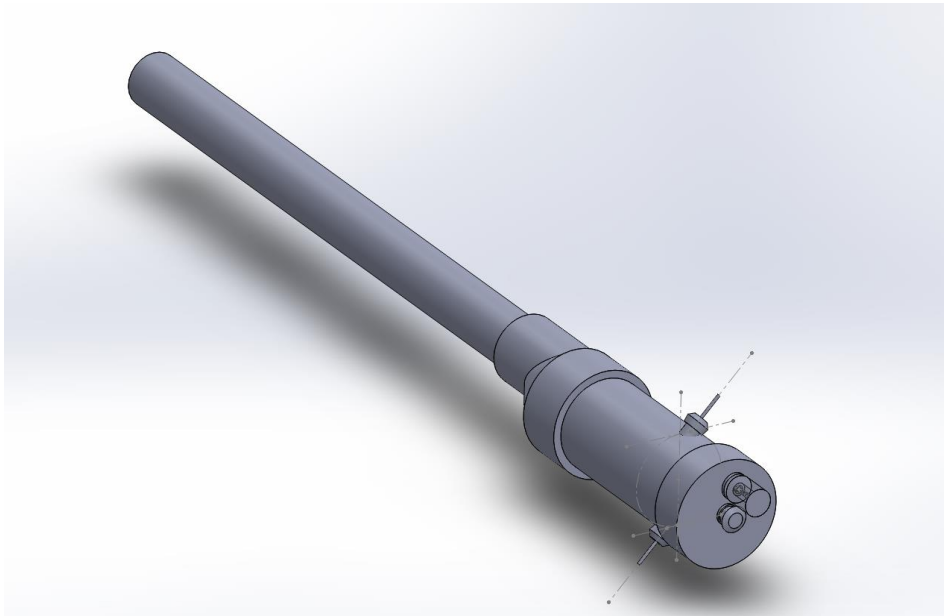


**PROPULSION AUTOMATISÉE DE LÉGUMES
PAR DÉFLAGRATION :
SIMULATION NUMÉRIQUE D'UNE
COMBUSTION À VOLUME CONSTANT**



Étudiants :

BUISSON Quentin

CANDRE Nathan

CHEVAILLER Juliana

LEDOUX Manon

MALBOIS Maxime

TENAILLE Léa

Enseignant-responsable du projet :

PETIT Sylvain

Date de remise du rapport : 15 Juin 2020

Référence du projet : STPI/P6/2020-019

Intitulé du projet : Propulsion automatisée de légumes par déflagration : simulation numérique d'une combustion à volume constant

Type de projet : Simulation puis étude bibliographique

Objectifs du projet :

Ce projet fait partie du macro-projet de propulsion automatisée de légumes par déflagration dont le but est de concevoir et de construire le lance-patate le plus efficace possible. Les objectifs spécifiques à notre projet sont :

- la détermination de la pression en fin de combustion dans la chambre de combustion
- la maximisation de la pression en fin de combustion en optimisant deux paramètres :
 - l'emplacement de la bougie d'allumage du mélange air-méthane
 - la géométrie du système d'injection du méthane

Mots-clefs du projet :

Combustion, Turbulence, Homogénéisation, Simulation

Table des matières

Table des matières.....	4
1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1 Calcul théorique de température de fin de combustion.....	7
3.2 Résumé du phénomène de turbulence	7
3.3 Simulation numérique des écoulements - la CFD.....	9
3.3.1 Présentation de la CFD et de nos objectifs de départ	9
3.3.2 Introduction à la CFD : exemple d'une injection coudée	10
3.4 Optimisation du mélange méthane/air.....	12
3.4.1 Pourquoi homogénéiser un mélange, lien avec la turbulence	12
3.4.2 Etude bibliographique de l'impact de la turbulence sur une combustion	12
3.4.3 Etude bibliographique de l'optimisation des mélanges méthane-air	14
3.4.4 Conclusion des études bibliographiques et solution technique choisie pour homogénéiser les gaz dans notre système.....	17
3.5. Positionnement de la bougie dans la chambre de combustion	18
3.5.1 Phénomène de flamme tulipe	18
3.5.1.1 Phénomène de la flamme tulipe dans une chambre fermée.....	19
3.5.1.2 Résumé de notre étude sur la propagation d'une flamme dans une chambre fermée avec une bougie à l'extrémité	20
3.5.2 Phénomène d'explosion secondaire	21
3.5.3 Hypothèses sur la position de la bougie	23
3.5.3.1 Position de la bougie sur un côté de la chambre	25
3.5.3.2 Position de la bougie à l'extrémité de la chambre	25
4. Conclusions et perspectives	27
5. Bibliographie.....	28
6. Annexes	30
6.1 Documentation technique	30

1. Introduction

Le projet « propulsion automatisée de légumes par déflagration » est un macro-projet constitué de quatre groupes d'étudiants dont le but est de construire un Patator. C'est-à-dire un engin capable de propulser une pomme de terre le plus vite possible, loin et avec une précision relativement élevée, le but étant de pouvoir tirer dans une cible à plusieurs dizaines de mètres.

Le premier de ces quatre groupes est chargé du design et du dimensionnement mécanique du patator. Ce groupe doit ainsi trouver la meilleure forme et choisir les meilleurs matériaux possibles, pour que le patator soit relativement facile à concevoir et qu'il tire de manière précise et en toute sécurité. Pour aider ce groupe à faire les bons choix, sachant que le patator consiste à propulser un tubercule grâce à la déflagration d'un mélange de méthane et d'air, un deuxième groupe est chargé des calculs théoriques liés au phénomène de déflagration qui règne au sein de la chambre de combustion du patator et des pertes de charges qui ont lieu dans la ligne d'injection du combustible. Dans cette même optique, notre groupe doit grâce à l'outil numérique, proposer la façon d'injecter le combustible de la manière la plus homogène possible et, également trouver le meilleur emplacement pour la bougie d'allumage afin de maximiser l'énergie issue de la déflagration. Enfin le dernier groupe, afin d'assurer le plus de sécurité possible, s'occupe de commander à distance l'injection du combustible et l'allumage de la bougie à l'aide d'une carte électronique et de la création d'une application sur smartphone.

Le travail des groupes réunit à la fin du projet aurait permis de créer un Patator en connaissant l'entièreté du fonctionnement du système.

Au début de l'année, pour répondre au problème de l'optimisation de l'injection et du placement de la bougie d'allumage, nous devons dans un premier temps réussir à simuler numériquement l'injection du méthane dans la chambre de combustion. Puis dans un second temps, notre travail était de simuler la combustion à volume constant.

Cependant, à cause à la crise causée par la pandémie du COVID-19, il nous a été impossible de continuer sur cette ligne de travail à cause du manque de ressources numériques à domicile (logiciel payant disponible uniquement à l'INSA). En conséquence, nous avons gardé les mêmes problématiques de départ, mais nous avons changé les moyens pour y répondre, en se basant plutôt sur une étude bibliographique. Ainsi nous avons cherché des articles scientifiques (totalement théoriques ou basés sur des expériences) sur l'homogénéisation d'un mélange air/méthane dans la chambre de combustion lors de l'injection du méthane. Une bonne homogénéisation permet d'optimiser la combustion et donc la propulsion de la pomme de terre. Cela nous a menés notamment vers l'étude d'un phénomène bien connu en mécanique des fluides : la turbulence.

Enfin nous avons mené une étude bibliographique sur l'emplacement de la bougie et sur les phénomènes qui se produisent dans la chambre à combustion du patator lors d'une combustion de méthane et d'air. En effet, il est possible de placer la bougie qui produit l'étincelle attendue sur deux emplacements différents, ce qui va avantager plus ou moins la propulsion de la pomme de terre hors du patator. Un des phénomènes étudiés, la "flamme tulipe", va entraîner plusieurs étapes durant lesquelles la vitesse des gaz et la pression dans la chambre vont changer.

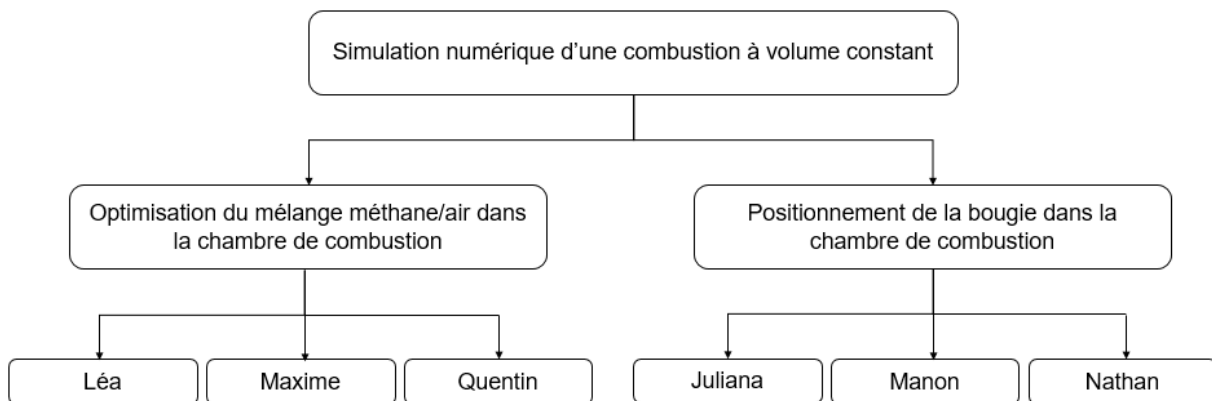
2. Méthodologie / Organisation du travail

Le Projet de P6 étant un projet qui nécessite un travail de groupe, nous avons commencé la simulation numérique de la déflagration sur ordinateur ensemble. Pour comprendre la suite de logiciel ANSYS Fluent et ses sous programmes, nous avons étudié le mode d'emploi du logiciel et suivi un TD du département Energétique et Propulsion pour se familiariser avec les manipulations clés pour le projet.

Suite à quoi nous avons dû arrêter la simulation numérique et passer à l'étude bibliographique. Pour cette partie du projet nous avons décidé de nous séparer en deux groupes de trois étudiants pour améliorer nos résultats et exécuter plus de recherches. Pour cela, nous avons décidé de former un groupe s'occupant de l'optimisation du mélange méthane-air dans la chambre et un autre traitant le placement de la bougie ainsi que le phénomène de la "flamme tulipe" dans la chambre de combustion.

Chacun des groupes cherchait des articles et des explications pour les phénomènes étudiés respectivement. Toutes les semaines nous nous rassemblions en visioconférence pour faire un point et voir comment évoluaient les recherches de chaque groupe afin de rassembler les informations. Au milieu du projet nous avons aussi fait une réunion avec les trois autres groupes du macro-projet pour obtenir les informations nécessaires pour chacun. Ainsi chaque groupe a pu avoir les données manquantes et voir comment se déroulaient les avancées du macro-projet. Grâce à cette organisation nous avons pu chacun de notre lieu de confinement avancer sur le projet et en venir à bout pour conceptualiser le patator.

Voici l'organigramme des tâches et des étudiants concernés :



3. Travail réalisé et résultats

3.1 Calcul théorique de température de fin de combustion

Avant de commencer les différents tutoriels permettant d'utiliser les logiciels de CFD (Fluent, ICEM), nous avons débuté le projet par un travail de calcul théorique pour mieux appréhender celui-ci. Le but de ce travail était de calculer la température théorique de fin de combustion d'un mélange air-méthane aux proportions stœchiométriques. A partir d'un diagramme (U,T) de combustion, on a calculé à l'aide d'un abaque le dégagement de chaleur issu de la combustion puis, en utilisant le premier principe de la thermodynamique, on a trouvé avec un tableur la température de fin de combustion. Après résolution numérique on trouve que la température en fin de combustion est de l'ordre de 2700 K. Ce calcul a servi de base de recherche au groupe "Déflagration : Calculs théoriques et optimisation de l'injection". C'est donc lui qui l'a le plus développé et utilisé dans ses travaux.

3.2 Résumé du phénomène de turbulence

Commençons par donner quelques exemples. L'écoulement de l'eau d'un fleuve est le siège de multiples tourbillons. L'huile qui s'écoule hors d'une bouteille ne tourbillonne pas. La façon dont s'écoule d'un liquide peut être connue grâce à une quantité qui est appelée nombre de Reynolds.

Les différents types d'écoulement

- L'écoulement turbulent : c'est quand l'écoulement d'un liquide, d'un fluide ou d'un gaz est le siège de multiples tourbillons (dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment). Cet écoulement est donc désordonné et est ainsi difficilement prévisible. C'est un régime dominé par l'inertie du fluide (c'est le terme en $\bar{v}grad\bar{v}$ dans les équations de Navier-Stokes).
- L'écoulement laminaire : c'est, au contraire, si l'écoulement semble se faire de manière bien parallèle et dans la même direction à toute échelle. C'est la dissipation visqueuse qui domine, estompant ainsi les tourbillons (c'est le terme en $\nu\Delta\bar{v}$ dans les équations de Navier-Stokes) (Écoulement laminaire, 2020)

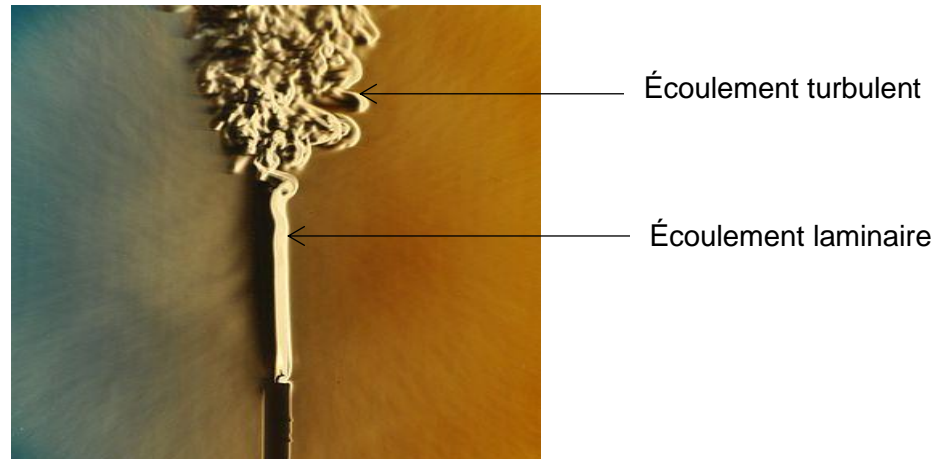


Figure 1 : La fumée d'une bougie, laminaire en bas, turbulente en haut. (Écoulement laminaire, 2020)

- L'écoulement transitoire : c'est un troisième type d'écoulement. C'est le mécanisme par lequel un écoulement passe d'un état laminaire à un état turbulent. Il dépend de plusieurs paramètres comme l'état de surface par exemple.

Les écoulements turbulents se repèrent particulièrement au voisinage d'obstacles. (Allée de tourbillons de Karman, 2020)

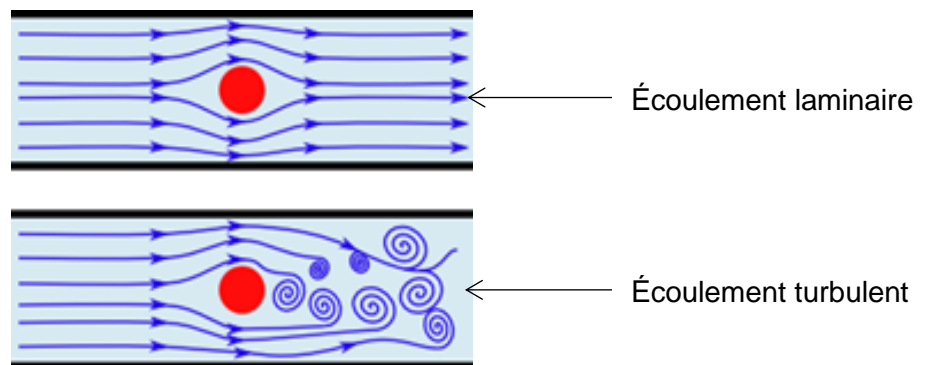


Figure 2 : Un écoulement au voisinage d'un obstacle (en rouge) (Louapre, 2011)

Ce qui fait la différence, c'est que dans un écoulement turbulent, les petites perturbations donnent naissance à des tourbillons. Au contraire dans un écoulement laminaire, les perturbations se résorbent rapidement et l'écoulement reprend son cours tranquille.

Une propriété classiquement mise en avant d'un écoulement turbulent réside dans un processus appelé cascade turbulente (ou cascade de Kolmogorov) : la division des grands tourbillons en tourbillons plus petits permet un transfert d'énergie des grandes échelles vers les petites échelles données par la dimension de Kolmogorov, qui est la plus petite échelle. Ce mécanisme diffuse l'énergie par l'intermédiaire de la quantité de mouvement et la dissipe sous forme de chaleur par frottement grâce à la viscosité, ce qui nous amène au prochain point. (Dimension de Kolmogorov, 2020)

La viscosité

La viscosité du fluide va freiner les perturbations et empêcher les tourbillons d'apparaître. Pour savoir si la viscosité est assez forte pour freiner les tourbillons, il faut la comparer à l'inertie de l'écoulement. La viscosité tend à faire disparaître les tourbillons, alors que l'inertie les propage. Pour calculer le rapport entre les forces d'inertie et la viscosité dans le fluide, on utilise le nombre de Reynolds de l'écoulement (Nombre de Reynolds, 2020) :

$$Re = \frac{\rho L \bar{v}}{\mu}$$

- \bar{v} , vitesse caractéristique du fluide (m s^{-1}), (une vitesse moyenne)
- μ , viscosité dynamique du fluide (Pa s ou $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) ou poiseuille P1, $\mu = \frac{mN\bar{v}lpm}{3}$ pour un gaz. Où N est la densité de particule du gaz, \bar{v} la vitesse moyenne des particules du gaz, et lpm le libre parcours moyen, c'est à dire la distance moyenne parcourus par une particule avant d'en collisionner une autre. Généralement, on la mesure.
- L, dimension caractéristique (m)
- ρ , masse volumique du fluide (kg m^{-3})

Ce nombre, sans dimension, va permettre de détecter l'apparition de la turbulence : plus il est élevé, plus l'inertie est importante et la viscosité faible, et plus les tourbillons pourront se développer.

Bien que le nombre de Reynolds puisse varier fortement d'un écoulement à l'autre, la frontière entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent est assez saccadée. On estime que l'écoulement devient turbulent pour un nombre de Reynolds supérieur à 2040. Ce nombre de Reynolds critique correspond au moment où les forces d'inerties prédominent sur les forces visqueuses, autrement dit l'énergie des tourbillons n'est plus dissipée par les forces visqueuses.

La turbulence se quantifie aussi par l'écart type des vitesses mesurées en un point de l'écoulement.

3.3 Simulation numérique des écoulements - la CFD

3.3.1 Présentation de la CFD et de nos objectifs de départ

Notre projet devait être dirigé selon deux principaux axes :

- Premièrement, simuler numériquement l'injection du méthane dans la chambre de combustion. Cette simulation 3D nous aurait permis de vérifier la bonne qualité, homogénéité, du mélange entre le méthane injecté et l'air présent dans la chambre de combustion, en modélisant notamment les phénomènes de turbulences, phénomènes que nous avons finalement étudiés avec une approche plus bibliographique (voir partie 3.3).

- Deuxièmement, simuler la combustion (à volume constant) pour connaître l'évolution des différents paramètres tels que la pression, la température, la densité des différents gaz... dans l'espace et dans le temps. Et ainsi prévoir au mieux les différentes contraintes qui vont agir sur les parois de notre patator et sur la pomme de terre. Ce qui permet alors un dimensionnement mécanique optimal du patator, et, en réalisant plusieurs simulations, trouver la meilleure position de la bougie d'allumage.

Nous devons faire ces simulations à l'aide du logiciel Fluent et en suivant les grandes étapes de la CFD (Computational Fluid Dynamics) présentées en **annexe 1**.

Fluent est un logiciel de CFD qui met en œuvre la méthode des volumes finis, c'est à dire découper le volume fluide en petits volumes et faire des bilans des flux sur chaque petit volume de contrôle. Fluent est un code RANS, c'est à dire Reynolds Averaged Navier Stokes. Ce logiciel permet donc de modéliser toute la turbulence, en moyennant spatialement et temporellement les équations de Navier Stokes (c'est-à-dire les équations de la mécanique des fluides, voir **annexe 5**). Cela permet de modéliser la turbulence, par un modèle empirique qui coûte moins cher en calcul que d'autres méthodes comme la LES (Large Eddy Simulation) et la DNS (Direct Numerical Simulation) qui sont plus précises. (En **annexe 2** se trouve une liste des différents types d'approche pour modéliser la turbulence et des différents modèles RANS.)

La DNS est la méthode la plus précise en représentant toutes les échelles de la turbulence mais est extrêmement coûteuse en temps et en ressources (besoin de milliards de mailles).

La LES, plus utilisée dans la recherche et l'industrie, demande un peu moins de mailles (de l'ordre de la centaine de millions de mailles, soit environ 0.2 mm de côté pour chaque maille, voir **annexe 3**) et est donc moins coûteuse.

3.3.2 Introduction à la CFD : exemple d'une injection coudée

Avant de réaliser nos modélisations numériques que nous devons appliquer au patator, nous avons commencé par réaliser un tutoriel d'utilisation de Fluent. Ce tutoriel est proposé dans l'EC Maillage dans le département Energétique et Propulsion. Le tutoriel concerne une injection coudée.

Premièrement nous avons importé la CAO (Conception Assisté par Ordinateur) déjà faite de l'injection coudée, dans ICEM. Ce sous-programme de Fluent nous a permis ensuite de mailler notre volume, c'est-à-dire de discrétiser spatialement le coude par des éléments proportionnés finis et bien définis (souvent des tétraèdres, prismes ou hexaèdres). Ce sous-programme permet aussi de réaliser la CAO, notamment pour des géométries simples, et nous aurions donc pu l'utiliser pour dessiner notre chambre de combustion (sans avoir à passer par d'autres programmes comme Solidworks).

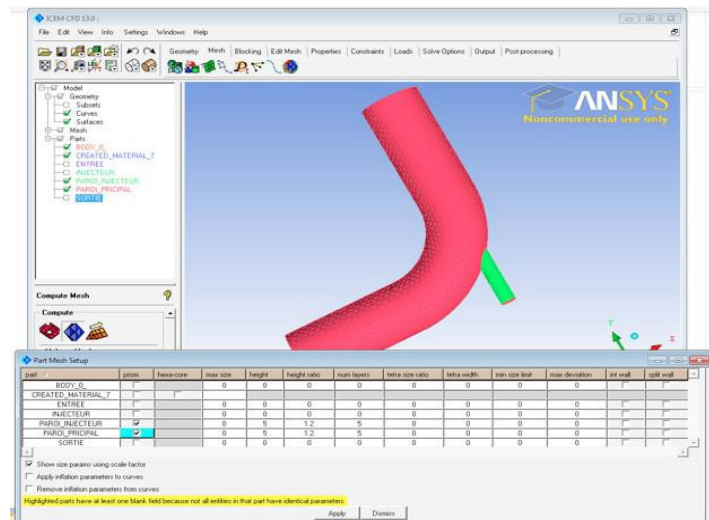


Figure 3 : Image du tutoriel lors du maillage sous ICEM (Tutoriel proposé dans l'EC Maillage dans le département Energie et Propulsion de l'INSA De Rouen)

Nous avons ensuite sous Fluent, spécifié le type de gaz en circulation, ici de l'air, les conditions aux limites comme la température et le diamètre d'entrée, l'intensité turbulente. Puis nous avons choisi le modèle standard k-ε. C'est le modèle le plus couramment utilisé dans la CFD pour simuler les caractéristiques d'écoulement moyen dans des conditions d'écoulement turbulent. Il s'agit d'un modèle à deux équations qui donne une description générale de la turbulence au moyen de deux équations de transport (EDP), une pour l'énergie cinétique turbulente (k) et l'autre pour la dissipation (epsilon). La dissipation turbulente est la vitesse à laquelle les fluctuations de vitesse se dissipent. Les coefficients sont dérivés empiriquement, valable uniquement pour les débits turbulents. (Modèles de turbulence, s.d.)

Enfin nous avons lancé les calculs avec 1 million d'itérations, mais nous n'avons pas eu le temps de voir les résultats avant le confinement.

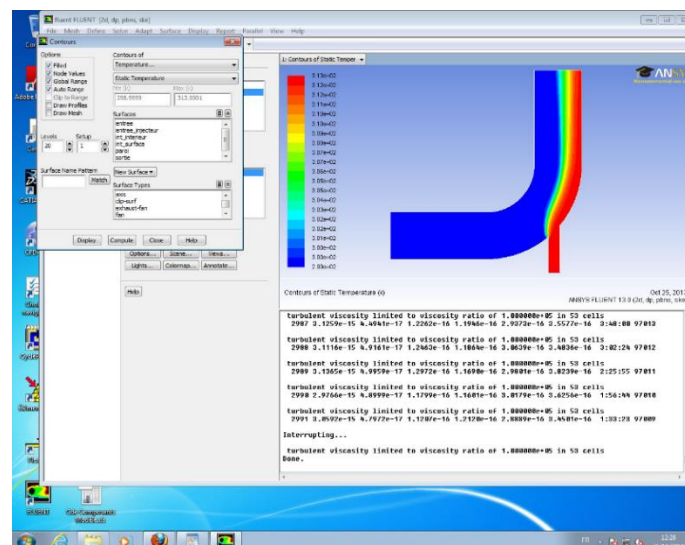


Figure 4 : Voici le résultat que nous aurions pu obtenir après calcul, on voit ici la répartition de la température le long de l'injection coudée. (Tutoriel proposé dans l'EC Maillage dans le département Energie et Propulsion de l'INSA De Rouen)

3.4 Optimisation du mélange méthane/air

3.4.1 Pourquoi homogénéiser un mélange, lien avec la turbulence

Pour que la combustion, ou une réaction chimique en générale, se fasse le plus rapidement possible et de manière la plus complète, il est important que les molécules des réactifs soit réparties le plus uniformément possible dans l'espace afin d'augmenter leur probabilité de mise en contact. En effet des zones où il y aurait trop de comburant par rapport au carburant, pourraient stopper la réaction de combustion dans notre Patator. Cette homogénéisation du milieu réactionnel se fait naturellement grâce au phénomène de diffusion moléculaire ou encore appelé diffusion chimique. Ce phénomène est un phénomène de transport irréversible qui tend à rendre uniforme le potentiel chimique de chacune des espèces chimiques d'un système. La diffusion se fait des régions de plus forte concentration vers les régions de concentration moindre. (Diffusion de la matière, 2020)

Cependant la turbulence a une capacité à diffuser spatialement toutes les grandeurs attachées à un fluide avec une efficacité très largement supérieure à celle de la diffusion moléculaire.

Les interactions des gros tourbillons, responsables des flux et de la production d'énergie cinétique du mouvement turbulent, ont pour effet un transfert de l'énergie cinétique produite vers des échelles de plus en plus petites pour lesquelles le comportement local de la turbulence devient progressivement homogène. Le processus n'est limité que par la viscosité, lorsqu'il atteint l'échelle de Kolmogorov, une échelle suffisamment petite pour que le flux d'énergie transféré soit dissipé en chaleur sous l'effet de celle-ci. L'expérience et l'analyse des différentes constantes de temps montrent que la turbulence a tendance à être en « équilibre interne », c'est-à-dire que les taux de production, de transfert, et de dissipation sont, au moins en moyenne, approximativement égaux. Ceci a des conséquences fondamentales pour des écoulements turbulents dont le nombre de Reynolds est grand, c'est-à-dire plus de 2040. La turbulence accroît la dissipation de l'énergie cinétique en chaleur. Cependant, cette dissipation ne dépend pas de la viscosité. Cet accroissement explique le recours au mélange turbulent qui s'impose chaque fois que l'on désire uniformiser la composition d'un mélange fluide. Si la diffusion moléculaire est très lente, le brassage par la turbulence a déjà pour effet une dispersion des hétérogénéités initiales vers des échelles de plus en plus petites, avec un accroissement corrélatif de la surface de contact entre les composants. Autrement dit, la turbulence permet un mélange nettement plus rapide des gaz. (Coantic, 1987)

3.4.2 Etude bibliographique de l'impact de la turbulence sur une combustion

L'article de Chunhua Bai expérimente les effets de la turbulence sur la combustion méthane-air suite à une injection turbulente du combustible. Les expériences menées comparent la combustion dans un mélange méthane-air au repos à celle d'un même mélange dans des conditions turbulentes créé par injection de diazote. Elles sont réalisées dans une

chambre de combustion sphérique de 20L. Les résultats chiffrés présentent donc des tendances mais ne pourront pas être repris tel quel dans notre projet. On peut en tirer plusieurs conséquences.

Premièrement, on constate que les conditions stœchiométriques dans lesquelles nous allons faire fonctionner notre système sont les conditions optimales (c'est-à-dire là où les valeurs sont les plus grandes) en termes de pression maximale et de taux d'accroissement de la pression lors de la combustion. Bai constate également que le temps d'injection du gaz qui crée les turbulences a un impact très limité sur la pression maximale à ces conditions.

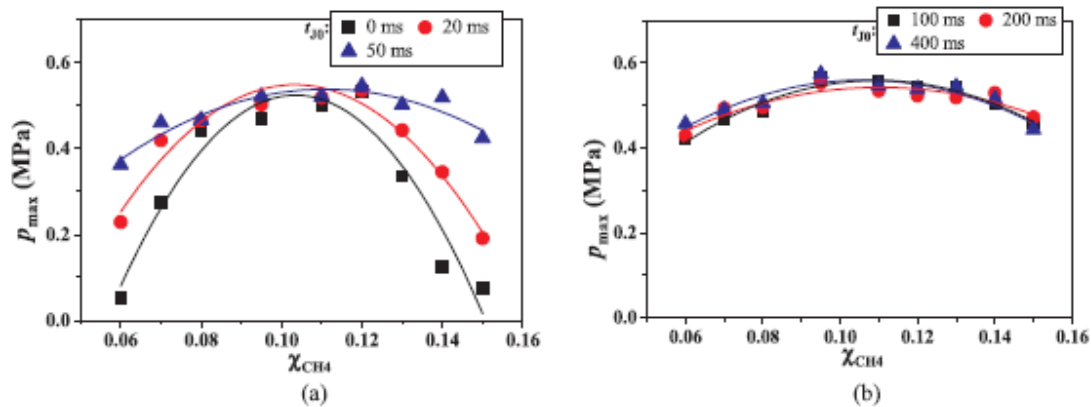


Figure 5 : Pression maximale en fonction de la fraction molaire de méthane avec un temps d'injection de diazote entre 0 et 400 ms. Les conditions stœchiométriques sont $\chi_{CH_4} = 0.095$ (Chunhua Baia, 2020)

Cependant, on remarque que l'augmentation du temps d'injection est corrélée avec l'augmentation du taux d'accroissement de la pression pendant la combustion. On préférera donc un temps d'injection de gaz supérieur à 100 ms et ainsi bénéficier d'une augmentation rapide de la pression lors de la combustion. Cela permettra à la patate de ne pas être éjectée avant d'atteindre la pression maximale de combustion.

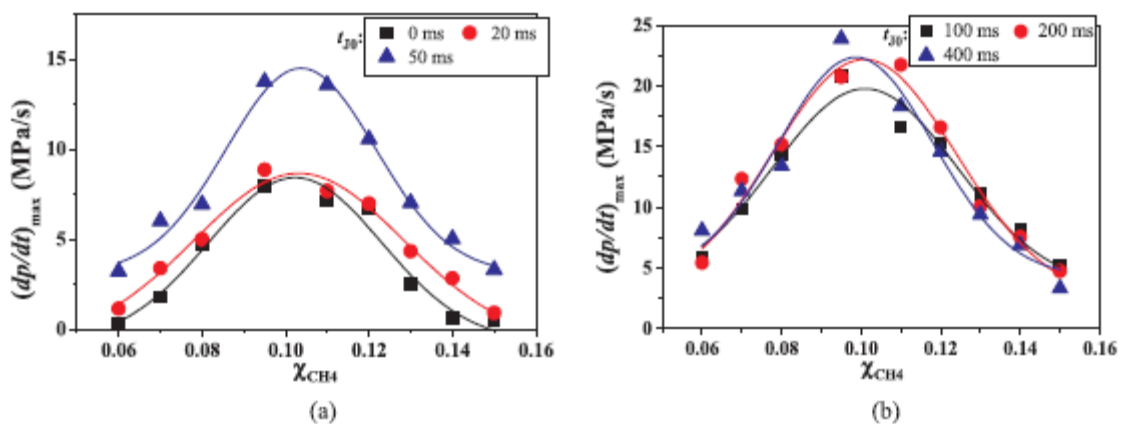


Figure 6 : Taux d'accroissement maximal de la pression en fonction de la fraction molaire de méthane avec un temps d'injection de diazote entre 0 et 400 ms. (Chunhua Baia, 2020)

Deuxièmement, la comparaison entre les cas au repos et turbulent permet de voir que les turbulences ont pour effet d'augmenter la pression maximale de combustion du mélange. L'effet des turbulences est néanmoins plus important aux conditions limites d'inflammabilité qu'aux conditions stœchiométriques.

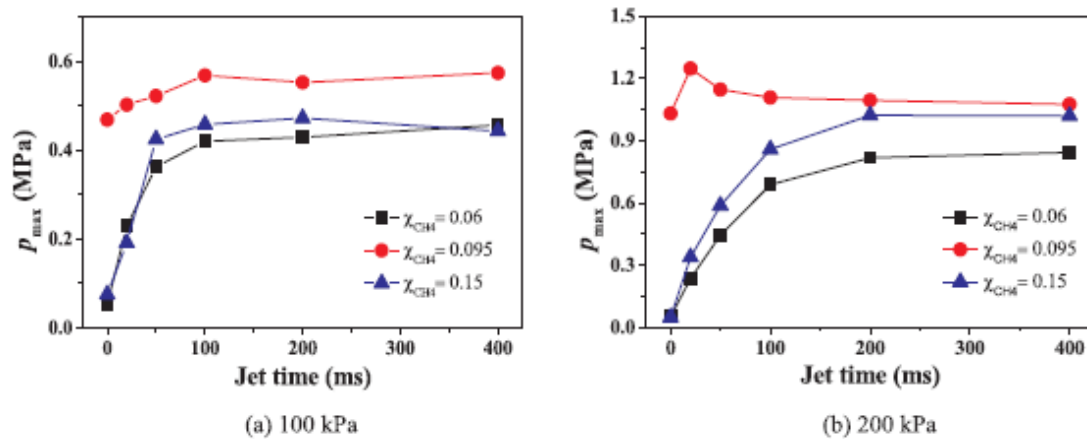


Figure 7 : Pression maximale en fonction du temps d'injection de diazote pour trois fractions molaires de méthane différentes. Les conditions stœchiométriques sont $\chi_{CH_4} = 0.095$. (Chunhua Baia, 2020)

Les limites d'explosivité ou limite d'inflammabilité d'un gaz combustible sont les concentrations limites du gaz qui permettent que celui-ci s'enflamme et éventuellement explose. Sous la limite inférieure le mélange est trop pauvre en combustible pour amorcer une réaction tandis qu'au-dessus de la limite supérieure c'est le comburant qui manque. (Chunhua Baia, 2020)

Enfin, on voit que le délai entre l'injection et l'allumage a un effet non négligeable aux conditions stœchiométriques. La réduction de ce délai permet d'augmenter le taux d'accroissement de la pression alors que la pression maximale de combustion est la plus importante pour un délai de 500 ms.

3.4.3 Etude bibliographique de l'optimisation des mélanges méthane-air

Les deux articles sur lesquels est basée cette étude bibliographique sont ceux de Jie Liu et de Murat Koksal.

L'article de Jie Liu vise à augmenter les performances d'un moteur hybride diesel-gaz naturel en optimisant l'injection de gaz naturel et en testant différentes configurations de combustion. Les expériences y sont réalisées dans un moteur 6-cylindres en ligne dont 5 cylindres ont été désactivés. Les expériences mettent en jeu des paramètres comme le taux de recyclage des gaz d'échappement, le taux de compression, la géométrie de l'injection de

gazole et la géométrie de l'injection de gaz naturel (par exemple on regarde l'angle azimut formé par l'injection diesel et de gaz naturel). D'après la figure 8, le cas dans lequel on maximise la pression dans le cylindre est celui où on injecte le gaz naturel dans la chambre avec un azimut de $-2,57^\circ$. (cf. table 6) Remarquons que malgré le fait que la pression dans la chambre soit fonction d'autres paramètres, la comparaison avec le cas 2 dans lequel l'azimut est le principal paramètre modifié permet de conclure que cet angle a une influence significative sur la pression de combustion. On voit donc que l'angle d'injection a un rôle important sur la pression en fin de combustion.

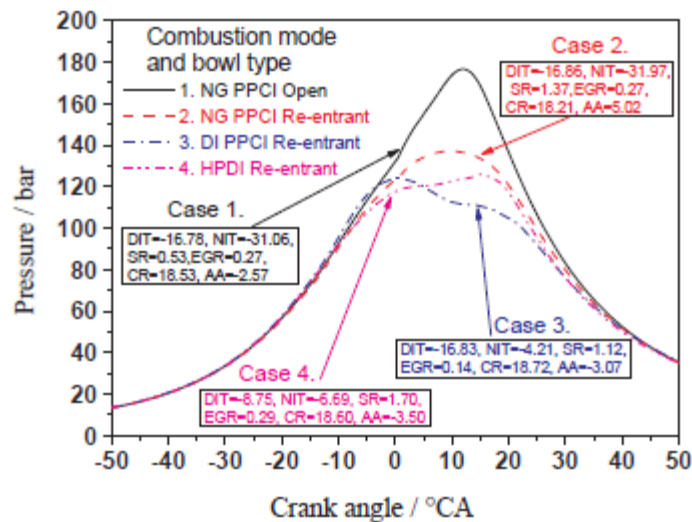


Figure 8 : Pression dans la chambre en fonction de l'angle formé par le vilebrequin par rapport à la verticale pour chaque cas de la table 6 (Jie Liu, 2019)

The optimized parameters of the four selected cases.

Case number	R2-R1	Diesel injection timing		Diesel Spray angle		NG injection timing		NG Spray angle		Azimuth angle	Compression ratio	Swirl ratio	EGR ratio
		DIT	°CA ATDC	DSA	°	NIT	°CA ATDC	NSA	°				
1	0.13	-16.78		67.82		-31.06		79.38		-2.57	18.53	0.53	0.27
2	-0.29	-16.86		69.32		-31.97		71.33		5.02	18.21	1.37	0.27
3	-0.86	-16.83		57.71		-4.21		78.88		-3.07	18.72	1.12	0.14
4	-0.09	-8.75		67.85		-6.69		78.88		-3.50	18.60	1.70	0.29

Table 6 : Différents modes de combustion utilisés (Jie Liu, 2019)

Plus généralement, cet article montre que la forme des injecteurs est un domaine de recherche très actif. D'autant plus que lorsque le carburant est liquide (essence, gazole, kérosène, etc...), la physique est nettement plus complexe. L'enjeu principal de l'injection est alors de réussir à atomiser le liquide (c'est-à-dire à former un brouillard de fines gouttelettes de carburant liquide), puis à vaporiser ce brouillard. On peut citer par exemple des inventions comme les injecteurs "swirl" (tourbillon en français). Dans l'article on voit également apparaître la notion de "swirl ratio".

Le swirl est une rotation du spray d'axe parallèle à celui du piston. Il est créé par la forme interne de l'injecteur.

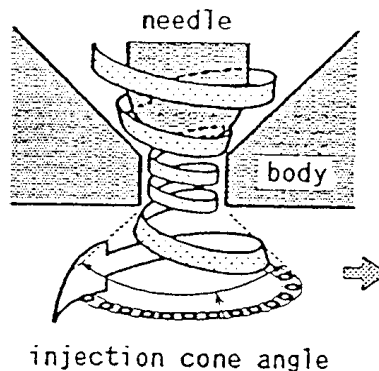


Figure 9 : Génération du mouvement de swirl (Injection directe d'essence)

L'article de Murat Koksai regarde l'influence de la géométrie d'une injection secondaire d'air sur le mélange des gaz dans un lit fluidisé (c'est-à-dire dans un mélange de solides et de fluides). Les expériences de l'article sont réalisées dans une chambre cylindrique de 7,6 m de haut et 23 cm de diamètre avec une injection d'air dans la partie basse de la chambre. Les types d'injection testés sont représentés sur la figure 10. On a une injection radiale (face à l'axe de la chambre), une injection tangentielle (tangente au rayon de la chambre) et une injection mixte (décalée d'un angle de 45° par rapport à la tangente du cylindre). Tous ces dispositifs sont dotés de deux points d'injection symétriques par rapport au centre de la chambre. On compare les dispositifs du point de vue de la répartition homogène de l'air dans le lit fluidisé. La figure en **annexe 7** montre la densité de gaz en suspension dans le lit fluidisé en fonction de la hauteur dans le réacteur pour les 3 configurations d'injections. Elle montre que l'injection radiale et l'injection mixte permettent d'avoir les densités de gaz en suspension les plus homogènes (c'est-à-dire les plus constantes en fonction de la hauteur dans la chambre) pour des quantités d'air secondaire injectées différentes.

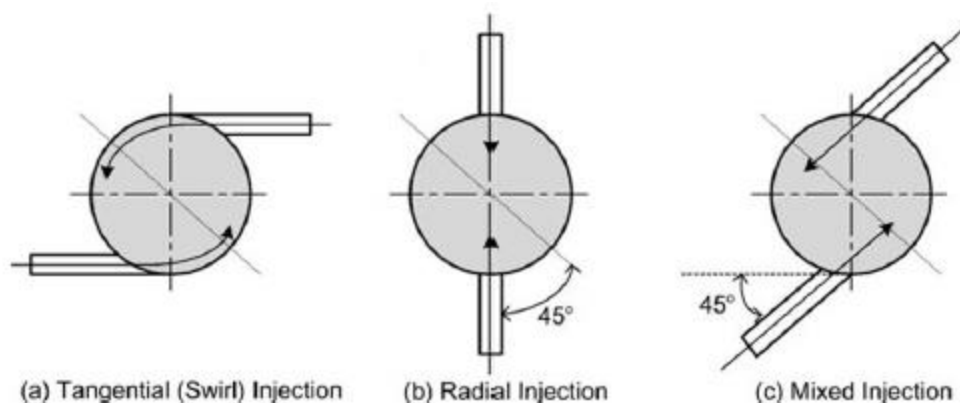


Figure 10 : Systèmes d'injection comparés (M. Koksai, 2004)

On remarquera que l'injection radiale disperse moins d'air sous l'injecteur que l'injection mixte ce qui permet une meilleure répartition du gaz en fonction de la hauteur. On s'intéresse maintenant à la figure 11. Elle compare la répartition de la concentration en air secondaire du mélange en fonction du rayon par rapport au centre du cylindre. On constate que l'injection tangentielle enrichit fortement le mélange en air secondaire près des parois du cylindre tandis que l'injection radiale cause une concentration élevée au centre du cylindre et qui diminue vite en se rapprochant des parois. L'injection mixte permet d'avoir une concentration en air secondaire plus homogène dans toute la section du tube.

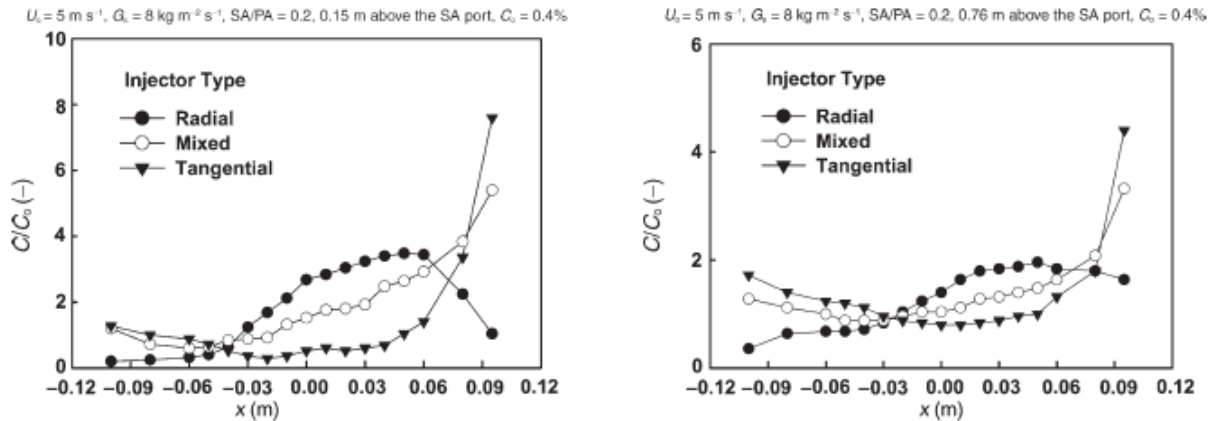


Figure 11 : Concentration du mélange en air secondaire en fonction du rayon par rapport au centre du cylindre (M. Koksai, 2004)

3.4.4 Conclusion des études bibliographiques et solution technique choisie pour homogénéiser les gaz dans notre système

A partir des deux études bibliographiques (3.3.3 et 3.3.4) ci-dessus, de la synthèse sur la turbulence, on peut déterminer une solution technique pour l'injection.

Premièrement nous avons vu qu'une injection turbulente du combustible était bénéfique pour homogénéiser au mieux le combustible et le comburant et ainsi optimiser au mieux la combustion et obtenir la plus grande pression possible à la fin de celle-ci. Pour générer de la turbulence nous avons vu que le nombre de Reynolds doit être grand. On peut alors essayer d'augmenter le plus possible la vitesse d'injection du méthane en choisissant un tuyau d'injection de faible diamètre, on pourra prendre un diamètre de 4mm. Il ne faut pas non plus diminuer de trop ce diamètre, sinon on ferait diminuer la grandeur caractéristique L du nombre de Reynolds et donc on diminuerait la turbulence. Etant donné la faible quantité de méthane à injecter (0.185 g pour avoir les conditions stœchiométriques) et la pression d'injection relativement élevée de l'ordre de 2 bar, le temps d'injection sera de l'ordre des millisecondes. Cependant nous avons vu avec l'article de Bai (3.3.3) que des faibles temps d'injection de gaz inerte (avec une bonbonne de diazote rempli à 5 bar) entre 200 ms et 400 ms suffisaient à créer de la turbulence dans un réservoir de 20L et que ces temps d'injection permettait d'avoir le plus grand taux d'accroissement de pression lors de la combustion. De même on a vu dans l'article de Bai qu'il ne fallait pas trop attendre entre l'injection et l'allumage

de la bougie si on veut avoir ce taux d'accroissement de pression le plus élevé possible lors de la combustion. En effet, comme dit précédemment cela permettra à la patate de ne pas être éjectée du patator avant d'atteindre la pression maximale de combustion.

Par ailleurs, il semble naturel qu'un délai trop important entre l'injection et l'allumage soit négatif, en effet dans l'article de Bai, les conditions sans turbulence sont créées simplement en attendant 10 minutes entre l'injection et l'allumage. Un délai trop grand entre injection et allumage nuit à l'homogénéisation des gaz avec notamment l'apparition éventuelle de phénomène de flottabilité, les gaz les moins denses vont en haut de la chambre par exemple.

Deuxièmement nous avons vu que les conditions stœchiométriques sont les meilleures pour avoir la plus grande pression possible en fin de combustion.

Enfin pour la forme de l'injection on peut reprendre l'injection du type "mixte" de l'article de Murat Koksai : à savoir deux tuyaux d'injection qui se font face et qui arrivent de part et d'autre de la chambre de combustion avec un angle de 45 degrés par rapport à la tangente du cercle de base du cylindre.

3.5. Positionnement de la bougie dans la chambre de combustion

Dans cette partie, il s'agira de déterminer quelle serait la place optimale de la bougie sur notre patator afin de projeter la pomme de terre le plus efficacement possible en utilisant au maximum l'énergie de combustion produite. Cela revient à étudier dans un premier temps les phénomènes pouvant apparaître lors de l'allumage et la propagation de la flamme dans la chambre. Puis dans un second temps, étudier les différentes positions et choisir celle qui aura le plus d'avantages pour notre patator.

3.5.1 Phénomène de flamme tulipe

Dans le cadre de notre projet, nous nous sommes intéressés à un phénomène peu connu que l'on nomme "Flamme tulipe" reconnu par Ellis et Wheeler (Henneton, 2007) et qui a une importance fondamentale pour notre étude. En effet, nous devons être capables de décrire les différents aspects et changements de la forme d'une flamme afin de choisir au mieux la position de la bougie sur la chambre de combustion.

3.5.1.1 Phénomène de la flamme tulipe dans une chambre fermée

Dans une chambre fermée, lorsqu'on procède à l'allumage pour brûler les gaz que l'on a introduit, la flamme grossit au fur et à mesure du temps dans la chambre cylindrique (géométrie élue pour notre patator) en formant un front sphérique. Cependant, lorsque la flamme touche les côtés latéraux de la chambre, un phénomène apparaît. En effet, la flamme se prolonge le long des parois et, de ce fait, une structure cellulaire se forme. Ensuite, lorsque les parties de la flamme proches des parois latérales ont brûlé les gaz frais, la flamme s'aplatit et devient convexe vers les gaz non brûlés (gaz frais) (CHEN). C'est cette forme convexe que l'on appelle « tulipe » et qui reste jusqu'à la fin de la propagation. (Voir **annexe 4**)

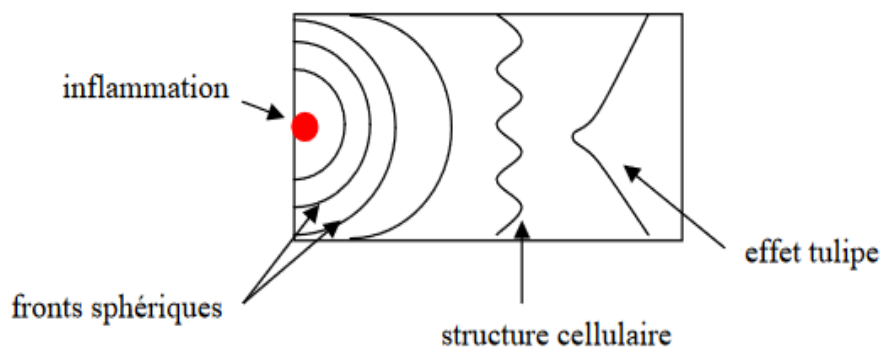


Figure 12 : Schéma montrant l'apparition d'une flamme tulipe dans une chambre fermée

Grâce à une étude de l'article de Peng Chen (CHEN) pour un ratio longueur diamètre de 6,25 au début du processus, on peut voir une flamme de forme sphérique pendant les 10 premières ms. Cette étape survient juste après avoir allumé la flamme. Durant ces 10 ms, la flamme augmente en volume dans toutes les directions à une vitesse presque constante. Après quoi, elle prend une nouvelle forme qui ressemble à la courbe d'un doigt durant $10\text{ms} < t < 30\text{ms}$. Au cours de cette étape le front de flamme atteint les parois de la chambre. La surface de la flamme augmente exponentiellement alors que sa vitesse diminue après avoir touché les parois. Après cela, la troisième phase a lieu à $t = 30\text{ms}$, la flamme devient plate et la surface et la vitesse atteignent leur minimum. C'est ensuite que la Flamme Tulipe, avec une forme de M, apparaît quand $t > 30\text{ms}$. Le mouvement du fluide reste laminaire pour $t < 22\text{ms}$ car à $t = 22\text{ms}$, la flamme commence à toucher les parois du canal et la pression est à son minimum. On peut dire que l'augmentation rapide de pression est un aspect critique de l'accélération du processus de déflagration de la flamme.

Plus le ratio longueur-diamètre du canal est petit, plus vite on aura une augmentation en pression. Dans le cadre de notre projet nous avons un ratio L/D de 3,4, ainsi la pression devrait augmenter plus rapidement par rapport aux résultats d'expérience dans l'article de Peng Chen. Cependant, les différentes phases du phénomène "flamme tulipe" apparaissent relativement dans le même ordre de grandeur de temps peu importe le ratio L/D. Cette étude de résultat nous permet donc de nous donner un ordre de grandeur quant à la formation de la flamme tulipe dans notre chambre.

3.5.1.2 Résumé de notre étude sur la propagation d'une flamme dans une chambre fermée avec une bougie à l'extrémité

Les articles scientifiques que nous avons trouvés à propos du phénomène de flamme tulipe ne s'appuyaient uniquement que sur un modèle de chambre de combustion avec l'inflammation démarrant à l'extrémité de celle-ci. C'est à partir des articles de Dunn-Rankin, Gan Cui, Peng Chen et Kai Zheng que nous avons pu comprendre comment ce phénomène pouvait impacter notre pomme de terre et si cela était plutôt positif ou non dans le cadre de notre projet. (Dunn-Rankin; Cui; Zheng K. e., 2016)

Les effets du refroidissement des gaz, les interactions entre la pression et la flamme tulipe, ainsi que le flux des gaz frais pour un tube court, sont à prendre en compte pour prévoir l'effet de la flamme. Comme la flamme tulipe peut aussi se former sans onde de pression, il est assez difficile voire impossible de dissocier les mécanismes lors d'apparition de l'effet tulipe où se produit la déflagration.

Dans le projet, nous parlons de la propulsion de légumes par déflagration ; c'est un mode de propagation de la flamme pour lequel le front se déplace avec une vitesse subsonique. Dans la chambre de combustion, les réactifs sont transformés en produits brûlés et l'énergie chimique est, elle, transformée en chaleur quand la flamme est allumée. (Henneton, 2007)

Dans une chambre fermée, la combustion du mélange crée une augmentation rapide de la pression à cause de l'expansion des gaz brûlés. Ainsi, la pression augmente en fonction du temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale, autrement dit, une surpression qui se trouve aux alentours de 8 à 10 bar pour notre mélange méthane-air (Henneton, 2007). C'est pour cela qu'il faut donc un système pour évacuer le gaz hors de la chambre de combustion afin d'éviter la destruction du système de déflagration. Cependant, notre objectif final étant d'utiliser cette surpression dans le but de propulser notre pomme de terre le plus efficacement possible, le système d'évacuation des gaz va donc naturellement se faire par le tube où se trouve initialement notre projectile.

Le fait d'ajouter une conduite d'évacuation des gaz risque de venir provoquer l'accélération de la flamme, ce qui va conduire à une grande augmentation de la combustion et donc de la pression dans la chambre. Cette pression peut atteindre jusqu'à 10 fois la valeur de la pression dans une enceinte fermée (comme le cas des 8 bar) (Henneton, 2007).

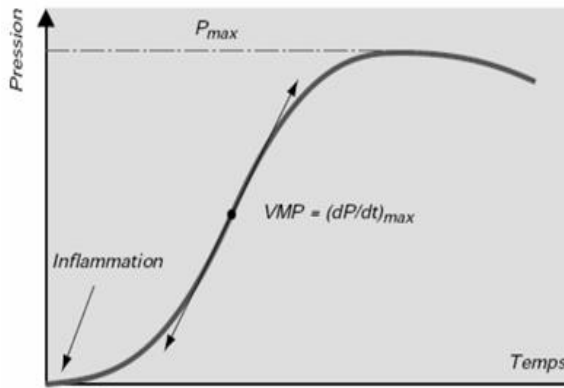


Figure 13 : Surpression d'explosion en fonction du temps dans une chambre de combustion et fermée. (Henneton, 2007)

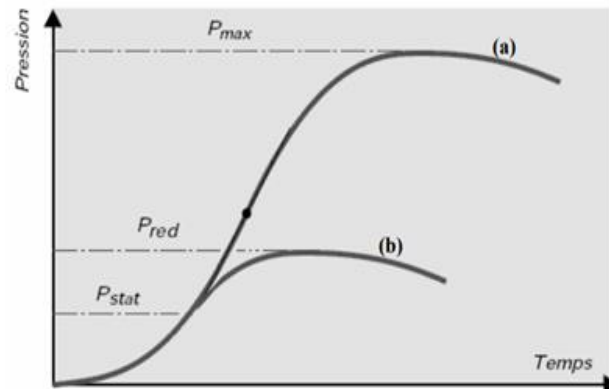


Figure 14 : Comparaison de la surpression dans une chambre de combustion fermée (a) la même chambre ouverte (b) (Henneton, 2007)

Ce premier graphique (figure 13) de pression montre l'élévation de la pression due à l'augmentation des gaz brûlés dans la chambre.

On peut constater dans la figure 14 que la pression atteinte dans la chambre ouverte est beaucoup plus faible que dans la chambre fermée. Ce phénomène est dû à l'ouverture de l'événement quand la pression atteint la pression statique, P_{stat} , cela va donc limiter l'explosion pour atteindre une pression réduite, P_{red} .

3.5.2 Phénomène d'explosion secondaire

Nous avons découvert un second phénomène important dans nos recherches, celui des explosions secondaires (Henneton, 2007). En effet, lorsque la flamme se propage dans une chambre puis rencontre un changement de géométrie avec un tube de diamètre plus petit, un mélange turbulent va se créer à l'entrée du tube et favoriser un mélange plus rapide entre les gaz frais et les gaz brûlés avec une pression qui se propage devant et derrière la sortie, provoquant ainsi un retour des gaz brûlés dans la chambre à combustion. Ce phénomène va bloquer l'évacuation du gaz en dehors de la chambre et ainsi créer une explosion secondaire à l'entrée.

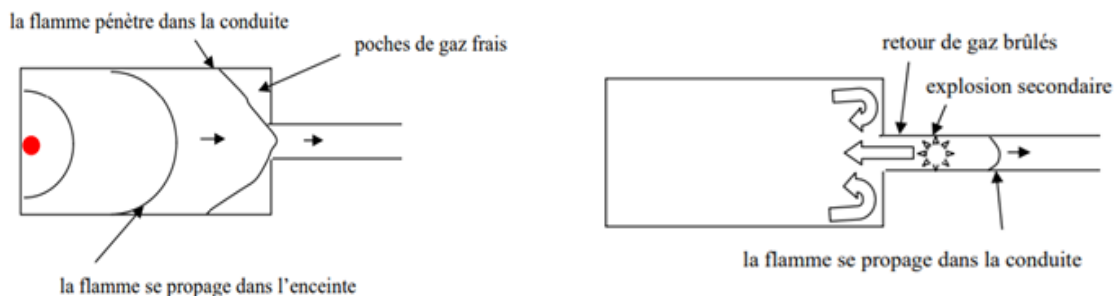


Figure 15 : Représentation de l'explosion et des retours de gaz dans une chambre avec tuyau d'évacuation. (Henneton, 2007)

Ces schémas représentent la propagation de la flamme dans une enceinte quand elle est munie d'un tuyau permettant d'évacuer les gaz et de diminuer la pression. On remarque donc un effet de retour des gaz brûlés dû à une explosion secondaire qui se produit dans le tuyau d'évacuation.

En plus de cela, le contact entre les poches de gaz frais restantes sur les côtés de la chambre et le retour des gaz brûlés va provoquer de nouvelles turbulences et donc très fortement augmenter la pression. Il est évident que ce phénomène est donc à éviter si possible, ou du moins à diminuer afin d'éviter le risque que la chambre de combustion ne soit altérée.

Dans le cadre de notre projet, nous avons prévu de découper la pomme de terre avec un emporte-pièce circulaire de manière à ce qu'elle ait le même diamètre que le tube de sorti. La pomme de terre sera positionnée à l'entrée du tube et donc à la sortie de la chambre de combustion.

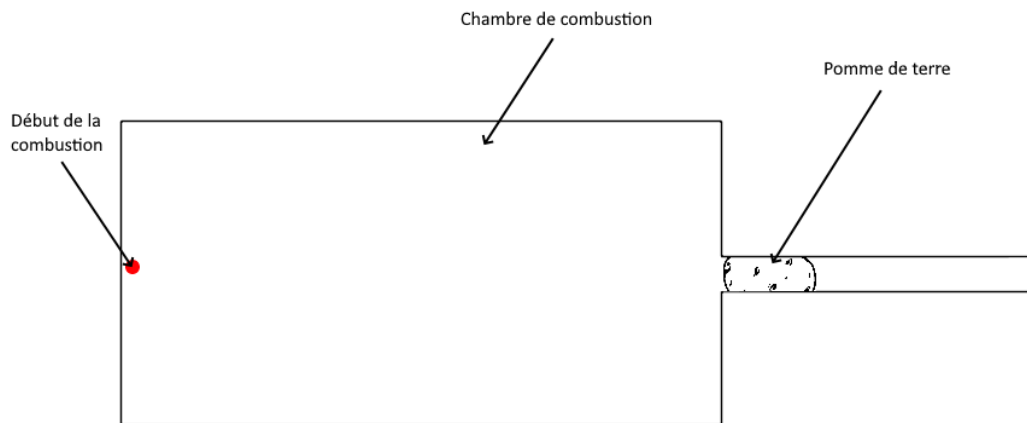


Figure 16 : Position de la pomme de terre dans le patator.

De cette façon, nous travaillons sur le modèle d'une chambre fermée et non d'une chambre avec un tube d'évacuation. Ainsi, le phénomène d'explosion secondaire, décrit précédemment, ne devrait pas avoir lieu.

Cependant, lorsque la déflagration créée commencera à propulser la pomme de terre à travers le tube avant de se retrouver à l'air libre, nous serons, cette fois-ci, dans le cadre d'une chambre avec un tube de plus petit diamètre en sortie, et donc un phénomène d'explosion secondaire qui pourra potentiellement se déclencher. Nous n'avons pas trouvé d'articles scientifiques à propos de ce sujet. De ce fait, nous n'avons pas le choix d'y répondre qu'avec notre bon sens. Nous pensons que l'expulsion de la pomme de terre dans le tuyau est très rapide, de ce fait le phénomène d'explosion secondaire décrit précédemment n'aurait pas le temps de se faire et ainsi le tuyau jouera bien son rôle de système d'évacuation des gaz.

Suite à cela, nous avons donc étudié les effets du ratio de la longueur du tuyau contre son diamètre (L/D). Quand on augmente le ratio L/D , la distance séparant le front de flamme et le point d'ignition augmente en conséquence, nous pouvons constater une variation linéaire

de vitesse de front de flamme qui provient du changement de L/D . Sur la figure 17, nous pouvons voir les effets du ratio de L/D sur la pression dans la chambre de combustion. Au début du processus, il n'y a pas de changement fulgurant sur l'augmentation de la pression mais après la phase sphérique de la flamme, la pression augmente exponentiellement pour les ratios les plus faibles de L/D .

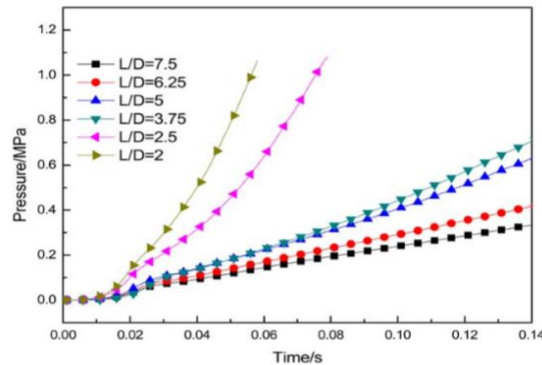


Figure 17 : Evolution de la Pression en fonction du temps par rapport au ratio L/D . (CHEN)

Augmenter la dimension du diamètre du tube vient augmenter la surpression alors que réduire ce diamètre va permettre de ne pas produire l'explosion secondaire et donc de ne pas avoir un second pic de pression dans la chambre de combustion.

Molkov précise que les turbulences induites par le retour de gaz sont un des facteurs les plus importants dans l'augmentation de la pression (Zheng K. e., 2016). Nous pensons donc qu'il serait mieux d'anticiper l'évitement d'une explosion secondaire sans tout de même bloquer la sortie des gaz chauds. Pour cela, nous avons vu que l'utilisation d'un insert pour retenir la flamme à l'entrée du tuyau permettait d'évacuer les gaz en ayant une pression restreinte. Cependant, il a été prouvé que l'élimination totale de la flamme n'est pas la meilleure des solutions pour atténuer un maximum la pression dans la chambre. Et comme l'insert prendrait la place de la pomme de terre dans le tuyau d'évacuation, nous jugeons qu'il n'est pas judicieux d'y avoir recours dans notre patator.

3.5.3 Hypothèses sur la position de la bougie

Grâce à nos études bibliographiques concernant la propagation de la flamme dans la chambre, nous avons trouvé deux possibilités de configuration quant à la position de la bougie sur les parois de la chambre. Soit nous décidons de mettre la bougie à l'extrémité de la chambre, c'est à dire, à l'opposé de la pomme de terre, soit nous décidons de la positionner sur un côté latéral de la chambre.

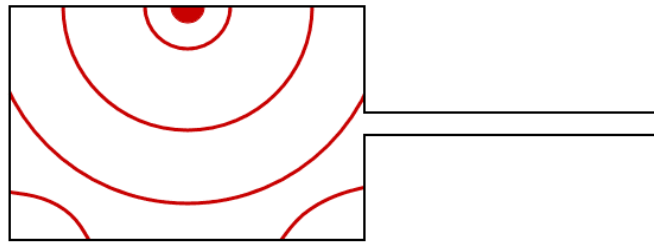


Figure 18 : Schéma de la propagation du front de flamme avec la bougie placée sur un côté de la chambre.

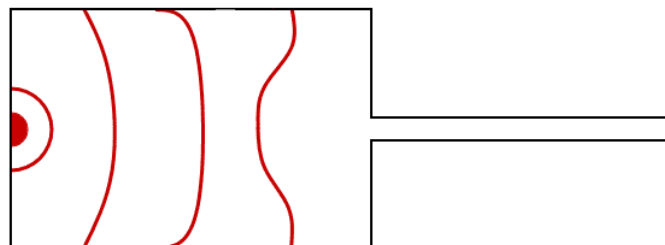


Figure 19 : Schéma de la propagation du front de flamme avec la bougie placée en bas de la chambre.

Dans notre étude, nous avons fait le rapprochement avec la position des bougies dans les moteurs thermiques. Bien que les moteurs diesel fonctionnent sur le principe de l'auto-allumage grâce au ratio pression/chaleur dans la chambre de combustion, les moteurs essence (ou GPL, qui est un carburant gazeux comme pour notre patator), eux, sont des moteurs à allumage commandés pour le déclenchement de la combustion carburant/comburant dans la chambre. Ce déclenchement se fait grâce à l'allumage des bougies. De ce fait, ces dernières sont donc très importantes, aussi bien au niveau de leur performance que leur position dans la chambre permettant d'optimiser au maximum leur utilisation. Ainsi, depuis la création des moteurs, les Hommes cherchent sans cesse la meilleure configuration (voir **annexe 6**) dans le but d'obtenir le meilleur rendement possible; le facteur de la pollution a également été mis en jeu un peu plus tard et a valu de revoir certains arguments.

Au vu de nos recherches sur les moteurs essences, nous avons remarqué que pour la plupart du temps, la bougie était positionnée plutôt au centre des sièges de soupape et ainsi au centre du cylindre à l'extrémité de la chambre. Cependant, comme on peut le voir sur **l'annexe 6**, sur certains systèmes la bougie se situe sur le côté de la chambre. Cette configuration peut permettre, entre autres, l'utilisation d'une préchambre de combustion dont l'objectif est d'optimiser le mélange afin d'obtenir une meilleure combustion avant la propagation du front de flamme dans la chambre.

Nous avons donc dû nous faire notre propre avis à partir de travaux déjà établis mais aussi de notre bon sens afin de déterminer quelle position serait la plus avantageuse d'un point de vu qualité de la combustion.

3.5.3.1 Position de la bougie sur un côté de la chambre

Tout d'abord nous nous sommes intéressés à la configuration avec la bougie située sur le côté de la chambre de combustion. (Voir figure 18)

Nous avons remarqué que cette position nécessite l'utilisation d'une préchambre de combustion, ce qui est plus complexe à mettre en place pour notre projet. De plus, une bougie d'allumage située sur le côté risque de produire une flamme moins intense et ainsi entraîner une perte d'énergie et une pression moindre. Également, la flamme atteindra le côté latéral opposé avant même de brûler la totalité des gaz frais présent dans le reste de la chambre. De ce fait, le front de flamme risque de rebondir sur la paroi opposée et ainsi de se propager dans toutes les directions, provoquant des turbulences dans le mélange et donc provoquer une perte d'énergie indésirable. Selon nous, la position latérale de la bougie ne nous donnera pas le meilleur rendement quant à la propulsion de la pomme de terre qui est notre objectif. En effet la flamme se propageant vers le côté opposé au tuyau d'évacuation contribuera peu au lancement de la pomme de terre.

Pour toutes ces raisons, il est clair que placer la bougie sur le côté de la chambre ne semble pas être la solution propice à un bon lancement de la pomme de terre en dehors du tuyau.

3.5.3.2 Position de la bougie à l'extrémité de la chambre

Grâce à un allumage de la bougie se situant à l'extrémité de l'enceinte, on aura une flamme laminaire. Dans ce cas-là, la vitesse du front de flamme représente la vitesse de consommation du mélange frais par rapport aux gaz frais. Cette valeur varie de 0,4 m.s⁻¹ à 0,5 m.s⁻¹ (Henneton, 2007) pour un mélange stœchiométrique d'hydrocarbures-air. L'expansion des gaz dans la chambre va de son côté créer une augmentation de pression. On constate qu'après avoir touché la paroi, la vitesse de la flamme diminue. Ce changement est dû aux frottements des gaz contre la paroi de la chambre car nous n'avons pas une surface parfaite ni un fluide parfait. Ainsi, la vitesse diminue et le front de flamme se transforme et sa surface devient plate pour ensuite arriver à sa forme de Flamme Tulipe.

La flamme qui est initialement laminaire va rencontrer des instabilités liées aux troubles de l'environnement qui l'entoure, de type variations de la vitesse, ou bien des perturbations de la propagation des ondes de pression. L'accélération de la flamme est due à son interaction avec le flux des gaz et la turbulence associée. Quand le flux des réactifs devient turbulent, une accélération de la combustion se produit et l'effet piston des gaz brûlés sur les gaz frais augmente. Néanmoins, un mélange qui est trop turbulent peut conduire à une décélération ou même à des extinctions locales de la flamme dû à l'extension du front de flamme. C'est pour

cela que nous avons travaillé dans la première partie de ce rapport sur le phénomène de turbulence afin de se l'approprier et comprendre son enjeu dans notre projet et ne pas être contre-productif.

Nous jugeons ainsi que positionner notre bougie à l'extrémité de la chambre est le choix le plus judicieux que l'on puisse faire. En effet, au vu de nos études sur l'optimisation de l'injection et des phénomènes physiques présents dans ce genre d'expérience, nous pouvons dire que cet emplacement de la bougie permet d'utiliser au mieux la déflagration que l'on va créer dans la chambre pour propulser la pomme de terre en dehors du patator.

Nous avons également une remarque à faire concernant la géométrie de la chambre de combustion. En effet, pour optimiser au maximum notre combustion il serait idéal que la surface de la chambre où se trouve l'injecteur soit en forme de demi-sphère. Cette géométrie particulière permettrait de brûler toute la surface de la chambre sans laisser le gaz frais sur les côtés et ainsi augmenter l'efficacité de notre lancement. Pour des raisons pratiques et budgétaires nous ne pourrions pas procéder à cette optimisation du volume de la chambre.

4. Conclusions et perspectives

Le but de notre projet était de déterminer les conditions de combustion les plus favorables à un tir puissant et de concevoir en conséquence un système d'allumage et d'injection tirant pleinement parti de ces conditions. Nous avons tout d'abord tenté d'utiliser la CFD pour simuler des solutions d'injection et d'allumage puis nous nous sommes tournés vers des études bibliographiques pour définir ces mêmes solutions.

En ce qui concerne les conditions de combustion en elle-même, on constate que la turbulence du mélange a des effets bénéfiques sur la combustion. Elle augmente la pression en fin de combustion et permet une augmentation de la pression plus rapide que dans un cas laminaire. Il est également à noter que c'est lorsque le mélange est aux conditions stœchiométriques que la pression en fin de combustion est la plus importante. De plus, après étude du phénomène de flamme tulipe, on constate que celui-ci est bénéfique à la combustion puisqu'il permet d'atteindre des pressions de fin de combustion plus élevées. Le phénomène d'explosion secondaire est au contraire à limiter puisqu'il provoque des surpressions en plusieurs endroits du mélange lors de la combustion ce qui peut altérer la chambre de combustion.

Nous avons retenu les solutions suivantes. Pour l'injection, la turbulence ayant des effets positifs sur la pression en fin de combustion nous avons décidé de choisir le tuyau le plus fin possible pour augmenter la vitesse d'injection du méthane. Nous avons également choisi d'utiliser le système d'injection dit "mixte" de l'étude de Murat Koksal c'est-à-dire deux tuyaux d'injection symétriques par rapport à l'axe de révolution de la chambre de combustion calés à 45° par rapport à la tangente. Cela nous permettra de bénéficier du swirl tout en homogénéisant le mélange de façon similaire dans toute la chambre. Pour l'emplacement de la bougie, dans l'optique de bénéficier du phénomène de flamme tulipe et de calquer notre système sur ce qui existe déjà, nous avons préféré placer la bougie sur l'extrémité basse de la chambre de combustion plutôt que sur le côté. Enfin, l'utilisation d'un insert dans le canon pour atténuer le phénomène d'explosion secondaire a été écarté pour que la pomme de terre puisse être chargée directement à l'entrée du canon et ainsi bloquer l'accès immédiat au canon aux gaz d'échappements (réduisant ainsi le risque d'une explosion secondaire).

Pour conclure, ce projet a été un réel enrichissement pour chacun d'entre nous. En effet, il nous a appris à travailler en groupe, mais aussi montré à quel point la répartition des tâches était importante pour mener à bien un projet quel qu'il soit. Nous avons dû apprendre à chercher des informations dans diverses sources afin de répondre à nos interrogations, ce qui nous a poussés à faire le tri et apprendre à synthétiser, qualité importante pour notre futur avenir d'ingénieur. Ce projet nous a ainsi permis de nous familiariser avec la recherche d'informations dans des documents scientifiques, mais aussi l'utilisation de nouveaux logiciels qui pourront nous être utiles plus tard.

Les perspectives de poursuite du projet de simulation de combustion à volume constant sont les suivantes. Il faudrait utiliser la CFD pour valider numériquement l'efficacité et l'impact des solutions retenues sur la puissance de feu du système. Il serait également intéressant de simuler les solutions présentées mais écartées pour s'assurer de leur inefficacité. Enfin, l'idéal serait de monter le Patator et de le tester pour confronter les résultats expérimentaux à ceux des différentes études et simulations.

5. Bibliographie

- Allée de tourbillons de Karman.* (2020, Mai 15). Récupéré sur Wikipédia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/All%C3%A9e_de_tourbillons_de_Karman
- CHEN, P. (s.d.). *Experimental and Numerical Study of Premixed Methane/Air Flame Propagating in Various L/D Closed Ducts.*
- Chunhua Baia, X. C. (2020). *Impacts of turbulence on explosion characteristics of methane-air mixtures with different fuel concentration.* EIServier.
- Coantic, M. (1987). *La physique de la turbulence.* La Houille Blanche.
- Cui, G. (s.d.). *Numerical study on premixed methane-air flame propagation in a confined vessel at low initial temperature.*
- Diffusion de la matière.* (2020, Mars 03). Récupéré sur Wikipédia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusion_de_la_mati%C3%A8re
- Dimension de Kolmogorov.* (2020, Mai 5). Récupéré sur Wikipédia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/Dimension_de_Kolmogorov
- Dunn-Rankin. (s.d.). *Tulip flames : changes in shape of premixed flames propagating in closed tubes.*
- Écoulement laminaire.* (2020, Avril 27). Récupéré sur Wikipédia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coulement_laminaire
- Henneton, N. (2007). *Propagation d'une flamme de prémélange gazeux d'une enceinte vers un tube : études des mécanismes de transmission et de coincement au changement de section. Énergie électrique.* Université de Poitiers.
- Jie Liu, B. M. (2019). *Optimization of the direct injection natural gas engine under different combustion modes.* Elsevier.
- Louapre, D. (2011, Août 22). *Le nombre de Reynolds.* Récupéré sur Science étonnante:
<https://sciencetonnante.wordpress.com/2011/08/22/le-nombre-de-reynolds/>
- M. Koksai, F. H. (2004). *Gaz mixing in circulating fluidized beds with secondary air injection.* Trans IChemE.
- Modèles de turbulence.* (s.d.). Récupéré sur
<http://hmf.enseiht.fr/travaux/beiepe/book/export/html/1124>
- Nombre de Reynolds.* (2020, Mai 22). Récupéré sur Wikipédia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds
- Turbulence.* (2020, Mai 7). Récupéré sur Wikipédia: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbulence>
- Zheng, K. e. (2016). *Experimental Study on Premixed Flame Propagation of Hydrogen/Methane/Air Deflagration in Closed Ducts.* Sciencedirect.
- Figure 1 : *Écoulement laminaire.* (2020, Avril 27). Récupéré sur Wikipédia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coulement_laminaire

Figure 2 : Louapre, D. (2011, Août 22). *Le nombre de Reynolds*. Récupéré sur Science étonnante: <https://sciencetonnante.wordpress.com/2011/08/22/le-nombre-de-reynolds/>

Figures 3 et 4 : (s.d.). *Tutoriel proposé dans l'EC Maillage dans le département Energie et Propulsion de l'INSA De Rouen*.

Figures 5, 6 et 7 : Chunhua Baia, X. C. (2020). *Impacts of turbulence on explosion characteristics of methane-air mixtures with different fuel concentration*. Elsevier.

Figure 8 : Jie Liu, B. M. (2019). *Optimization of the direct injection natural gas engine under different combustion modes*. Elsevier.

Figure 9 : *Injection directe d'essence*. (s.d.). Récupéré sur ENSEEIHT: <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9900/travaux/optemf/moteur/ide.htm>

Figures 10 et 11 : M. Koksai, F. H. (2004). *Gaz mixing in circulating fluidized beds with secondary air injection*. Trans IChemE.

Figures 13, 14 et 15 : Henneton, N. (2007). *Propagation d'une flamme de prémélange gazeux d'une enceinte vers un tube : études des mécanismes de transmission et de coincement au changement de section*. *Énergie électrique*. Université de Poitiers.

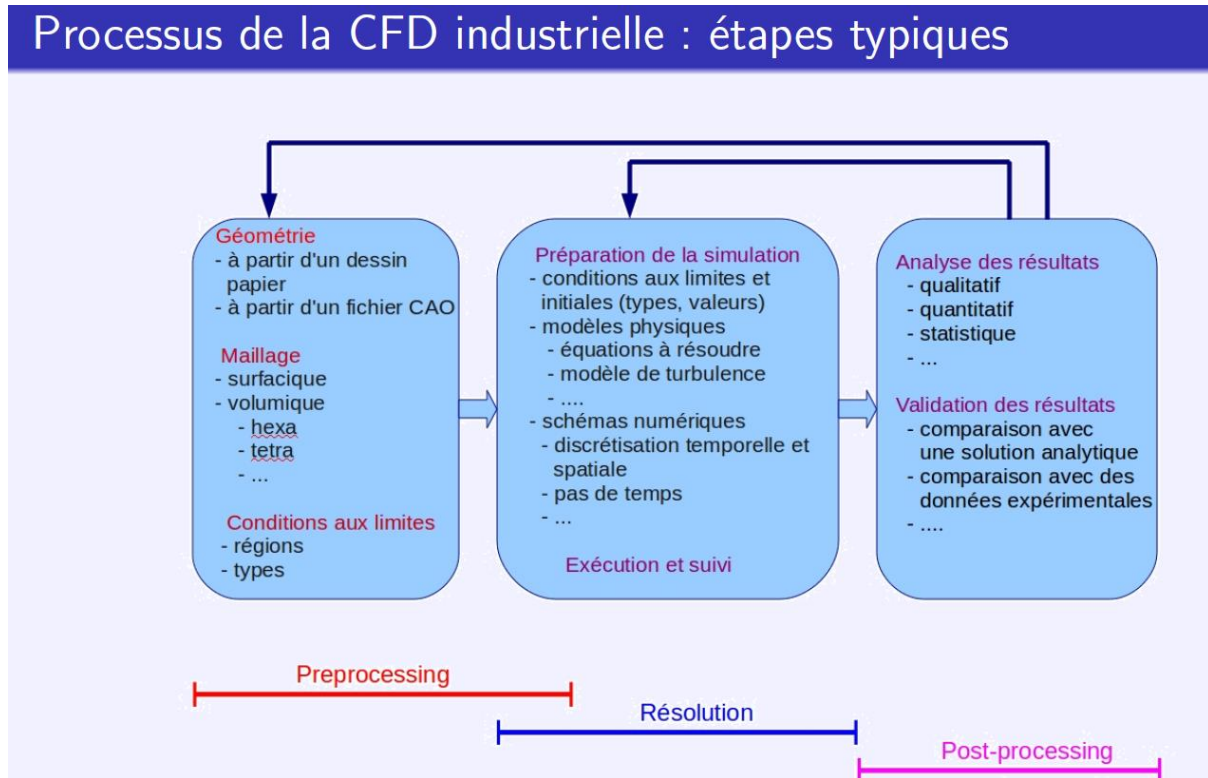
Figure 17 : CHEN, P. (s.d.). *Experimental and Numerical Study of Premixed Methane/Air Flame. Propagating in Various L/D Closed Ducts*.

Table 6 : Jie Liu, B. M. (2019). *Optimization of the direct injection natural gas engine under different combustion modes*. Elsevier.

6. Annexes

6.1 Documentation technique

Annexe 1 : Schéma du processus de la CFD industrielle



Source : Stoukov, A. (2006, Octobre). *Introduction à la Mécanique des Fluides Numérique : Méthode "Volumes Finis"*. Récupéré sur ENSEEIHT:
<http://hmf.enseeiht.fr/coursenligne/stoukov/vf.pdf>

Annexe 2 : Résumé des différents types d'approche pour simuler la turbulence.

Modélisation de la turbulence

Type d'approche	Caractéristiques
<i>DNS</i>	Résolution de l'ensemble des équations de Navier Stokes. Très coûteux en temps et en ressources
<i>LES</i>	Equations filtrées et moyennées. Seules les grosses structures sont résolues, le plus petites sont modélisées. Ce modèle reste coûteux
<i>RANS</i>	Résolution entièrement moyennée des équations. Toutes les échelles de turbulence sont modélisées. Modèle le moins coûteux

Les modèles de turbulences RANS disponibles et leurs domaines d'application sont les suivants

Modèle	Domaines d'application
Spalart-Allmaras	Écoulements internes ou externes quasi 2D : fuselage d'avion, missile, aube...
Standard k-ε	Modèle robuste, pas adapté aux écoulements à forts gradients de pression, décollements...
RNG k-ε	Adapté aux écoulements complexes avec swirl modéré, forts gradients de pression : ventilation, décollements, jets...
Realizable k-ε	Mêmes domaines que le RNG mais plus facile à converger
Standard k-ω	Permet de prendre en compte tous les phénomènes de paroi sans loi de paroi. Écoulement avec couches limites fines et complexes. Coûteux en terme de maillage
SST k-ω	Mêmes domaines que le standard mais fait intervenir la vorticité ce qui limite la viscosité turbulente
RSM	Résolution complète du tenseur des contraintes de Reynolds. Le plus précis pour les écoulements complexes. Très coûteux en terme de maillages et en temps de calculs

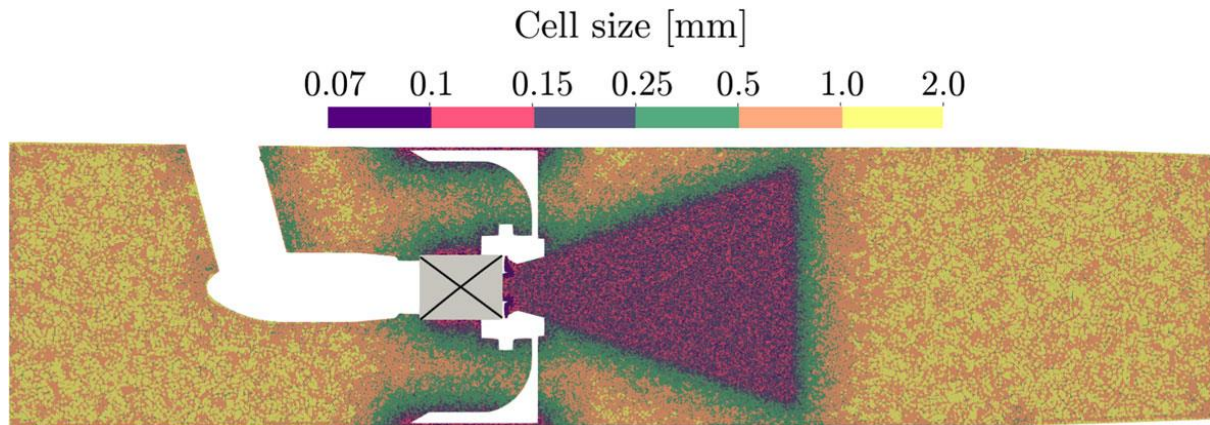
Source : (s.d.). Document Moodle venant de l'EC Maillage proposé en département EP.

Les modèles de turbulence de type k-E et RSM nécessitent d'être associés à une loi de paroi afin de prédire le développement de couches limites (car ceci ne sont pas inclus dans les modèles). Trois modélisations des phénomènes de paroi sont disponibles dans Fluent :

- La Standard Wall Function : elle est adaptée pour des maillages assez grossiers en paroi ($30 < y^+ < 200$). Elle est basée sur la loi de Launder-Spaulding. >
- La Non Equilibrium Wall Function : il s'agit de la Standard Wall Function adaptée pour des écoulements à fort gradients de pressions.
- La Enhanced Wall Treatment : le maillage doit être plus fin. Une loi de paroi est appliquée aux cellules pour lesquelles $y^+ < 5$. Une autre loi est appliquée pour celles dont les $y^+ > 30$. Les cellules entre les deux doivent être évitées autant que possible car elles sont gérées par une loi mathématique.

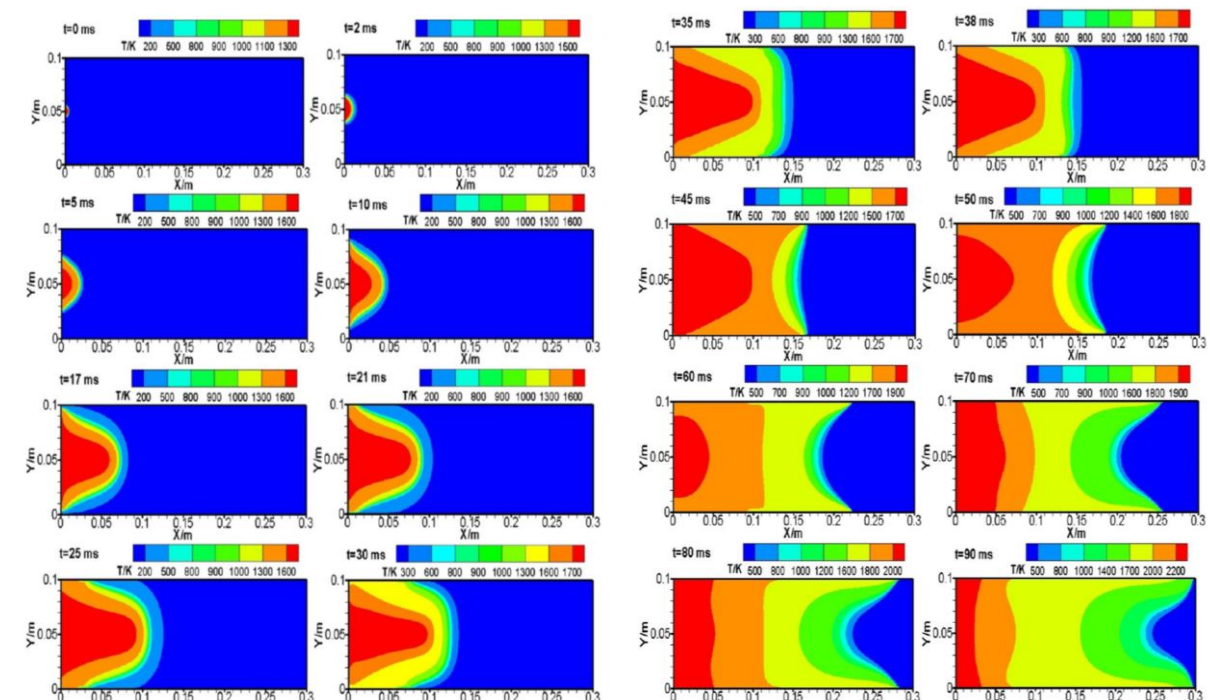
Ainsi la RANS est la méthode la moins coûteuse en calcul mais demande de bien paramétrer le modèle, et elle ne permet pas d'avoir accès aux tourbillons aux petites échelles. Elle donne accès à une information moyenne, pas aux fluctuations.

Annexe 3 : Taille des mailles pour de la LES d'un injecteur pauvre / prémélangé de Kérosène.



Source : Grisch, P. D.-A. (s.d.). *Impact of Spray Droplet Distribution on the Performances of a Kerosene Lean/Premixed Injector.*

Annexe 4 : Évolution de la flamme tulipe dans la chambre au cours du temps.



Source : Gan Cui, Z. L. (2017, Décembre 28). *Numerical Study on Premixed Methane–Air Flame Propagation in a Confined Vessel at Low Initial Temperature.* Récupéré sur Energy Fuels: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03433>

Annexe 5 : équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible, c'est-à-dire l'équation de bilan de la quantité de mouvement du fluide. Il n'existe pas de solution analytique à cette équation, d'où la nécessité des méthodes de résolution numérique.

INSA INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
ROUEN

Chapitre 4 : La dynamique des fluides
5 Equation de Navier-Stokes

$$\underbrace{\frac{dU_i}{dt}}_{\text{accélération particulaire}} = f_{vi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k^2}$$

$$\underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k}}_{\text{accélération particulaire}} = f_{vi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k^2}$$

Equation de Navier-Stokes pour un fluide incompressible!!

INSA INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
ROUEN

Chapitre 4 : La dynamique des fluides
6 Analyse dimensionnelle

$$\underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial t}}_1 + \underbrace{U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k}}_2 = \underbrace{f_{vi}}_3 - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}}_4 + \underbrace{\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k^2}}_5$$

On estime l'ordre de grandeur de chaque terme en faisant apparaitre :

$U_i = \bar{v}$ Une vitesse moyenne

$\frac{\partial}{\partial t} = f_0$ Une fréquence caractéristique

$\frac{\partial}{\partial x_k} = \frac{1}{L}$ Une échelle d'espace caractéristique

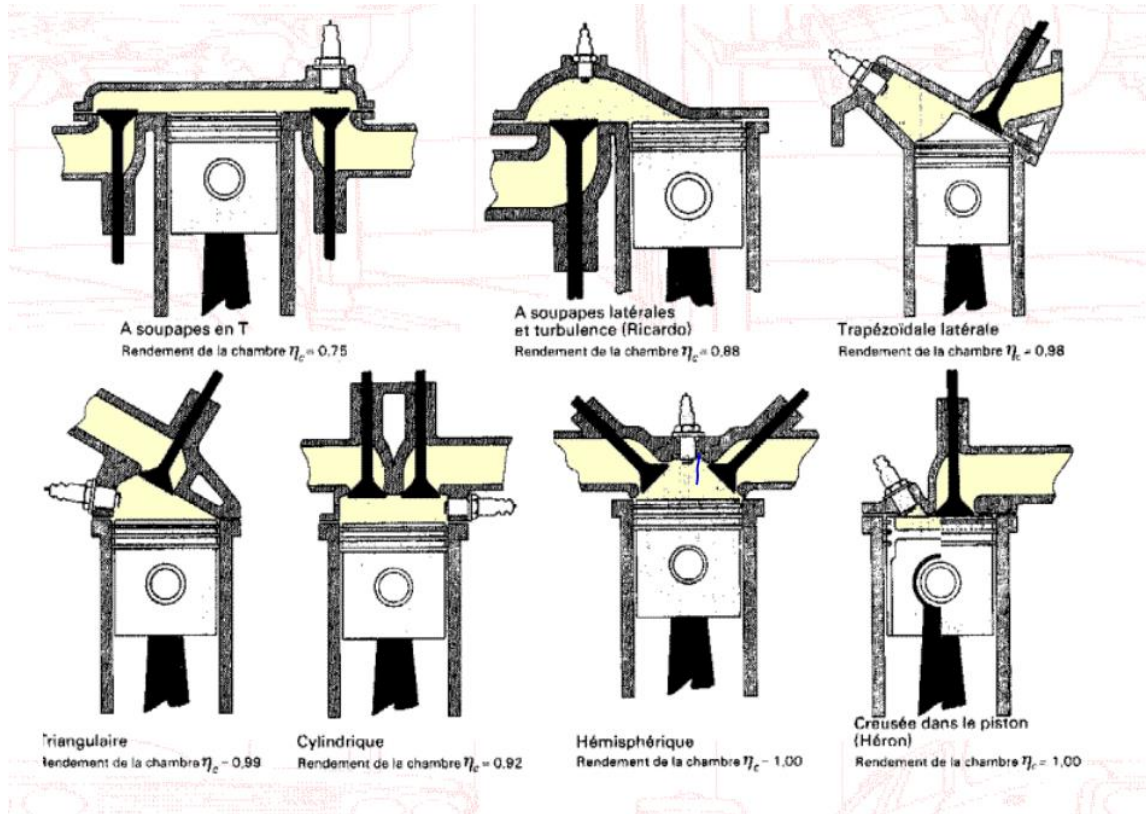
$\partial P = P - P_0$ Une fluctuation de pression caractéristique

$f_{vi} = -g$ Une force de volume caractéristique

- 1 : accélération instationnaire
- 2 : accélération convective
- 3 : accélération de la pesanteur
- 4 : fluctuations de pression
- 5 : terme lié aux forces visqueuses

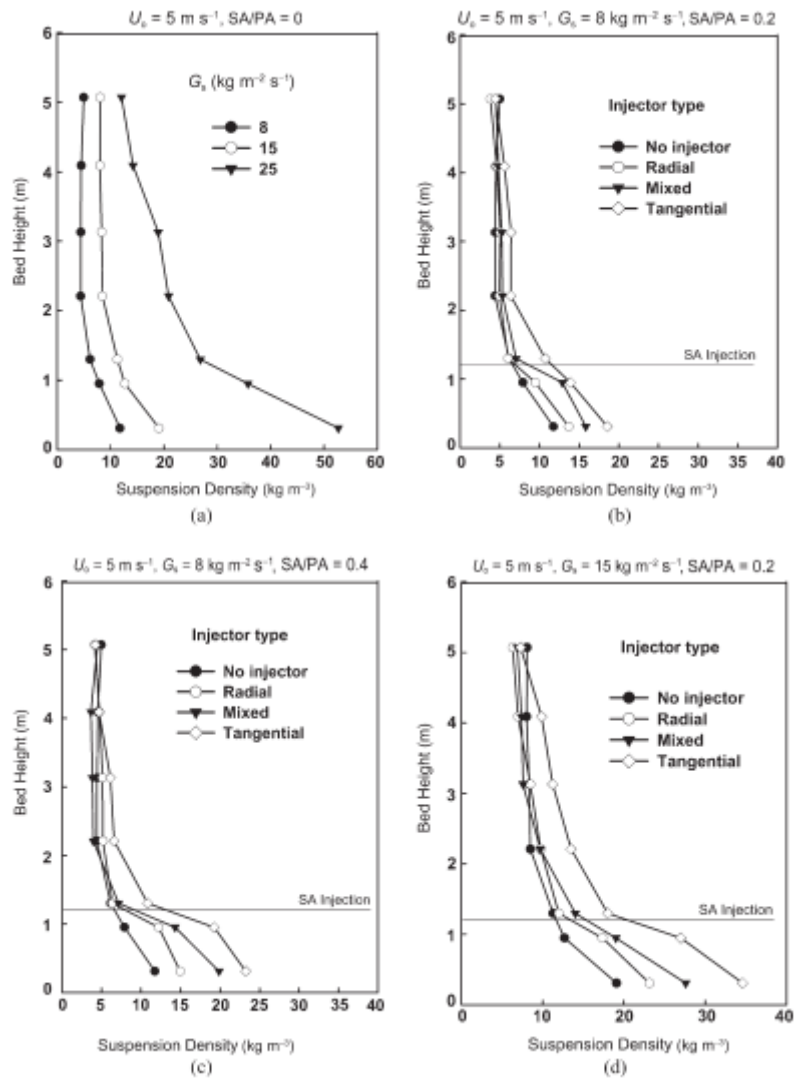
Source : cours STPI2 de mécanique des fluides de Jérôme YON, INSA Rouen.

Annexe 6 : Schéma des différentes positions de la bougie sur une chambre de combustion d'un moteur essence



Source : *Le moteur*. (s.d.). Récupéré sur BOURSINP: <http://boursinp.free.fr/pdgmoteu.htm>

Annexe 7 : Répartition de l'air secondaire en fonction de la répartition de la hauteur dans la chambre



Source : M. Koksai, F. H. (2004). *Gaz mixing in circulating fluidized beds with secondary air injection*. Trans IChemE.