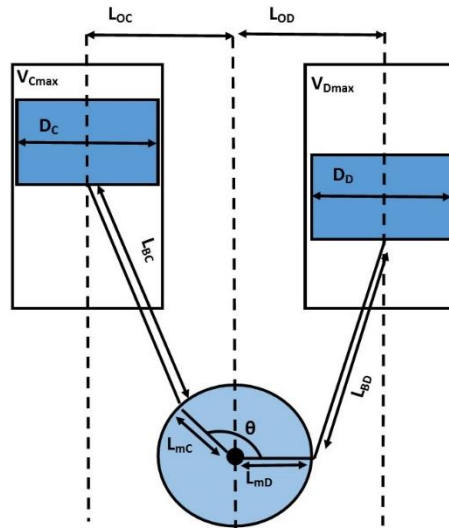


Figure 2: Schéma du moteur Scuderi

Chaque cylindre comprend deux lumières, une d'admission et une autre d'échappement. Si on considère le cylindre de compression il a une soupape qui contrôle la lumière d'admission guidé par un arbre à came et un clapet qui s'ouvre en fonction de la différence de pression entre le cylindre de compression et le conduit de transfert. Quant au cylindre de détente, il se compose de deux soupapes, une pour l'admission de l'air comprimé et une pour l'échappement. Ces deux soupapes sont elles aussi guidées par un arbre à came. Il a aussi un injecteur pour l'essence.

Enfin la particularité de ce moteur est en partie due au conduit de transfert qui lie le cylindre de compression et de détente. En effet il permet la transition de l'air sous pression d'un cylindre à l'autre et son volume sera défini comme V_{trans} étant égale à $1/10$ de V_{Cmax} .

Cycle du moteur

Etat Initial :

Le piston de compression est en position haute au PMH (Point Mort Haut). On considèrera qu'il commence à descendre à t_0 .

1ère Etape :

Le piston de compression commence à descendre, l'air est admis dans le cylindre de compression via la lumière d'admission du cylindre de compression jusqu'au PMB (Point Mort Bas) du piston de compression. Durant cette étape il n'y a que la soupape d'admission du cylindre de compression qui est ouverte.

2ème Etape :

Le piston commence à remonter, la soupape d'admission se referme donc afin de permettre à l'air admis d'être compressé.

3ème Etape :

Le piston de compression remonte toujours, il n'est pas au PMH. L'air contenu dans la chambre de compression est monté en pression. Le clapet liant le conduit de transfert au cylindre de compression s'ouvre sous l'effet de la différence de pression et l'air commence à être transféré dans le conduit de transfert jusqu'au PMH du piston de compression.

4ème Etape :

On s'intéresse maintenant à la course du piston de détente. Lorsqu'il est au PMH, la soupape d'admission s'ouvre laissant l'air comprimer entrer dans le cylindre de détente avec de l'essence.

5ème Etape :

Le piston de détente a commencé à descendre, le mélange air/essence s'est homogénéisé et toutes les soupapes du cylindre sont fermées. L'explosion du mélange a alors lieu, faisant ainsi redescendre le piston vers le PMB.

6ème Etape :

Le piston remonte et la soupape d'échappement s'ouvre afin de laisser les gaz bruler s'échapper, jusqu'au PMH du piston de détente.

3.1.3. Comparaison moteur 4 temps/moteur 5 temps

Moteur 5 temps

Nombre de cylindre considéré : 3

- 2 cylindres classiques avec cycle de 4 temps
- 1 cylindre de post détente avec les gaz d'échappements

Le moteur 5 temps est un moteur dérivé du moteur 4 temps dans un souci d'optimisation de puissance et de réduction de coût énergétique dans les moteurs. Il se compose de 3 cylindres, 2 cylindres qui effectuent des cycles de 4 temps mais en alternés et un cylindre qui réalise la post détente. Quand l'un des deux cylindres 4 temps fait la compression l'autre fait l'échappement. Alors que le dernier cylindre réalise la post détente.

1er cylindre 4 temps	Cylindre de post détente	2ème cylindre 4 temps
Admission		Détente
Compression	Post détente	Echappement
Détente		Admission
Echappement	Post détente	Compression

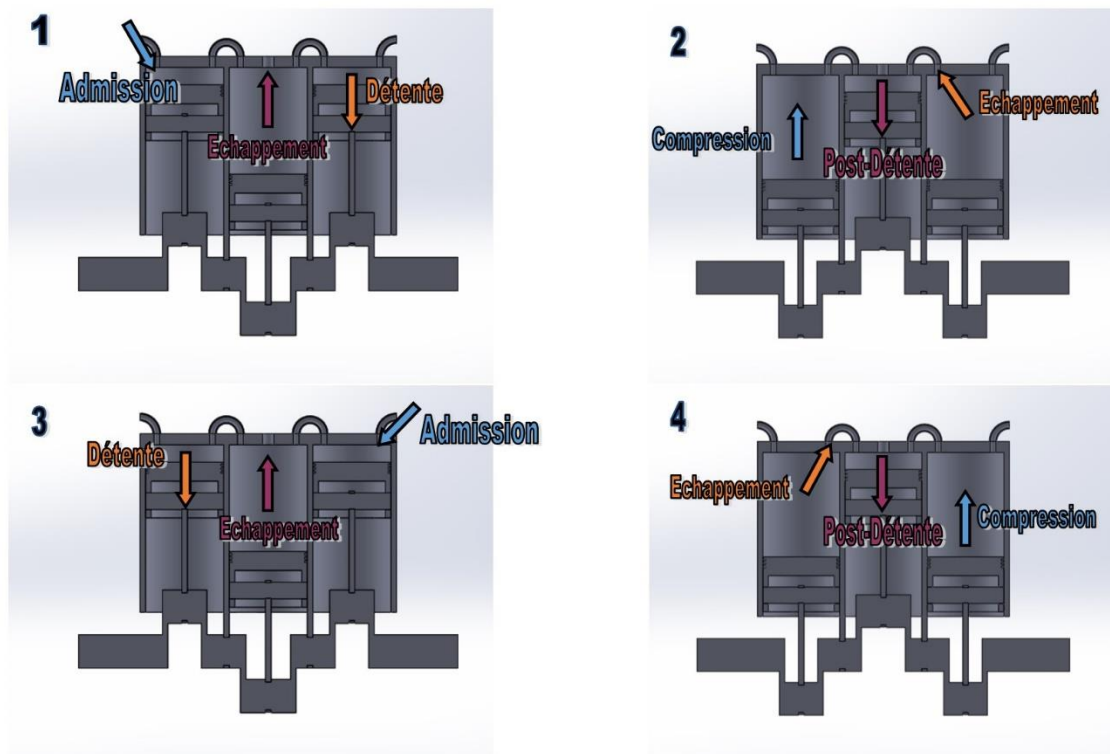


Figure 3: Cycle du moteur 5 temps

Moteur 4 temps

Nombre de cylindre considéré : 1

Le moteur 4 temps est le moteur de base utilisé aujourd'hui dans les voitures. Il est appelé 4 temps car son cycle se décompose en 4 temps : l'admission du carburants, la compression, la détente et l'échappement des gaz d'échappement. C'est l'un des moteurs les plus simples à mettre en place car il ne dépend que d'un seul cylindre. Il est aussi le moteur sur lequel s'appuient les moteurs 5 temps et Scuderi en se basant sur son cycle qui distingue les 4 étapes.

Cylindre 4 temps
Admission
Compression
Détente
Echappement

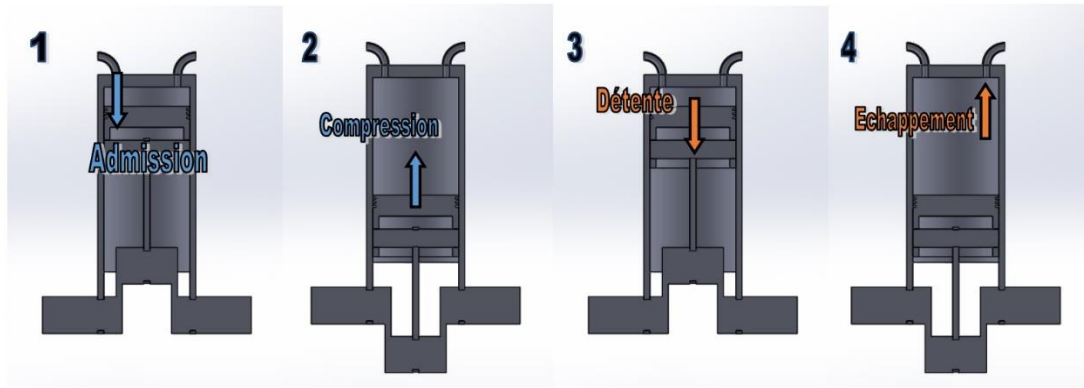


Figure 4: Cycle du moteur 4 temps

Moteur Scuderi

Nombre de cylindre considéré : 2

- 1 cylindre de compression
- 1 cylindre de détente

Le moteur Scuderi est celui sur lequel nos recherches se portent. Son cycle se réalise comme celui d'un moteur 4 temps mais repartis sur 2 cylindres. Un premier de compression qui réalise l'admission et la compression de l'air et un second qui réalise la détente et l'échappement des gaz brûlés.

Cylindre de compression	Cylindre de détente
Admission	Détente
Compression	Echappement

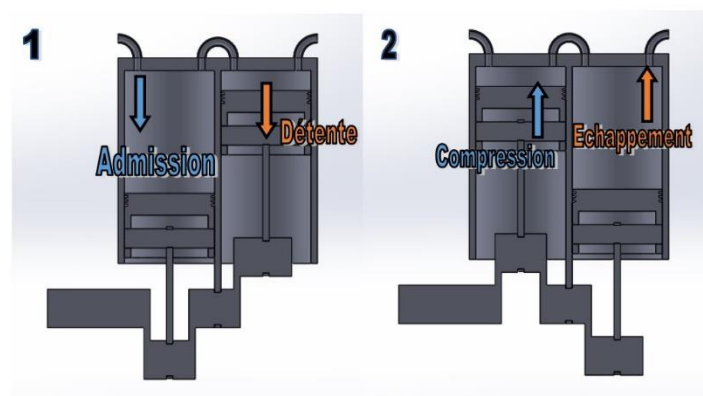


Figure 5: Cycle du moteur Scuderi

3.2. Cinématique et mécanique du moteur Scuderi

3.2.1. Modélisation des pistons :

A l'aide d'un tableur programmé sur Microsoft Excel, nous avons modélisé la course du piston dans le cylindre de compression et de celui dans le cylindre de détente. L'objectif est de déterminer la cylindrée du moteur Scuderi en calculant les volumes dans chacun des cylindres.

Ceci nous sera utile pour calculer la valeur des variables thermodynamique à chaque instant du cycle, et d'en déduire le rendement.

Notre simulation va donner la position du point le plus haut de chacun des pistons en fonction de l'angle du vilebrequin.

La géométrie du moteur Scuderi, nous impose tout d'abord de fixer différentes variables qui sont définies de la manière suivante :

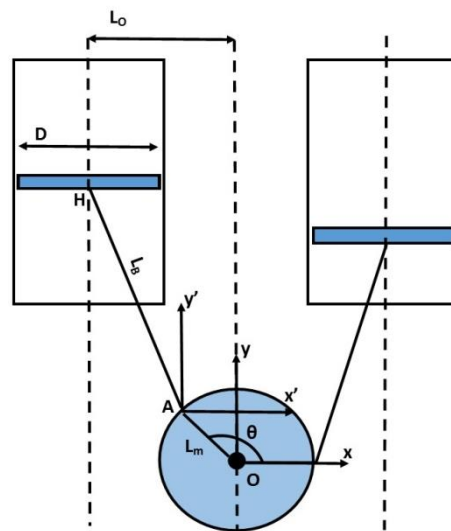


Figure 6 : Schéma de la modélisation du piston

- L'origine du repère O est fixée dans l'axe du vilebrequin.
- L_m = le rayon du maneton
- L_b = longueur de la bielle
- L_o = décalage en x du entre le centre du repère et l'axe verticale du cylindre
- A, un point à l'extrémité du maneton.
- H, point situé sur l'axe de révolution du cylindre, référençant la hauteur du haut du piston.
- θ , angle entre l'axe x et le segment [OA].
- μ , entre l'axe x' du repère de centre A et le segment [AH].
-

3.2.2. Explication des calculs : recherche de position du point H.

Nous avons donc trois points qui ont les coordonnées suivantes dans le repère (O, x, y) :

$$O : (0 ; 0)$$

$$A : (L_m \cdot \cos(\theta); L_m \cdot \sin(\theta))$$

$$H : (-L_o ; y_h)$$

L'objectif ici est de calculer la coordonnée en y du point H.

$$\overrightarrow{OH} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AH}$$

Si on exprime en fonction de θ et μ , on obtient :

$$\begin{pmatrix} -L_o \\ y_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_m \cdot \cos(\theta) \\ L_m \cdot \sin(\theta) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_b \cdot \cos(\mu) \\ L_b \cdot \sin(\mu) \end{pmatrix}$$

On a donc : $y_h = L_m \cdot \sin(\theta) + L_b \cdot \sin(\mu)$.

Il suffit maintenant d'exprimer l'angle μ en fonction de θ .

Projetons le point H, orthogonalement sur l'axe x'. On obtient donc le point B.

Dans le triangle BAH, rectangle en B, on s'intéresse à l'angle entre [BA] et [HA].

Exprimons le cosinus de cet angle :

$$\cos(\pi - \mu) = \frac{AB}{AH}$$

$$-\cos(\mu) = \frac{-L_o + L_m \cdot \cos(\theta)}{L_b}$$

$$\cos(\mu) = \frac{L_o - L_m \cdot \cos(\theta)}{L_b}$$

$$\mu = \cos^{-1} \left(\frac{L_o - L_m \cdot \cos(\theta)}{L_b} \right)$$

On obtient donc à chaque instant la position du point H :

$$H: \left(y_h = L_m \cdot \sin(\theta) + L_b \cdot \sin(\mu) \right)$$

3.2.3. Mise en place de la représentations graphique en 2 dimensions

A ce moment, nous avons la position de chacun des 3 points en fonction de l'angle du vilebrequin θ . Pour pouvoir modéliser le mouvement d'un piston, il suffit donc de faire une boucle POUR sur l'angle du vilebrequin en incrémentant ce dernier de 1° à chaque fois. L'angle varie donc de 0° à 360° afin de pouvoir faire un tour complet.

Pour cela, les données fixes sont rentrées dans la feuille « data » du classeur Excel. On utilise un bouton auquel on affecte la macro « calcul ». Celle-ci renvoie la valeur des différentes variables (x_a

, y_a , x_h , y_h ...) pour chaque degré de vilebrequin θ (entre 0° et 360°) qu'elle affiche dans la feuille « Result ».

Par la suite dans la feuille « tracé », le bouton animation programmé par la macro « mouv2 », récupère les coordonnées des 3 points caractéristiques dans « Result ». Ainsi à chaque clic de la souris sur le bouton, l'angle θ augmente de 1° et les coordonnées des points A, H et O sont actualisées.

Enfin un graphique « nuage de point » est alors inséré, prenant en abscisse la plage de données regroupant les coordonnées x de chaque point, et en ordonné, celle regroupant les coordonnées y .

	x_Comp	y_Comp	x_Det	y_Det
A	-25,4	195,59	29,2	162,57
B	4,4275	-50,607	-18,117	-67,615
O	0	0	0	0

Figure 8 : Cordonnées des points pour un angle de vilebrequin donné

Comme cela est visible sur ces deux illustrations, le même processus a été effectué pour le cylindre de détente. Les formules de calculs sont identiques et seul une constante relatif à l'angle (δcd) entre les « deux manetons » s'additionne à l'angle θ afin de pour permettre cette modélisation.

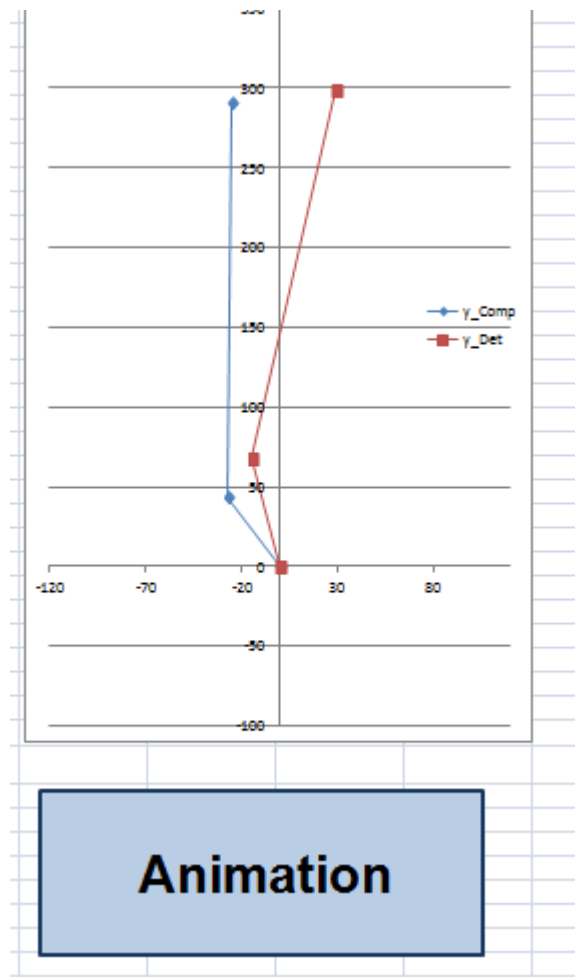


Figure 7: Représentation graphique du piston

3.2.4. Calcul des volumes :

Dans cette partie, nous allons maintenant calculer la cylindrée de chacun des cylindres de compression et de détente. La position du point H déterminée précédemment permettra également d'observer l'évolution des volumes en fonction du degré de vilebrequin

Avant de pouvoir effectuer les calculs, il est nécessaire d'effectuer des recherches sur les données que nous allons mettre dans la feuille « data ».

Pour cela, nous avons étudié la Brevet déposé par la société américaine Scuderi. Celui-ci nous a permis de comprendre les différentes étapes de fonctionnement du moteur et de récupérer les données utiles au calcul du volume.

Voici les données que nous avons regroupées dans la feuille « data » :

CAS		1
Compression Cylinder		
Longueur de bielle (mm)		248
Longueur de manneton (mm)		50,8
Offset (mm)		-25,4
Valeur de n		1,34
Diamètre Cylindre (mm)		112
Volume Minimum (cm ³)		49,2602
PMH (mm)		297,718
Volume Maximum (cm ³)		1055,74
Expansion Cylinder		
Longueur de bielle (mm)		235
Longueur de manneton (mm)		70
Offset (mm)		29,2
Valeur de n		1,34
Diamètre Cylindre (mm)		101,6
Volume mini (Cm ³)		81,0732
PMH (mm)		303,596
Volume Maximum (cm ³)		1225,82

Common Data	
Vitesse de rotation du vilebrequin (tr/m)	1400
Vitesse de rotation du vilebrequin (rd/s)	146,608
Angle manneton Compression/Dentent	20
Volume Conduit de Transfert (cm ³)	100,648
Temperature Conduit de Transfert (K)	450
Masse Molaire air (kg/mol)	0,029
Masse Molaire air brûlé (kg/mol)	0,044
Durée de combustion (ms)	
Pression ambiante (Pa)	100000
Température ambiante (K)	293
Pouvoir Calorifique Inférieur PCI (J/kg)	20900
Capacité thermique massique air (J/kg)	1005

Figure 9 : Ensemble des variables fixes de l'étude

Pour calculer le volume maximum, on détermine dans un premier temps le PMH de chacun des cylindres. Cela s'effectue lors de la même boucle que précédemment. Ainsi à chaque angle, une condition sur y_h permet par comparaison de garder l'altitude la plus importante du piston.

Par la suite, on détermine un volume de sécurité pour chacun des cylindres. Ce volume permet de ne pas bloquer l'ouverture des soupapes. On le définit par la relation suivante :

$$V_{mini} = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot 10^{-2}}{4}$$

Ce volume correspond à une hauteur de 1cm. On obtient :

$$V_{miniC} = 49,26 \text{ cm}^3$$

$$V_{miniD} = 80,07 \text{ cm}^3$$

Afin d'obtenir une valeur parlante, on a décidé de garder les volumes en cm^3 . Or pour nos calculs, on a bien reconvertis toutes ces valeurs en m^3 .

Détermination du volume maximum :

Dans la même boucle, on récupère la valeur d' y_h à chaque angle θ . On détermine alors le volume à chaque instant par la formule suivante :

$$V = V_{mini} + \frac{(y_{h_{PMH}} - y_h) \cdot \pi \cdot d^2}{4}$$

Ceci permet de tracer le volume des cylindres de compression et de détente.

Les valeurs des volumes maximum de chacun des cylindres sont :

$$V_{maxC} = 1055 \text{ cm}^3$$

$$V_{maxD} = 1225 \text{ cm}^3$$

Modélisation des volumes en fonction de l'angle du vilebrequin :

Les volumes sont calculés pour chaque angle de vilebrequin à l'aide de la même macro « Calcul ». Les résultats sont envoyés dans une nouvelle feuille appelée « geo » qui génère la représentation graphique suivante :

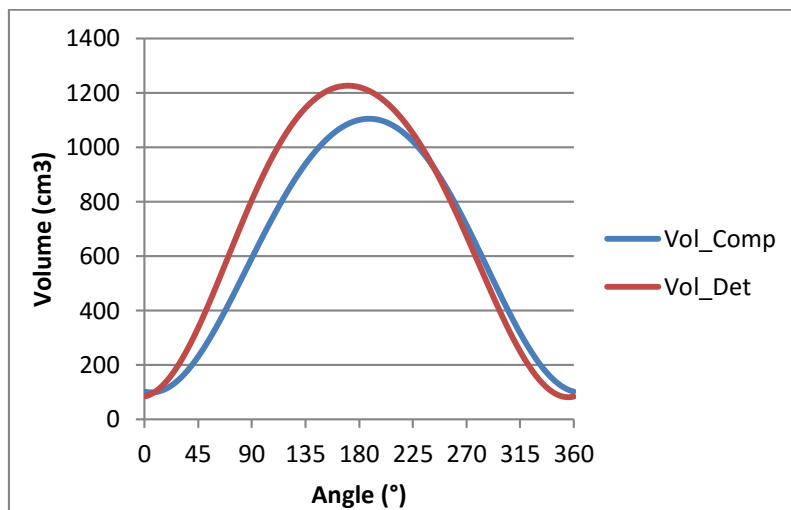


Figure 10 : Modélisation des volumes en fonction de l'angle du vilebrequin

3.2.5. Fonctionnalités et utilisations du programme :

Le programme mise en place sur le logiciel tableur Excel nous permet également de créer plusieurs études à l'intérieur du même fichier.

Sur la feuille principale nommée « data », nous avons ajouté une fonctionnalité qui opère avec la macro « nouvelle entrée ». Lorsque l'on clic sur ce bouton, l'ensemble des données de la première étude sont décalé vers la droite et une nouvelle base de renseignement vide est ajoutée. En remplissant celle-ci, on peut de nouveau générer une modélisation de la course des pistons car cette macro crée également une nouvelle feuille

« Result », « geo » et un graphique similaire au précédent pour la course du piston dans la feuille « tracé ».

De la même manière, il sera possible de faire les calculs de thermodynamique avec ces nouvelles données d'entrée. Une feuille de « Work », pour calculer le travail sera mise en place et le nouveau rendement du moteur sera affiché.

Cette amélioration nous permet de faire plusieurs études en même temps et de les garder en mémoire. Elle nous facilite ainsi la comparaison entre celle-ci et l'influence des données initiales sur les résultats finaux.

3.3. Etude thermodynamique

L'objectif de cette partie est de juger de l'efficacité du Moteur Scuderi et d'en déduire si celui peut être considéré comme une alternative aux moteurs à combustion interne classique. Nous chercherons donc à établir un diagramme de Pression = f(Volume), ainsi que les travaux durant chaque étape du cycle. Avec ces derniers, il nous sera donc possible de déterminer le rendement du moteur et de répondre à notre problématique.

Avec le même classeur programmé que précédemment, nous avons calculé la valeur des variables d'état en fonction de l'angle du vilebrequin. Ceci nous permet donc d'effectuer plusieurs séries de tests mais également de pouvoir observer l'évolution des variables thermodynamiques lors du régime transitoire au moment du démarrage moteur.

3.3.1. Gestion des soupapes :

En amont de cette étude, nous avons fixé avec M Vuillamy l'ouverture et la fermeture des soupapes en fonction de l'angle θ_{vil} du vilebrequin. Pour rappel, nous avons choisi de modéliser chacun des cylindres avec une soupape d'admission et une soupape d'échappement.

Le graphe réalisé

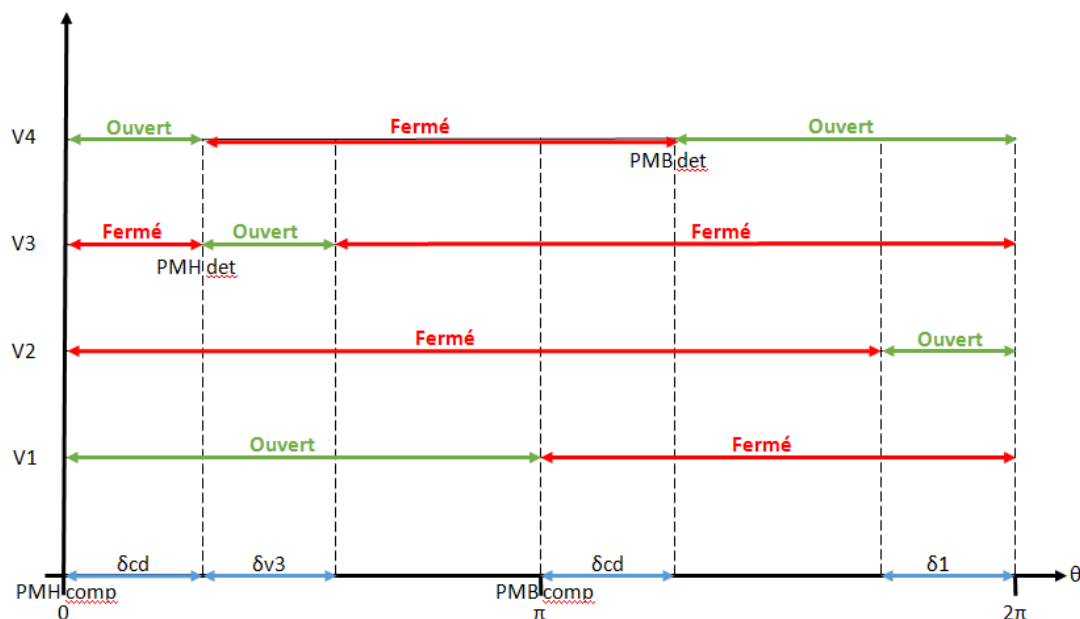


Figure 11 : Chronographe gestion des soupapes

Explication :

La soupape V1 s'ouvre un peu après le PMH de compression. L'objectif de ce delta est d'obtenir une pression de 0.9 Bar avant d'admettre l'air frais. Celle-ci reste ouverte jusqu'au PMB (180°) et se referme donc jusqu'à la fin de la compression comme sur un moteur 4 temps.

La soupape V2 est fermée lors de la phase d'admission d'air. Lors de la phase de compression, elle s'ouvre au moment où la pression du cylindre est égale à la pression du conduit de transfert. Elle reste ouverte jusqu'au PMH de compression : on note alors ce moment en °, δ_1 .

La soupape V3 s'ouvre avec le décalage δ_{cd} évoqué dans la modélisation de la course du piston. Elle s'ouvre pour pouvoir admettre l'air présent dans le conduit de transfert. Elle le reste pendant l'équivalent de $\frac{1}{4}$ de volume du cross-over, soit δ_{v3} , avant de se refermer pour l'explosion.

La soupape V4 subit le même décalage δ_{cd} . Elle est donc fermée pendant les phases de transfert de gaz frais et l'explosion. Elle s'ouvre au PMB du cylindre de détente afin d'évacuer les gaz d'explosion et le reste jusqu'au PMH soit pendant 180°.

3.3.2. Détermination des variables thermodynamique et calcul du travail

Nous nous plaçons pour ces calculs à la fin du régime transitoire, lorsque le cycle s'est stabilisé c'est-à-dire au moment où le moteur possède le meilleur rendement.

L'ensemble des valeurs que nous présentons dans cette explication ont été calculé avec le même tableur programmé. Ainsi, nous avons choisis de donner que les valeurs de début et de fin de chaque étape. Cependant, le programme donne l'état de chacune d'entre-elles à chaque instant, ce qui correspond à 1° d'angle de vilebrequin.

Cylindre de compression :1^{er} étape :

Le piston est au PMH du cylindre de compression qui correspond au V_{miniC} que nous avons fixé. La valeur des variables sont celles de la dernière compression :

$$P_{finC} = 13,89 \text{ bar}$$

$$T_{finC} = 660 \text{ K}$$

Le gaz effectue une détente adiabatique jusqu'à la pression $P_{1c} = 9000 \text{ Pa}$ (à laquelle sera admis l'air frais). On utilise donc une relation de Laplace pour déterminer le volume de fin de détente.

$$V_{1C} = V_{miniC} \cdot \left(\frac{P_{finC}}{P_{1C}} \right)^{\left(\frac{1}{\gamma} \right)} = 712,5 \text{ cm}^3$$

2^e étape :

La vanne V1 s'ouvre et l'air frais entre dans le cylindre de compression. Celle-ci reste ouverte jusqu'à ce que le piston atteigne Le PMB. L'air est à la pression atmosphérique $P_{atm} = 1 \text{ Bar}$.

3^e étape :

Le piston de compression se situe au PMB et la pression à l'intérieur du cylindre est restée constante. Avec M. Vuillamy, Nous avons fixé la température à 30°C au-dessus de la température ambiante en raison du frottement mécanique mais aussi de la chaleur que dégage le moteur lors de son fonctionnement. Ainsi on a :

$$P2C = 0.9 \text{ Bar}, T2C = 323 \text{ K et } V2c = VmaxC = 1055.10^{-6} \text{ m}^3$$

A ce moment, commence donc la phase de compression qui se décompose en 3 étapes :

- 1) La première est une compression adiabatique réversible jusqu'à ce que la pression à l'intérieur du cylindre soit égale à celle du conduit de transfert.

Comme dans l'étape antérieure, la loi de Laplace est utilisée pour le calcul du volume et de la température au moment de l'ouverture de la vanne 2. Pour la loi de Laplace, on prend le coefficient $n=1.34$ (car nous ne sommes pas à température ambiante).

$$V3C = VmaxC. \left(\frac{P2C}{Ptrans} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)} = 244,9 \text{ cm}^3$$

$$T3C = T2C. \left(\frac{P2c}{Ptrans} \right)^{\left(\frac{1-n}{n} \right)} = 543 \text{ K}$$

- 2) La vanne 2 s'ouvre : à cet instant, il y a une homogénéisation entre le contenu dans le cylindre ainsi que celui présent dans le conduit de transfert. Pour déterminer les nouvelles valeurs de pression et de température, il est indispensable d'utiliser la conservation de l'énergie interne du système. Les données sont les suivantes :

$$Mair = 0.029 \text{ Kg.mol}^{-1}, R = 8.314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1} \text{ et } \gamma = 1.4$$

On détermine la masse de l'aire dans le cylindre avec l'équation des gaz parfait:

$$mairC = \frac{P3C.V3C}{R.T3C.Mair} = 1,05.10^{-3} \text{ Kg}$$

De la même manière pour le conduit de transfert :

$$mtrans = \frac{Ptrans.Vtrans}{R.Ttrans.Mair} = 7,38.10^{-4} \text{ Kg}$$

La capacité massique à volume constant de l'air se trouve par :

$$cp - cv = \frac{R}{Mair}$$

$$cv = 716,7 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

On pose :

- $VtotC = Vtrans + V3C$
- $mtotC = mtrans + mairC$
-

La relation de conservation de l'énergie interne du système :

$$Ut = (mairC. cv. T3c) + mtrans. cv. Ttrans) = (mtotC). cv. TmoyC$$

$$T_{moyC} = 544,08 \text{ K}$$

La pression d'équilibre est déterminée par l'équation des gaz parfaits :

$$P_{moyC} = \frac{m_{totC} \cdot R \cdot T_{moyC}}{M_{air} \cdot V_{totC}} = 6.47 \text{ Bar}$$

- 3) La 3eme étape de la compression commence. La vanne 2 est toujours ouverte et le restera jusqu'au volume minimum fixé, V_{minic} . Il s'agit toujours d'une compression adiabatique réversible, les relations de Laplace sont de nouveau utilisées pour déterminer la pression et la température en fin de compression.

$$P_{finC} = P_{moyC} \cdot \left(\frac{V_{totc}}{V_{minic}} \right)^{(n)} = 13.89 \text{ Bar}$$

$$T_{finC} = T_{moyC} \cdot \left(\frac{P_{moyC}}{P_{finC}} \right)^{\left(\frac{1-n}{n} \right)} = 660 \text{ K}$$

Conclusion de la partie cylindre de compression :

La vanne 2 se referme. A cet instant, Les valeurs de pression et de température sont donc identiques dans le volume minimal du cylindre de compression (V_{miniC}) et dans le conduit de transfert (V_{trans}). On retrouve bien les mêmes valeurs qu'au début du cycle.

$$P_{finC} = P_{trans} = 13,89 \text{ Bar}$$

$$T_{finC} = T_{trans} = 660 \text{ K}$$

Cylindre de détente :

1^{er} étape :

Le piston est au PMH du cylindre de détente qui correspond au V_{miniD} que nous avons fixé. La valeur des variables sont celles du dernier échappement des gaz brûlés. Avec M. Vuillamy, nous avons fixé $P_{find} = 1.5 \text{ bar}$ en raison de la géométrie des tuyaux dans lesquels sont évacués les gaz brûlés lors de la dernière du cycle du moteur :

$$P_{finD} = 1,5 \text{ Bar}$$

$$T_{finD} = 1013 \text{ K}$$

On calcule également la masse des gaz brûlés qui nous sera utile lors de la phase d'homogénéisation :

$$m_{airD} = \frac{P_{finD} \cdot V_{miniD} \cdot M_{CO2}}{R \cdot T_{finD}} = 6,35 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}$$

Le gaz effectue une détente adiabatique jusqu'à la pression jusqu'à ce que :

$$V_{1D} = V_{miniD} + 15 \text{ cm}^3$$

Cela correspond donc à la détente du seul gaz mort résiduel :

$$P_{1D} = P_{finD} \cdot \left(\frac{V_{miniD}}{V_{1D}} \right)^{(n)} = 1.15 \text{ Bar}$$

2^e étape :

La vanne 3 s'ouvre. De la même manière que dans le cylindre de compression, il y a une homogénéisation entre les gaz résiduels et les gaz frais de la dernière compression dans le conduit de transfert. Pour déterminer les nouvelles valeurs de pression et de température, il est indispensable d'utiliser la conservation de l'énergie interne du système.

On calcule tout d'abord la température à V1d :

$$T1D = \frac{P1D.V1D.MO2}{R.mairD} = 624,9 K$$

La capacité massique à volume constant du dioxyde de carbone se trouve par :

$$cp - cv = \frac{R}{MCO2}$$

$$cv_{CO2} = 472,4 J.kg^{-1}.K^{-1}$$

On pose :

- $V_{totD} = V_{trans} + V1D$
- $m_{totD} = m_{trans} + m_{airD}$

La relation de conservation de l'énergie interne du système :

$$U_t = (m_{airD}.cv_{CO2}.T1D) + m_{trans}.cv.T_{trans} = (m_{airD}.cv_{CO2} + m_{trans}.cv).T_{moyD}$$

$$T_{moyD} = 658 K$$

La pression d'équilibre est déterminée par l'équation des gaz parfaits :

$$P_{moyD} = \frac{\left(\frac{m_{airD}}{MCO2} + \frac{m_{trans}}{Mair}\right) R.T_{moyD}}{V_{totD}} = 7,59 Bar$$

Rectification et amélioration des formules sur l'étape 2 :

Cependant dans sur cette étape, Nous avons supposé que la température s'homogénéisais, ce qui n'est pas le cas. Il y a donc une température propre au cylindre de détente et une autre différente pour le conduit de transfert. La masse dans celui-ci sera également une inconnue.

On décide que cette homogénéisation s'effectue de : $V_{tot} = V1D + V_{trans}$ à $V_{tot} = V1D + V_{trans} + 0.25V_{Trans}$.

On pose alors 4 équations qui permettront de trouver les inconnues :

$$P_{moyD}, \quad m_{trans}, \quad T_{moyhD}, \quad T_{trans}$$

On a la masse totale de fluide dans le compartiment est m_{tot} qui va se conserver.

Or comme évoqué, la masse dans le conduit de transfert va varier. On aura donc la masse de fluide alloué au cylindre de détente qui va aussi bouger :

$$mD = m_{tot} - m_{trans}$$

Liste des équations :

(1)-> Conservation de l'énergie interne lors de l'homogénéisation

$$U = m_{trans}.cv.T_{trans} + mD.cv.T_{moyhD}$$

$$= m_{trans_{init}}.cv.T_{ran_{init}} + mD_{init}.cv.TD_{init} + travail (a chaque angle)$$

(2)-> Loi de Laplace pour déterminer la température du conduit de transfert

$$Trans = Trans_{init} \cdot \left(\frac{P_{moyD}}{P_{trans}} \right)^{\frac{1-n}{n}}$$

(3)-> Loi des Gaz Parfaits sur le cylindre de détente :

$$VD = \frac{mD.R.T_{moyhD}}{Mair.P_{moyD}}$$

(4)-> Loi des Gaz Parfaits sur le conduit de transfert :

$$V_{trans} = \frac{m_{trans}.R.Trans}{Mair.P_{moyhD}}$$

Dans notre programme, un TANT QUE sur la valeur Vtot a été testé. A chaque angle de vilebrequin et par test, la pression d'homogénéisation a été définie de telle manière que l'ensemble des équations précédentes soient satisfaites.

Les 4 inconnues devraient ainsi déterminées par le programme à la fin de cette étape 2.

Le programme, modélisé pour cette étape, ne nous a pas permis d'obtenir les 4 inconnues : Le processus reste en boucle sans nous proposer de données. A ce jour, nos investigations ne nous a pas permis de trouver la cause de ce dysfonctionnement. En conclusion, la proposition n°1 a été conservée pour l'homogénéisation des gaz avant explosion (étape 2 + étape 3).

3^e étape :

La phase d'explosion va donc débuter.

Avant cela, on effectue de nouveau une détente avec ici le volume du cylindre de compression et celui du conduit de transfert. Elle s'effectue jusqu'à ce que :

$$V_{2D} = V_{totD} + \frac{1}{4}.V_{trans}$$

Il s'agit encore d'une hypothèse faite avec le professeur.

On a donc la relation suivante :

$$P_{2D} = P_{moyD} \cdot \left(\frac{V_{totD}}{V_{2D}} \right)^{(n)} = 6,3 \text{ Bar}$$

On calcule la nouvelle masse de gaz avant la fermeture de la soupape 3. On détermine la température et retrouve la masse à l'intérieur du cylindre avec la loi des gaz parfait

$$T_{2D} = T_{moyD} \cdot \left(\frac{P_{moyD}}{P_{2D}} \right)^{\left(\frac{1-n}{n} \right)} = 546,9 \text{ K}$$

$$m_{2D} = \frac{R \cdot T_{2D} \cdot M_{O_2}}{P_{2D} \cdot (V_{2D} - V_{trans})}$$

La soupape 3 se referme. On note que la valeur des variables du conduit de transfert a changé pour prendre celle de la dernière transformation adiabatique.

$$P_{trans} = P_{2D}$$

$$T_{trans} = T_{2D}$$

On commence alors la phase d'explosion :

On détermine en premier lieu la masse d'essence nécessaire à l'explosion. Nous savons que 1 Kg d'essence équivaut à 15 Kg d'air. On détermine :

$$m_{ess} = \frac{m_{2D}}{15} = 6,1 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}$$

On décide tout d'abord de fixer le volume durant lequel s'effectue l'explosion : celui-ci correspond dans notre modélisation à 10° d'angle de vilebrequin. Durant cette phase, on calcul alors la valeur des variables de température et de pression à chaque angle. Ainsi dans une boucle Pour, on utilise les relations :

Avec le pouvoir calorifique de l'essence : $p_{ci} = 20900000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

Cela nous permet de calculer la chaleur produite pendant la combustion.

$$Q_{comb} = \frac{p_{ci} \cdot m_{ess}}{10}$$

On divise le résultat par 10 car Q_{comb} est répartis sur les 10° d'angle.

En utilisant maintenant la première loi de Joule à volume constant ainsi que le premier principe de la thermodynamique :

$$dU = dQ = m_{2D} \cdot cv \cdot dT$$

Ce qui permet de déterminer l'augmentation de la température lors de l'explosion à chaque degré (d'angle).

$$T_{d_n} = T_{d_{n-1}} + \frac{Q_{comb}}{m_{2D} \cdot cv}$$

Avec la loi des gaz parfait, la pression est alors connue :

$$P_{D_n} = \frac{m_{2D} \cdot R \cdot T_{D_n}}{M_{air} \cdot V_{D_n}}$$

A la fin des 10° d'angle, on récupère alors les 3 variables associées à la fin de l'explosion

$$P_{3D} = 26.5 \text{ Bar}$$

$$T_{3D} = 1933 \text{ K}$$

$$V_{3D} = 190 \text{ cm}^3$$

On observe des valeurs très élevées de pression et de température ce qui est normal après une combustion.

5^e étape :

L'explosion est donc terminée, le système des gaz brûlés va subir une détente adiabatique jusqu'au PMB du cylindre de détente.

$$P_{4D} = P_{3D} \cdot \left(\frac{V_{3D}}{V_{maxD}} \right)^{\gamma} = 2.18 \text{ Bar}$$

$$T_{4D} = T_{3D} \cdot \left(\frac{P_{3D}}{P_{4D}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1013,48 \text{ K}$$

6^e étape :

Le piston se trouve au PMB du cylindre de détente et la soupape 4 s'ouvre afin de permettre l'échappement des gaz explosés. Comme dit auparavant la pression lors de cette échappement reste constante et est fixée à $P_{finD} = 1.5 \text{ Bar}$ en raison de la géométrie des tuyaux moteur. On estime que le passage de P_{3D} à P_{finD} se fait en 10° de vilebrequin après l'ouverture de la soupape 4. On fait l'hypothèse d'une évolution linéaire de la pression sur ces 10 angles de vilebrequin. On a donc la relation dans notre programme.

$$P_n = P_{n-1} - \left(\frac{P_{4D} - 1,5 \cdot 10^5}{10} \right)$$

Avec n qui dépend du degré d'angle.

Avec M. Vuillamy, nous avons supposé que cette étape était également isentropique. Cela veut dire qu'il est possible pour nous d'utiliser les relations de Laplace pour déterminer la température.

$$T_{finD} = T_{4d} \cdot \left(\frac{P_{4D}}{P_{finD}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Pour finir, l'échappement des gaz se fait de manière isobare à la pression $P_{finD} = 1.5 \text{ Bar}$. La soupape 4 se referme au PMH de détente correspondant à V_{miniD} . La température reste également constante jusqu'à la fin du cycle.

On retrouve donc en toute fin de cycle :

$$P_{finD} = 1,5 \text{ Bar}$$

$$T_{finD} = 1013 \text{ K}$$

Modélisation de la pression en fonction de l'angle θ_{vil} :

On a décidé de mettre l'évolution de la pression dans chaque compartiment du moteur Scuderi :

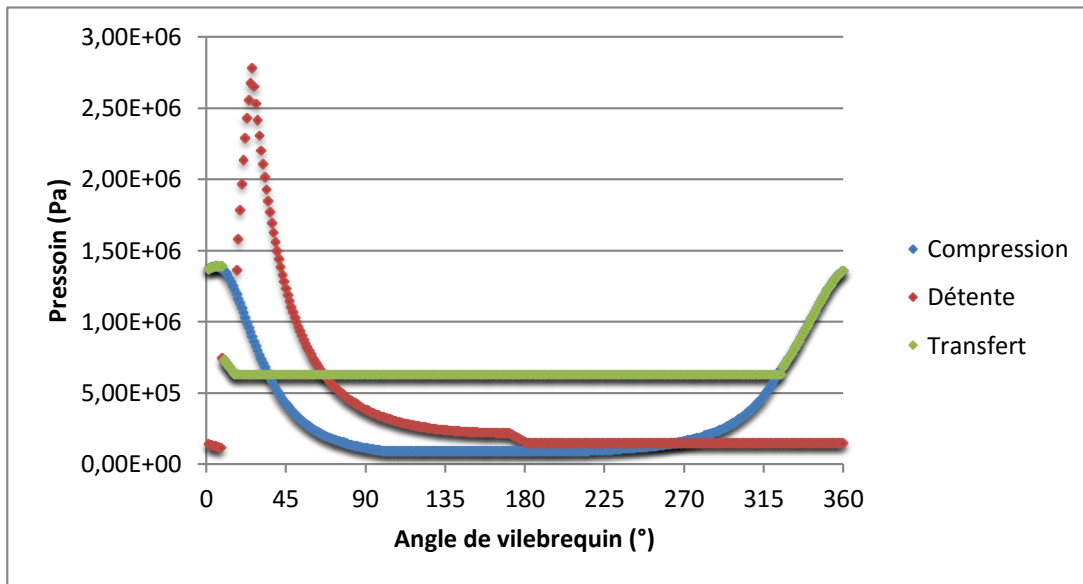


Figure 12 : Modélisation de la pression en fonction de l'angle θ_{vil}

3.4. Modélisation thermodynamique

Après avoir calculé les volumes en fonction de chaque angle, dans chaque cylindre, il est alors possible de calculer le travail pour chaque degré d'angle, et ainsi obtenir le travail total dans chaque cylindre.

Le calcul du travail a été réalisé à partir de la formule suivante :

$$\delta W = - \int_1^2 P dV$$

Puisque le volume est fonction de l'angle φ , nous adaptons donc les bornes de l'intégrale :

$$\delta W = - \int_0^{2\pi} P d(V(\varphi))$$

Dans notre cas, le travail total pour chaque cylindre est calculé en sommant le travail élémentaire de chaque angle φ :

Travail élémentaire :

$$dW = - \int_{\varphi}^{\varphi+1} P d(V(\varphi))$$

Travail total :

$$W_{tot} = \sum_{\varphi=0}^{\varphi=360} dW$$

La pression P s'obtient par soustraction de la pression atmosphérique P_{atm} à la pression à l'intérieur du cylindre P_c (Compression) ou P_d (Détente) :

$$P = P_c - P_{atm}$$

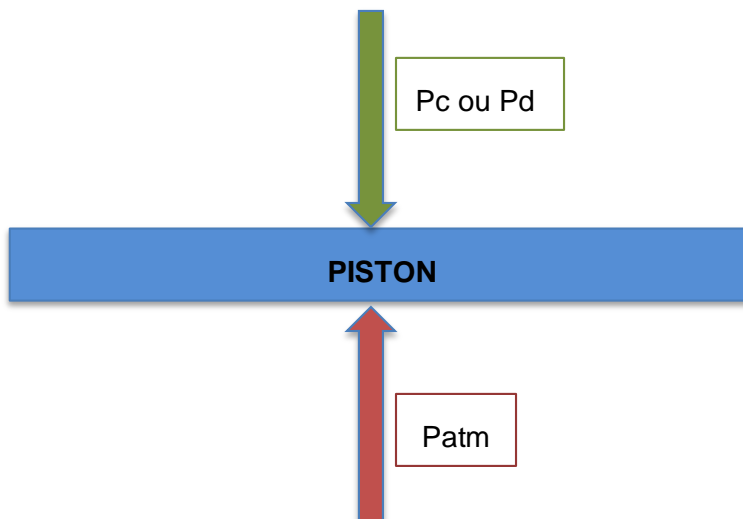


Figure 13 : Schéma des forces de pression s'exerçant sur les parois

Les formules du travail élémentaire et de la pression ont été utilisées dans une fonction que nous avons codée sous VBA. Cela a permis de dresser un tableau recueillant l'ensemble des valeurs de travail pour chaque angle dans les deux cylindres. Le travail total a ensuite été calculé en sommant le travail du cylindre de compression et de détente, pour chaque angle également.

A	B	C	D	E
		Travail (J)		
	Angle Phi1 (°)	Compression	Extension	Total
	1	-0,548684601	0,047370188	-0,501314413
	2	-0,446755565	0,052797655	-0,39395791
	3	-0,344717586	0,056292328	-0,288425257
	4	-0,242617014	0,057705625	-0,184911388
	5	-0,140500147	0,056941655	-0,083558492
	6	-0,038413199	0,053954873	0,015541674
	7	0,1479372	0,048745965	0,196683165
	8	0,383190823	0,041356458	0,424547281
	9	0,614199491	1,87913123	2,493330722
	10	0,839015623	1,973085404	2,812101027
	11	1,055835252	2,058034383	3,113869635
	12	1,263033291	2,133982757	3,397016049
	13	1,45919125	2,201010119	3,660201369
	14	1,643116688	2,259263424	3,902380113
	15	1,813854231	2,308948955	4,122803186
	16	1,970688398	2,350324139	4,321012537
	17	2,11313897	5,855640744	7,968779714
	18	2,240949887	7,172643655	9,413593541
	19	2,354072886	8,488544546	10,84261743
	20	2,452647206	9,796325774	12,24897298

Figure 14 : Valeur du travail en fonction de l'angle

Nous avons suite à ça pu représenter l'évolution du travail dans le cylindre de compression, détente, et le travail total dans un graphique. Cela a permis de visualiser rapidement si nos résultats étaient plausibles.

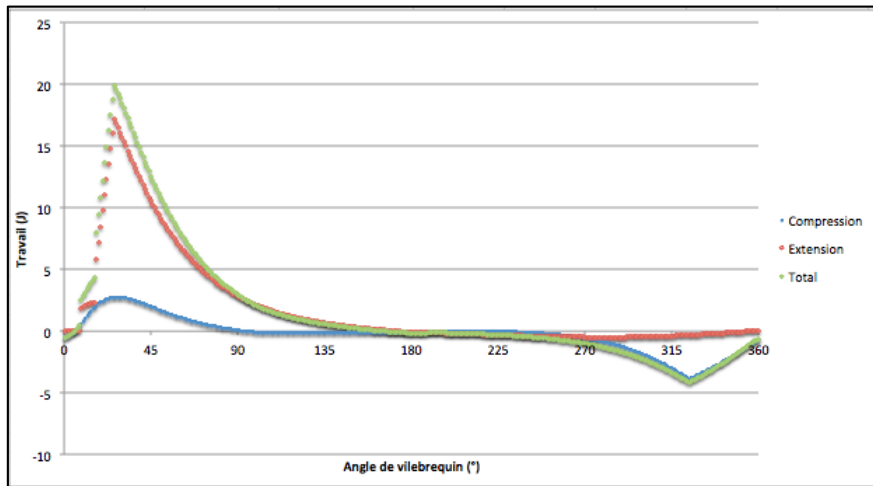


Figure 15 : Travail du moteur en fonction de l'angle des bielles

A noter que les valeurs de travail sont faibles, car elles correspondent à un degré d'angle, ce qui est relativement petit.

Ainsi, en sommant le travail dans le cylindre de compression, le cylindre de détente, les deux cylindres regroupés, on obtient ces valeurs :

J	K	L
Travail (J)		
Compression	Extension	Total
-78,18743659	675,5357241	597,3482875

Figure 16 : Travail total du moteur Scuderi

Lors de l'explosion dans le cylindre de détente, de la chaleur est créée. Il s'agit de cette énergie qui est utilisée pour créer un travail lors de la détente.

Grâce au codage, il nous a été permis de calculer cette chaleur créée.

Tous ces calculs ont un but précis. Il est ici important et nécessaire de calculer le rendement, soit la quantité d'énergie produite divisée par la quantité d'énergie utilisée. C'est ce paramètre qui permet de caractériser la performance d'un moteur, et de le comparer aux autres du marché. La recherche de rendement est le nerf de la guerre dans le domaine des moteurs à combustion interne.

Ainsi, pour un moteur, on calcule le rendement de la manière suivante :

$$\text{Rendement} = \left| \frac{W}{Q} \right|$$

Dans notre cas, on a calculé le rendement pour le cylindre de détente, où a lieu la combustion, et surtout le rendement pour le travail total, ce qui reste la valeur la plus intéressante.

On a donc obtenu un rendement de 47% pour notre dernier paramétrage en date. En effet, cette grandeur peut varier en fonction des différents paramètres attribués à notre système.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1. Conclusions sur le travail réalisé

Bien qu'au début de notre projet nous pensions que le moteur Scuderi soit moins efficaces que les autres moteurs que nous connaissons. C'est-à-dire moteur 2, 4, 5 temps. Mais après avoir étudié la cinématique et la thermodynamique de ce moteur, en les modélisant sous Excel, nous en sommes venus à déduire le rendement de ce moteur. Au final son rendement est de 47% pour notre dernier paramétrage. Alors que les moteur 4 temps classique n'ont qu'un rendement moyen de 35% pour un moteur à essence avec allumage commandé et 42% pour un moteur diesel. Donc le moteur Scuderi devrait être en bonne voie pour gagner le marché de l'automobile. Enfin d'un point de vue théorique

Le moteur à cycle divisé de Scuderi est en développement depuis plus d'une dizaine d'années mais celui-ci ne s'est pas encore fait remarqué dans une application concrète. Une série de brevets a été déposé courant 2011 à propos de certains éléments du moteur. Néanmoins, certaines entreprises comme Toyota, PSA Peugeot Citroën ou encore Daimler ont marqué leur intérêt sur le développement de ce moteur. Depuis 2009, l'entreprise Scuderi travaille en collaboration avec le Southwest Research Institute de San Antonio au Texas. Même avec cette collaboration, le projet du moteur à cycle divisé a du mal à avancer faute de financements. En effet, la santé financière de l'entreprise Scuderi dépend en très grande partie des investissements privés.

Un autre problème à l'avancée des travaux de Scuderi sont les déboires judiciaires que l'entreprise subit depuis 2015 (accusation de détournement de fond des investisseurs dans un but d'enrichissement personnel de la famille Scuderi). De plus cette même année, l'entreprise Hino Motors (constructeur de camion japonais qui appartient à Toyota) a porté plainte pour le non-remboursement de la clause de cassure d'un contrat liant Scuderi et Hino Motors pour le développement du moteur à cycle divisé. On peut aussi se douter que l'entreprise Scuderi a quelques difficultés d'ordre technique sur la conception de son moteur.

Tout ceci explique le manque de communication du groupe Scuderi à propos de son invention phare. Le groupe Scuderi possède en revanche une branche énergétique : Scuderi Clean Energy. Cette branche de Scuderi à l'air de mieux se porter que sa branche mère. Scuderi Clean Engine a développé un système de redistribution d'électricité permettant une meilleure gestion des périodes de fortes demandes. On peut donc penser qu'avec le temps l'entreprise réussira soit à financer le moteur Scuderi soit elle délaissera complètement sa branche moteur pour se consacrer à sa branche énergétique. Pour conclure, nous pouvons dire que Scuderi reste très obscure sur son avenir d'entreprise et sur l'avenir du moteur à cycle divisé.

4.2. Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C. projet

Chaque membre de ce groupe est intéressé par ce domaine de l'ingénierie, est ce que cela l'a conforté dans ces choix en vue de choisir le département de nos 3 prochaines années.

Est-ce que ce projet a éveillé en nous un intérêt particulier pour les moteurs ?

Ce projet a vraiment été enrichissant pour les différents membres de notre groupe, intéressés par le département mécanique et énergétique et propulsion, étant donné que l'étude de ce moteur nous a permis d'étudier à la fois sa partie cinématique et thermodynamique. Cela nous a donc donné un aperçu des thèmes, des travaux que nous aborderons dans ces deux départements.

En outre, ce projet nous a permis de mesurer la difficulté rencontrée par un ingénieur en vue de répondre aux différentes problématiques d'aujourd'hui, qui dans le cas de ce moteur sont:

- l'aspect environnemental (réduction des émissions de particules polluantes)
- l'aspect innovant (idée de deux cycles séparés)

Alexandre Blondel :

La mise en œuvre de ce projet a représenté pour moi une expérience enrichissante et m'a permis d'avoir un aperçu sur ce qui constitue une des missions demandées à un ingénieur.

Nous avons dû effectuer des recherches en équipe afin de comprendre le fonctionnement de ce moteur récemment breveté, et apporter des réponses à nos différentes interrogations. De plus, ce projet portait sur l'étude thermodynamique et cinématique du moteur. Étant intéressé par les deux départements « Mécanique » et « Energétique et Propulsion », cela m'a permis d'appréhender des sujets abordés dans ces deux départements.

J'ai pu également développer des qualités humaines grâce au travail en équipe, qualités indispensables requises pour le métier d'ingénieur.

Enfin, l'étude des moteurs contemporains et l'évolution des moteurs thermiques m'a particulièrement intéressée. En effet, cela a contribué à étendre mes connaissances concernant les moteurs à combustion interne. Ce projet est finalement un apport intéressant pour la poursuite de mes études d'ingénieur et ma future carrière professionnelle.

Thibault Duranton :

Paul Chauvin :

Étant un grand passionné de voitures, motos, engins agricoles... en fait tous ce qui possède un moteur thermique, j'ai apprécié de travailler sur la thématique du moteur Scuderi. Selon moi la recherche d'améliorations aux moteurs 2 et 4 temps classiques est un axe très important car à ce jour peu de technique outre l'énergie thermique sont en capacité de subvenir aux besoins des industries et de la population.

A plus long terme, mon souhait serait de travailler dans cette branche en continuant ma formation dans le département « Energétique et Propulsion ». Ainsi ce projet m'a éclairci sur les nouveaux enjeux notamment l'écologie, la performance ou sur le rendement qu'un ingénieur doit prendre en considération dans son travail quotidien.

De plus, j'ai apprécié la manière par laquelle nous avons abordé l'étude du moteur Scuderi. La réalisation de notre programme m'a permis de mettre en application sur un sujet concret les compétences acquises en programmation et thermodynamique. A cela l'expérience du travail en groupe, très présente à l'INSA, sera également une plus-value dans notre futur métier.

Quentin Pautonnier :

J'avais choisi ce sujet de projet du fait que la mécanique et les moteurs m'intéressent énormément et que mes thématiques de second semestre sont Mécanique et Energétique et Propulsion. Ce projet nous a permis de réaliser un vrai travail de recherche et d'étude sur un moteur, comme ce qui pourrait nous être proposé dans notre future vie professionnelle. Il nous a aussi appris à travailler en groupe et personnellement il m'a aidé dans mon choix de département pour la troisième année. C'est donc une expérience très enrichissante d'un point de vue professionnel mais aussi d'un point de vue thermique et cinématique des moteurs. Ce projet permet aussi de mieux comprendre ce qu'est le travail d'équipe et l'importance qu'il a dans la vie professionnelle.

Vincent Guy :

Du fait d'une année quelque peu compliquée, ce projet ne m'a apporté que très peu de chose. En effet, il m'a été très difficile de m'intégrer et de m'impliquer dans ce groupe. Néanmoins, le sujet était intéressant et j'ai pu apprendre un autre type de fonctionnement d'un moteur thermique.

4.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet

Un prolongement de ce projet porterait sur une réalisation d'une maquette par exemple. La modélisation du moteur sous SolidWorks ; un logiciel de CAO serait également envisageable. En effet, nous avons tous réalisé au cours de ce semestre un projet sous SolidWorks qui consistait à modéliser une machine (pompe à palettes, pompe à eau, presse à imprimer...).

Nous disposerions donc des outils et des compétences pour réaliser ce modèle. De plus, nous pourrions réaliser une simulation de l'écoulement du fluide grâce à SolidWorks Flow Simulation dans des conditions réelles en fonction de paramètres comme la température extérieur ou la pression. Il serait intéressant également de comparer les résultats théoriques de notre projet avec ceux apportés par ce logiciel.

5. BIBLIOGRAPHIE

Lien internet :

http://www.masslive.com/business-news/index.ssf/2015/12/scuderi_engine_investors_want_answers_as.html (valide à la date du 05/06/16)

http://www.masslive.com/business-news/index.ssf/2015/03/scuderi_group_of_west_springfield_sued_b.html#incart_story_package (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.prnewswire.com/news-releases/scuderi-clean-energys-dual-output-power-generation-patent-reaches-completion-300256413.html> (valide à la date du 05/06/16)

<http://scudericleanenergy.com/> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.turbo.fr/actualite-automobile/436150-environnement-daimler-psa-interesse-moteur-scuderi/> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Automobile-et-carburants/Les-moteurs-conventionnels> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/automobile/la-commission-royal-liste-les-voitures-qui-ne-respectent-pas-les-normes-567914.html> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.turbo.fr/actualite-automobile/436150-environnement-daimler-psa-interesse-moteur-scuderi/> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.motorlegend.com/actualite-automobile/le-moteur-scuderi-avance/5531.html> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.challenges.fr/entreprise/industrie-automobile/20160522.CHA9511/normes-anti-pollution-apres-volkswagen-fiat-a-son-tour-soupconne-de-tricherie.html> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.sudouest.fr/2016/02/12/pollution-les-resultats-des-22-voitures-testees-apres-le-scandale-volkswagen-2272402-706.php> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.largus.fr/actualite-automobile/affaire-volkswagen-10-questions-pour-comprendre-le-dieseldate-6590389.html> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.sudouest.fr/2016/05/17/normes-antipollution-le-public-a-perdu-confiance-2364667-659.php> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.maxicours.com/se/fiche/6/6/276266.html> (valide à la date du 05/06/16)

http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/machine_%C3%A0_vapeur/100756 (valide à la date du 05/06/16)

<http://visite.artsetmetiers.free.fr/watt.html> (valide à la date du 05/06/16)

<http://tpe-fatih-quentin-marvin.webnode.fr/machine%C3%A0vapeur/> (valide à la date du 05/06/16)

<https://entrepreneurcleantech.wordpress.com/2013/01/30/histoire-dune-invention-la-machine-a-vapeur/> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.universalis.fr/encyclopedie/machine-a-vapeur/> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.museedumoteur.fr/le-musee/lhistoire-du-moteur> (valide à la date du 05/06/16)

<https://www.youtube.com/watch?v=E5Mq5DNh7s8> (valide à la date du 05/06/16)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_deux_temps (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.toutsurlamoto.com/le-moteur-2-temps.html> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.terre-net.fr/materiel-agricole/tracteur-quad/article/fonctionnement-du-moteur-thermique-207-100752.html> (valide à la date du 05/06/16)

<http://www.cap-motoculture.com/upload/ensavoirplus/moteur-thermique.pdf> (valide à la date du 05/06/16)

6. CREDITS D'ILLUSTRATIONS

Toutes les illustrations ont été réalisées par nos soins via SolidWorks, Excel, Word ou Publisher.

Figure 1: Cycle du moteur 2 temps.....	9
Figure 2: Schéma du moteur Scuderi	10
Figure 3: Cycle du moteur 5 temps.....	12
Figure 4: Cycle du moteur 4 temps.....	13
Figure 5: Cycle du moteur Scuderi	13
Figure 6 : Schéma de la modélisation du piston	14
Figure 7: Représentation graphique du piston	16
Figure 8 : Cordonnées des points pour un angle de vilebrequin donné	16
Figure 9 : Ensemble des variables fixes de l'étude	17
Figure 10 : Modélisation des volumes en fonction de l'angle du vilebrequin	18
Figure 11 : Chronographe gestion des soupapes	19
Figure 12 : Modélisation de la pression en fonction de l'angle θ_{vil}	27
Figure 13 : Schéma des forces de pression s'exerçant sur les parois.....	28
Figure 14 : Valeur du travail en fonction de l'angle	28
Figure 15 : Travail du moteur en fonction de l'angle des bielles	29
Figure 16 : Travail total du moteur Scuderi	29