

MODELISATION
DE LA
COMBUSTION
D'UN
MOTEUR A ESSENCE

Master 2^{ème} année MNPM

Encadrés par :

M. Florent CALVAYRAC

Participants :

Stéphane BARBE

Hamida BEN ABDEL JAOUED

Mohd Arieff HAMZAH

Guanchen LI

Manuel OFIALA

Makhmout DIOUARA

Emma RICHET

Année 2010/2011

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Monsieur Florent CALVAYRAC, d'une part de nous avoir offert l'opportunité d'étudier en Master 2 européen de Modélisation Numérique ; d'autre part de toute l'aide qu'il nous a apportée sur le projet, notamment sur les tutoriels de Star-CD.

Nous remercions également Monsieur Francis PIQUERA, Responsable des collections-Expositions du Musée des 24 Heures circuit de la Sarthe, pour nous avoir présenté un moteur deux temps YAMAHA partiellement ouvert ainsi que pour nous avoir fait visiter une partie des réserves du circuit des 24 Heures du Mans.

Et enfin, nous remercions Monsieur SOULARD, professeur de Production Mécanique à l'IUT GMP de l'Université du Maine, de nous avoir prêté un moteur deux temps de tondeuse à gazon.

Table des matières

Introduction.....	5
I. Historique – les différents types de moteurs	6
II. Etude thermodynamique	8
1. Cycle de Beau de Rochas – moteur à quatre temps	8
a. Principe	8
b. Etude thermodynamique	9
2. Cycle deux temps.....	10
3. Comparaison deux temps-quatre temps	11
4. Composition de l'essence	11
5. Chimie de la combustion	12
a. Classification des différentes variétés de combustion	12
b. Différentes formes de combustion.....	12
c. Combustion en milieu homogène	12
III. Normes de pollution et solutions apportées.....	13
1. Les normes européennes de pollutions	13
2. Les nouveaux moyens anti-pollutions	15
a. L'AdBlue	15
b. EGR	15
c. Le pot catalytique.....	15
IV. Moteur étudié.....	16
1. Caractéristiques du cylindre.....	16
2. Fonctionnement de ce moteur deux temps	17
V. CAO et simulation du moteur avec SolidWorks.....	18
1. CAO	18
2. Etude de la turbulence.....	19
a. Conditions aux limites	21
b. Résultats.....	21
VI. Etude de la combustion avec Star-CD	23
1. Maillage de la chambre de combustion	23
2. Etude statique de la combustion du propane	25
a. Descriptif.....	25

b. Résultats.....	25
3. Combustion du propane en trois étapes	27
4. Injection de gouttelettes d'octane liquide	29
a. Principe	29
b. Combustion avec un excès de carburant.....	30
c. Combustion avec un défaut de carburant.....	33
d. Conclusion	37
Conclusion	38
Bibliographie	39
Sites Internet	39
Livre.....	39
Tutoriels de star-cd	39
Autres documents	39

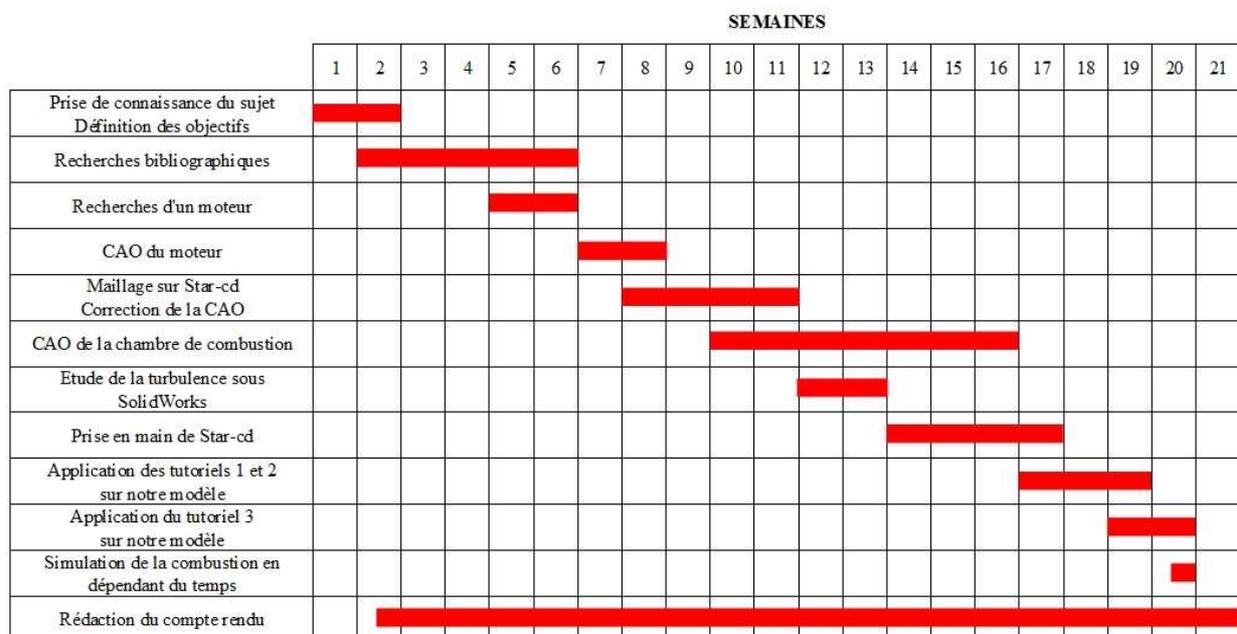
Introduction

A l'heure où le secteur automobile connaît d'importantes innovations comme la voiture électrique dans le but de diminuer les émissions de polluants, nous avons choisi de poursuivre l'étude de la combustion d'un moteur essence initiée par une précédente promotion de master MNPM de l'Université.

Nous avons donc reproduit un moteur deux temps existant réellement grâce à un logiciel de CAO afin de modéliser la combustion du carburant et la formation des différents produits. A l'origine, nous voulions coupler Abaqus, un logiciel de calculs par éléments finis, avec Star-CD, de manière à introduire du carburant dans notre cylindre, visualiser sa combustion, puis, grâce à un maillage mobile, observer le déplacement du piston et donc la rotation du vilebrequin qui en résultaient. Cependant, en raison de divers problèmes, nous avons dû nous limiter à tester l'influence de différentes formes du piston sur la turbulence du fluide contenu par le cylindre, et à observer l'émission de différents polluants lors de la combustion. Pour ce faire, nous avons utilisé un module de mécanique des fluides inclus dans la version étudiante de SolidWorks ; concernant la combustion, nous avons reproduit la partie 9 des tutoriels de star CCM sur notre modèle.

Ce qui sera présenté par la suite s'inscrit dans la continuité de l'étude réalisée précédemment. Afin d'avoir une autre approche du sujet, il est conseillé de la lire auparavant puisque les étapes de maillage y sont bien détaillées, et que nous ne les présenterons donc pas.

Comme le montre ce tableau de déroulement du projet, plusieurs tâches ont été effectuées simultanément en répartissant le travail entre plusieurs groupes.



I. Historique – les différents types de moteurs

Le plus ancien moteur est la machine à vapeur : dès le 1er siècle après J.C, Héron d'Alexandrie construit l'éolipyle, une chaudière hermétique remplie en partie d'eau, placée sur le feu. Deux tubes creux relient cette chaudière à une sphère pouvant tourner autour d'un axe horizontal. Deux tubes perpendiculaires à l'axe laissent sortir la vapeur de la sphère, ce qui, par propulsion, la fait tourner.



En 1763, James Watt répare un moteur Newcomen (machine à balancier créée en 1712) et cherche un moyen d'augmenter son efficacité. Il crée une chambre de condensation pour la vapeur séparée par une valve. En 1781, il met au point le système mécanique permettant de créer un mouvement de rotation à partir du mouvement rectiligne du piston, ce qui lui permet ensuite de concevoir le cylindre à double action où la vapeur entraîne le piston lors de sa montée et de sa descente. La puissance de la machine en est fortement augmentée. En 1784, il dépose un brevet sur une locomotive à vapeur et invente un indicateur de pression de la vapeur dans le cylindre. Il construit en 1788 une valve de puissance pour rendre la vitesse constante indépendamment des variations de la production de vapeur et des sollicitations de puissance de sortie et introduit une nouvelle unité de mesure de la puissance : le cheval vapeur.

En 1803, Edmund Cartwright invente un nouveau type de condenseur enveloppant le cylindre ; avec l'apparition de chaudières produisant de la vapeur à haute pression, des machines compactes et puissantes vont ainsi pouvoir être fabriquées.

La machine à vapeur est un moteur à combustion externe qui transforme de l'énergie thermique en énergie mécanique. La vapeur d'eau produite grâce à une chaudière est utilisée pour mouvoir un piston dans un cylindre, puis ce mouvement de translation est transformé en rotation par des bielles. Le terme externe vient du fait qu'aucune combustion n'a lieu dans le moteur et que le fluide caloporteur demeure confiné dans celui-ci. L'énergie thermique fournie par deux sources de température externes (une chaude et une froide) est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire de ce fluide qui subit un cycle thermodynamique fermé. Le chauffage de l'eau peut se faire sans combustion, par chauffage solaire, par exemple. Ces moteurs sont aussi appelés moteurs à air chaud car à l'origine, le fluide de travail utilisé était l'air. Aujourd'hui, d'autres fluides étant utilisés, comme l'hydrogène, l'hélium ou l'azote, cette expression tend à disparaître. Ces moteurs avaient une consommation inférieure aux autres pour une puissance supérieure, dans les années 1970, mais ils ne furent pas exploités industriellement. Les moteurs à

combustion externe les plus connus sont le moteur Stirling (1816), le moteur Ericsson (1833) et, bien sûr, la machine à vapeur.

Apparus à la même époque que les premières machines à vapeur, les moteurs à combustion interne à pistons verront leur développement sommeiller pendant près de deux siècles, avant de s'affirmer comme les moteurs du XXe siècle. C'est le type de motorisation de véhicules le plus répandu de nos jours.

Dans de tels moteurs, l'énergie thermique dégagée par la combustion et la détente d'un gaz est transformée en énergie motrice mécanique directement à l'intérieur du moteur. La combustion a lieu dans la même partie du moteur que la production de travail. On retrouve cependant les mêmes principes que lors d'un cycle de moteur à combustion interne : énergie chimique du fluide de combustion, combustion, chaleur, augmentation de la pression du fluide moteur, détente de ce fluide, travail mécanique.

L'explosion se produit dans un cylindre dont un des fonds est fixe, la culasse et l'autre mobile, le piston. Le déplacement rectiligne du piston est ensuite transformé en mouvement de rotation par un système bielle-manivelle, puis recueillie sur un arbre tournant appelé vilebrequin.

Il existe deux grands types de moteurs à combustion interne : les moteurs fournissant un couple sur un arbre et les moteurs à réaction. Dans le premier cas, un ensemble cylindre-piston permet le mouvement du véhicule, tandis qu'un moteur à réaction est destiné à propulser un véhicule en projetant un fluide (gaz ou liquide) vers l'arrière. Parmi les moteurs fournissant un couple sur un arbre, on distingue :

- les moteurs à allumage commandé, auxquels nous nous intéresserons particulièrement
- les moteurs Diesel
- les machines à pistons rotatifs à battement contrôlé (MPRBC), qui utilisent les rotations alternées d'un nombre pair de pistons.
- les turbines à gaz, qui consistent à faire tourner un arbre grâce à l'énergie cinétique issue de la détente dans une turbine de gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure.

Contrairement au moteur Diesel, le mélange combustible d'un moteur à allumage commandé ne s'enflamme pas spontanément lors d'une compression, mais nécessite l'action d'une étincelle provoquée par le système d'allumage. Une bougie provoque l'arc électrique enflammant les gaz dans la chambre de combustion, une bobine produit les hautes tensions nécessaires à la création de l'étincelle et il y a un système de commande de l'allumage (rupteur ou système électronique). Les principaux moteurs à allumage commandés sont :

- le moteur Wankel, dit « à piston rotatif », qui utilise un cycle quatre temps avec un piston « triangulaire »
- le moteur à deux temps
- le moteur à quatre temps

Les voitures électriques existent depuis 1881 mais ont rapidement été supplantées par les véhicules à essence, plus autonomes. Cependant, il est à noter que c'est une voiture électrique, la Jamais Contente de l'ingénieur belge Camille Jenatzy, qui dépasse pour la première fois les 100 km/h en atteignant 105,88 km/h le 1er mai 1899.

Depuis une dizaine d'années, ces véhicules sont l'objet de nombreuses recherches visant à augmenter l'autonomie de leurs batteries et à faciliter leur recharge, ce qui leur assurerait une

utilisation potentielle par un plus large public. Ces automobiles sont mues par la force électromotrice de moteurs électriques, et alimentées soit par une batterie d'accumulateurs, soit par une pile à combustible (hydrogène ou méthanol), soit par un moteur thermique générateur (Wankel, Stirling, ou classique). Elles fonctionnent grâce à la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique par ces moteurs. Les voitures à moteur hybride associent plusieurs sources d'énergie, généralement un moteur thermique et un moteur électrique. Elles comportent deux moteurs distincts, contrairement aux véhicules électriques. Le premier modèle, la Toyota Prius, a été commercialisé en 1997 au Japon uniquement.

II. Etude thermodynamique

1. Cycle de Beau de Rochas – moteur à quatre temps

a. Principe

Ce cycle a été défini par Beau de Rochas en 1862 puis mis en œuvre par Étienne Lenoir en 1883. Il est composé de quatre étapes au cours desquelles le piston effectue quatre mouvements linéaires :

- admission du mélange
- compression
- combustion/détente
- échappement

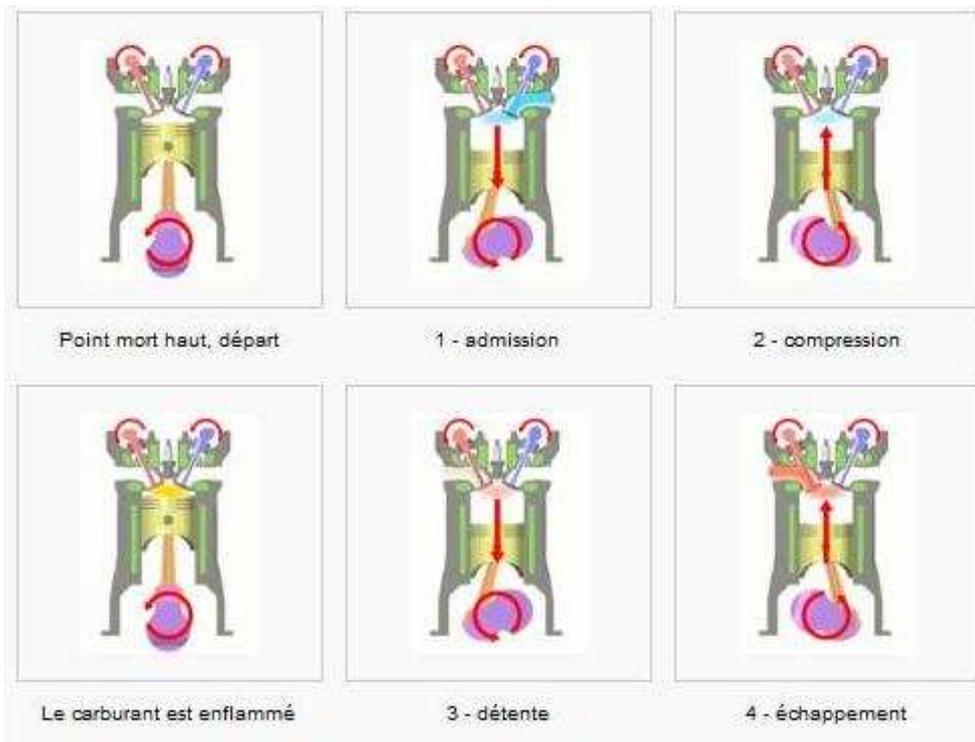
Le cycle commence à un point mort haut, où le piston est à son point le plus élevé. (image 1)

Pendant l'admission, le piston descend et permet au mélange d'air et de carburant d'être aspiré dans le cylindre via la soupape d'admission. (image 2)

Lors de la compression, la soupape d'admission se ferme, le piston remonte, comprimant ainsi le mélange admis. (image 3)

Au moment de la combustion, le mélange air-carburant est enflammé par une bougie d'allumage, aux environs du deuxième point mort haut (remontée complète du piston) (image 4). La pression des gaz portés à haute température force le piston à descendre, provoquant une détente des gaz (image 5). Ce mouvement est le seul temps moteur du cycle (produisant de l'énergie directement utilisable).

A l'échappement, les gaz brûlés sont évacués du cylindre via la soupape d'échappement poussée par la remontée du piston. (image 6)



b. Etude thermodynamique

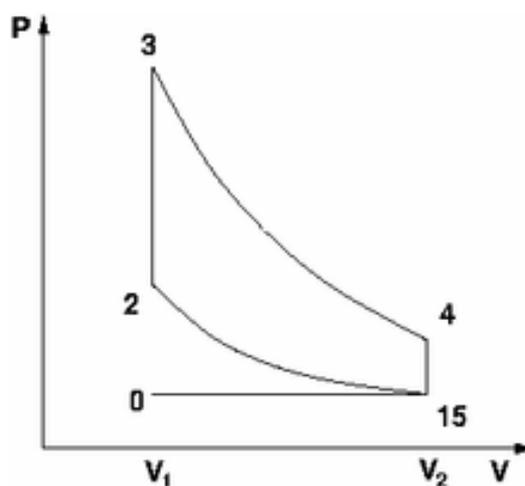


Diagramme de cycle de Beau de Rochas

On modélise le cycle par des transformations particulières :

- Admission 0-1 : Isobare
- Compression 1-2 : Adiabatique
- Combustion 2-3 : Isochore, Détente 3-4 : Adiabatique
- Ouverture de la soupape 4-5 : Isochore,
- Echappement 5-0 : Isobare

2. Cycle deux temps

Le cycle d'un moteur deux temps est constitué de deux mouvements linéaires du piston au lieu de quatre lors d'un cycle de Beau de Rochas, bien que les quatre mêmes opérations (admission, compression, combustion/détente et échappement) soient toujours effectuées. Ainsi, on a un cycle moteur par tour au lieu d'un tous les deux tours.

Les deux étapes sont les suivantes :

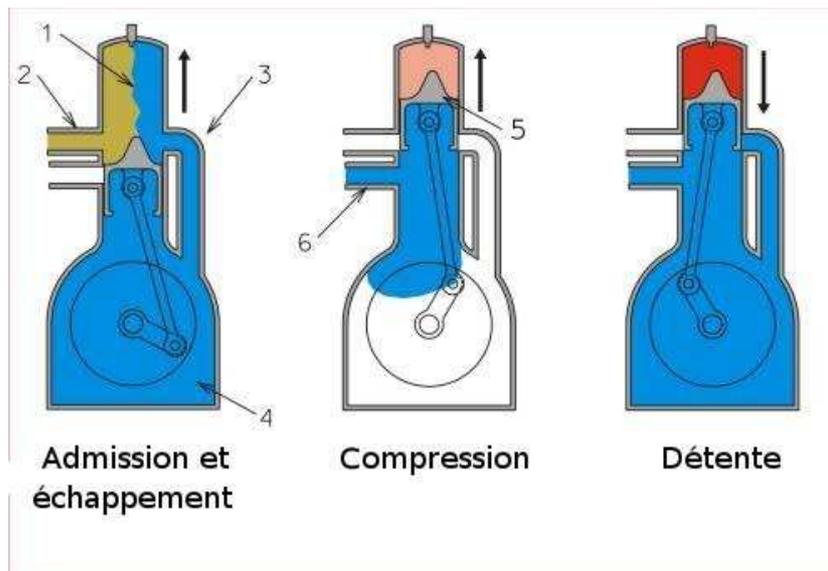
- admission/compression
- combustion-détente/échappement (balayage des gaz)

Lors de la détente, le piston (5) est au point mort haut. La bougie initie la combustion et le piston descend en comprimant en même temps le mélange présent dans le carter, sous le piston. C'est la partie motrice du cycle, le reste du parcours sera dû à l'inertie créée par cette détente. Lors de cette descente du piston, l'entrée (6) du mélange dans le carter se ferme.

A l'échappement, le piston arrivé au point mort bas débouche les lumières d'échappement (2) et d'arrivée de mélange dans le cylindre (3) : le mélange pénètre dans le cylindre et chasse les gaz de la combustion (zone 1). Il s'agit de l'étape d'admission - échappement.

Au moment de la compression, le piston remonte et comprime le mélange dans le cylindre. Il rebouche l'échappement (2) et l'entrée de mélange dans le cylindre (3), tout en créant une dépression dans le carter (4) qui va permettre l'admission du mélange air-essence par la lumière d'arrivée (6) dont l'entrée a été libérée par la position du piston proche du point mort haut.

Une fois arrivé à nouveau au point mort haut, le cycle peut recommencer à partir du premier point.



3. Comparaison deux temps-quatre temps

Le principal inconvénient du moteur deux temps est la distance courte entre la charge fraîche et les gaz brûlés, qui induit une perte d'hydrocarbures imbrûlés. L'injection directe, qui consiste à balayer le cylindre avec de l'air pur et à n'injecter le carburant qu'à la fin, permet de résoudre ce problème. De plus, l'huile nécessaire à la lubrification du cylindre se mélange avec le carburant, et est donc émise dans l'atmosphère, ce qui n'est (presque) pas le cas pour le 4 temps. Ayant deux fois plus de combustions à régime égal qu'un 4 temps, le cylindre a tendance à chauffer, ce qui entraîne des perlage de bougie (qui n'existe plus avec les huiles et les bougies actuelles), qui peuvent être évités grâce à un système de refroidissement efficace (liquide) et en utilisant des bougies de bonne qualité.

Avec un carburateur ou une injection indirecte, le mélange du carburant avec l'air a lieu avant l'admission. Un cycle à quatre temps a alors un meilleur rendement que le cycle à deux temps mais à cylindrée égale est moins performant. En outre, un moteur à 4 temps nécessite une distribution complexe (soupapes, arbres à cames...), et parmi ces 4 temps, un seul est moteur (la détente) ; le piston fournit de l'énergie mécanique une fois tous les 2 tours et donc il se produit des irrégularités au niveau du couple du moteur. Enfin, les moteurs 4 temps sont longs et coûteux à réparer à cause du nombre de pièces nécessaires à leur fonctionnement.

4. Composition de l'essence

Parmi les alcanes contenus dans l'essence, deux jouent un rôle particulier : l'octane C_8H_{18} et l'heptane C_7H_{16} . Ils possèdent en effet des propriétés radicalement différentes du point de vue de leur tendance à l'auto-allumage.

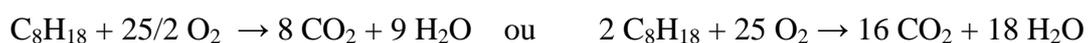
Un mélange d'air et de vapeur d'octane va difficilement s'enflammer spontanément, ce sera donc bien la bougie qui provoquera l'allumage et créera au moment prévu une déflagration, c'est-à-dire une flamme de pré-mélange qui se propage dans le mélange à une vitesse inférieure à celle du son (subsonique). C'est donc un mélange riche en octane qui est utilisé dans les moteurs à allumage commandé.

Au contraire, avec l'heptane, l'auto-allumage est facile : pour des taux de compression élevés, l'allumage aura lieu en volume dans le cylindre avant que la bougie n'intervienne. Ce phénomène caractéristique des moteurs à allumage commandé s'appelle le cliquetis et provoque la formation d'ondes de choc dans le cylindre, d'où le bruit caractéristique. Dans le pire des cas, il peut y avoir création d'une détonation qui peut aller jusqu'à faire fondre le piston, le front de flamme se déplaçant plus vite que le son en se couplant à l'onde de choc.

L'indice d'octane mesure la résistance d'un carburant utilisé dans un moteur à allumage commandé à l'auto-allumage (allumage sans intervention de la bougie). Ce carburant est très généralement l'essence.

On dit qu'un carburant a un indice d'octane de 95 par exemple, lorsque celui-ci se comporte, du point de vue de l'auto-allumage, comme un mélange de 95 % d'un iso-octane, le 2,2,4-triméthylpentane, qui est résistant à l'auto-inflammation (son indice est de 100 par définition) et de 5 % de n-heptane, qui s'auto-enflamme facilement (son indice est de 0 par définition).

La formule simplifiée de la réaction de combustion de l'octane est :



5. Chimie de la combustion

Le terme de combustion désigne une réaction chimique à évolution rapide accompagnée d'émission lumineuse et d'un important dégagement de chaleur : la flamme.

a. Classification des différentes variétés de combustion

Les processus d'inflammation, c'est-à-dire d'initiation de la combustion, doivent être séparés du processus de propagation de la flamme :

Le processus d'inflammation nécessite un apport d'énergie extérieure au processus : chauffage des parois du réacteur contenant le mélange, compression adiabatique du mélange par une onde de choc ou un rétrécissement du volume, création d'un plasma entre deux électrodes.

Le processus de propagation de la flamme s'effectue sans intervention externe sur le système. Les couches successives du mélange combustible s'enflamment en utilisant l'énergie dégagée par la combustion des couches précédentes.

b. Différentes formes de combustion

Homogène : comburant¹ et carburant sont pré mélangés dans un rapport donné. Exemples : moteur à allumage commandé, chalumeau.

Hétérogène : la combustion a lieu à la frontière entre comburant et carburant. Comburant et carburant peuvent être tous les deux ou l'un ou l'autre : solides, liquides ou gazeux.

Stratifiée : comburant et carburant sont pré-mélangés dans un rapport variable compris entre une valeur permettant l'inflammation et le rapport caractérisant la présence de comburant pur. Exemple : moteur à charge stratifiée.

c. Combustion en milieu homogène

Combustion lente : Dans une oxydation à vitesse limitée partant du point d'allumage, la quantité de chaleur apportée par la combustion est égale à la quantité de chaleur transférée hors du réacteur. Exemple : mélange à basse température et/ou à excès d'air important.

Déflagration : La quantité de chaleur dégagée par la combustion dans le réacteur est supérieure à la quantité de chaleur transférée à l'extérieur du système en réaction (la température du mélange frais ou la concentration en carburant est suffisamment élevée), la combustion s'entretient d'elle-même, la flamme est en mesure de quitter la zone d'allumage sans extinction. Le processus de diffusion de la chaleur entre la flamme et le mélange frais peut être lié à un processus de diffusion moléculaire : flamme laminaire ou de diffusion turbulent (c'est-à-dire par masse et volume finis) : flamme turbulente.

Détonation : À l'arrière du front d'une onde de choc dans un mélange combustible, il peut y avoir une flamme créée par l'augmentation de pression et de température du mélange frais dans le front de l'onde de choc. La flamme se déplace avec le front de l'onde de choc.

¹ corps chimique qui a pour propriété de permettre la combustion d'un combustible. Dans notre cas, il s'agit du O₂.

III. Normes de pollution et solutions apportées

1. Les normes européennes de pollutions

Les moteurs sont soumis à des normes d'émission Euro qui fixent les limites maximales de rejets polluants pour les véhicules roulants. Il s'agit d'un ensemble de normes de plus en plus strictes s'appliquant aux véhicules neufs. L'objectif est de réduire la pollution atmosphérique due au transport routier.

Les émissions de CO₂ (résultant naturellement de la combustion de matières carbonées) ne sont pas prises en compte dans cette norme car il ne s'agit pas d'un gaz polluant direct (respirer du CO₂ n'est pas toxique pour l'homme et les animaux). La surveillance des émissions de CO₂ par les véhicules fait l'objet d'autres travaux de la part de l'Union européenne.

La législation européenne est de plus en plus sévère sur les rejets des moteurs Diesel. Les normes d'émissions « Euro » se succèdent. La mise en œuvre se fait dans des délais légèrement décalés pour les moteurs Diesel et essence

- Euro 0 : véhicules mis en service après 1988 ;
- Euro 1 : véhicules mis en service après 1993 ;
- Euro 2 : véhicules mis en service après 1996 ;
- Euro 3 : véhicules mis en service après 2000 ;
- Euro 4 : véhicules mis en service après 2005 ;
- Euro 5 : après septembre 2009 pour la réception et janvier 2011 pour l'immatriculation de véhicules neufs ;
- Euro 6 : après septembre 2014 pour la réception et septembre 2015 pour l'immatriculation de véhicules neufs.

Les trois générations de normes européennes pour les véhicules légers Euro1 (1992), Euro2 (1996) et Euro3 (2000) ont eu un impact sensible sur les émissions des véhicules commercialisés dans l'Union et ont ainsi contribué à une forte réduction des pollutions locales. La norme Euro1, qui correspond à l'arrivée des pots catalytiques pour les voitures à essence, a marqué le début d'une tendance constante vers l'amélioration des performances. La norme Euro4 « Automobile » est entrée en vigueur le 1er janvier 2005. Tous les véhicules produits après cette date émettent globalement 2 fois moins de polluants que les véhicules soumis à la norme Euro 3.

Les émissions de polluants sont mesurées durant un cycle de conduite normalisé appelé NEDC (New European Driving Cycle) qui dure 20 minutes. Il comprend une première phase de conduite typée "ville" suivi d'une phase de conduite plus rapide typée "route". La vitesse moyenne durant ce cycle est de 33 km/h.

Si ces normes doivent être encore abaissées pour continuer à limiter les émissions des véhicules neufs, on estime que les véhicules les plus anciens (20% du parc automobile) sont encore responsables de 60% des émissions polluantes. Le renouvellement du parc s'effectuant sur un temps de rotation de 25 à 30 ans pour les voitures et de 7 à 12 ans pour les 2 roues, il faut toujours un temps de latence avant qu'on puisse observer les effets des normes sur l'environnement.

Limites d'émissions UE pour les Véhicules Particuliers - en g/km

Classe	Normes	Année		CO	HC	HCNM	HC+NOx	NOx	Particules
		NT	TT						
Diesel									
	Euro 1	1992		2,720	-		0,970	-	0,140
	Euro 2 - IDI	1996		1,000	-		0,700	-	0,080
	Euro 2 - DI	1999		1,000	-		0,900	-	0,100
	Euro 3	01/2000	01/2001	0,640	-		0,560	0,500	0,050
	Euro 4	01/2005	01/2006	0,500	-		0,300	0,250	0,025
	Euro 5	09/2009	01/2011	0,500	-		0,230	0,180	0,005
	Euro 6	09/2014	09/2015	0,500	-		0,170	0,080	0,005
Essence									
	Euro 1	1992		2,720	-		0,970	-	-
	Euro 2	1996		2,200	-		0,500	-	-
	Euro 3	01/2000	01/2001	2,300	0,200		-	0,150	-
	Euro 4	01/2005	01/2006	1,000	0,100		-	0,080	-
	Euro 5	09/2009	01/2011	1,000	0,100	0,068	-	0,060	0,005a
	Euro 6	09/2014	09/2015	1,000	0,100	0,068	-	0,060	0,005a

NT (nouveau type) les nouveaux modèles doivent respecter la norme à la date d'entrée en vigueur indiquée

TT (tout type) : tous les véhicules neufs doivent respecter la norme à la date d'entrée en vigueur indiquée

CO monoxyde de carbone ; HC hydrocarbures imbrûlés ; HCNM hydrocarbure non méthanique ; NOx oxydes d'azote

a : pour moteur à Injection Directe d'Essence mélange pauvre seulement

Note : dès 2000, suppression dans le cycle d'essai des 40 premières secondes de mise en température moteur

Ces normes créent une vive polémique puisqu'elles évoluent régulièrement et forcent les constructeurs de moteurs à modifier les technologies employées ; aussi, contestent-ils les valeurs limites ou demandent-ils des délais complémentaires pour leur mise en œuvre.

Les moteurs Diesel produisent des particules (quasiment absentes des émissions des voitures essence). Or, il est maintenant de plus en plus certain que les particules les plus fines (donc les moins massives) sont les plus toxiques. La norme actuelle ne mesurant que la masse des particules favorise donc en priorité l'élimination des particules les plus grosses, donc les moins toxiques (et, depuis l'installation quasi-systématique de turbocompresseurs sur les moteurs Diesel, les particules qu'ils rejettent sont devenues plus fines). C'est pourquoi la future norme Euro6 compte introduire une notion de nombre de particules émises, en plus de la limite de masse.

Comme la norme s'applique uniquement aux véhicules vendus neufs, certains revendeurs n'hésitent pas à faire immatriculer des voitures neuves avant la date butoir pour les revendre en occasion avec 0 km. D'un autre côté, les véhicules de plus de 2 500 kg (grosses berlines principalement), qui sont logiquement animés par un gros moteur et polluent donc en proportion, obtiennent régulièrement des délais supplémentaires avant de se mettre aux normes.

2. Les nouveaux moyens anti-pollutions

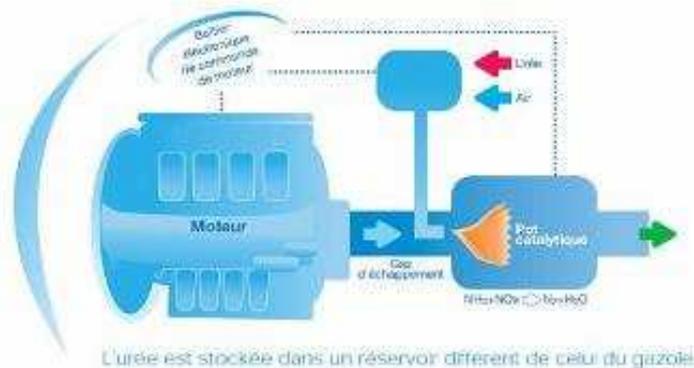
Dans l'objectif de diminuer la consommation de carburant, la solution est d'en injecter moins en proportion par rapport à l'oxygène. Mais ceci entraîne une élévation de la température pendant la combustion et donc une production d'azote.

C'est sur ce dernier point que les constructeurs concentrent principalement leurs recherches pour diminuer la pollution.

a. L'AdBlue

Les normes de la classe 5 ont été anticipées, du moins pour les émissions de NO_x , avec l'apparition de l'AdBlue. L'AdBlue est aujourd'hui utilisé par tous les véhicules poids lourds récents.

AdBlue est la marque commerciale sous laquelle est diffusée la solution AUS32 - Solution Aqueuse d'Urée à 32,5% - utilisée dans le processus de réduction catalytique sélective (SCR). Elle permet de convertir 85% des oxydes d'azote contenus dans les gaz d'échappement, en azote et en vapeur d'eau.



La réaction est : $\text{NH}_3 + \text{NO}_x \Rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$

La consommation de ce produit est de 1L pour 10 litres de gazole, le prix est sensiblement identique à celui du gazole.

b. EGR

Une injection haute pression diminue les particules formées lors de la combustion, tandis que l'EGR (Exhaust gas recirculation) fait baisser le taux d'oxydes d'azote en refroidissant une partie des gaz d'échappement qui est réintroduite dans le moteur avec l'air d'admission.

c. Le pot catalytique

L'inconvénient majeur du pot catalytique réside dans le fait que, comme sur un moteur à allumage commandé (moteur à essence), son efficacité n'intervient qu'après une plus ou moins longue période de chauffe (suivant la température ambiante extérieure). Ce phénomène pose le problème de l'adaptation des motorisations thermiques à la circulation urbaine qui se caractérise par des trajets plutôt courts, souvent insuffisants pour permettre au dispositif catalytique d'atteindre la température nécessaire à son efficacité. Certains pots catalytiques sont d'ailleurs équipés de systèmes favorisant leur montée en température.

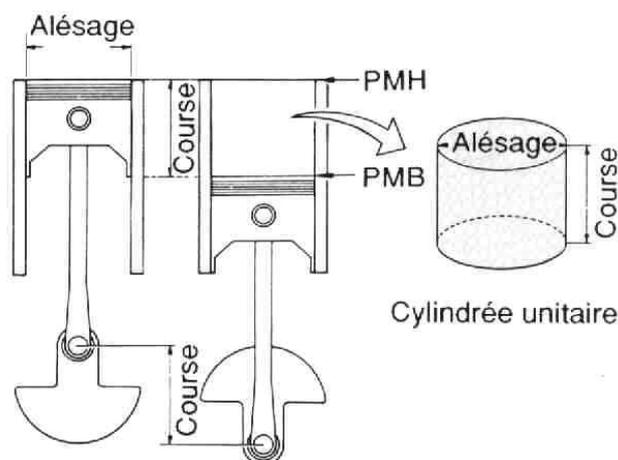
IV. Moteur étudié

De manière à simplifier l'étude, nous avons choisi de nous intéresser à un moteur deux temps. Mr SOULARD, du département Génie Mécanique et Productique de l'IUT du Mans, nous a donné un moteur deux temps de tondeuse, dont nous avons reproduit les différentes pièces grâce à SolidWorks 2010.

1. Caractéristiques du cylindre

Le cylindre est l'élément du moteur dans lequel se déplace le piston. Ses différentes caractéristiques sont :

- l'alésage, son diamètre interne
- la course du piston, soit la distance entre son point mort haut et son point mort bas.



Ces paramètres déterminent la cylindrée, qui est le volume déplacé par le mouvement du piston. Le taux de compression est le rapport entre le volume interne du cylindre lorsque le piston est au point mort bas et le volume au point mort haut.

En mécanique, le taux de compression d'un moteur à pistons, aussi appelé rapport volumétrique, est un rapport théorique de comparaison entre le volume de la chambre de combustion lorsque le piston est au point mort haut et le volume du cylindre lorsque le piston est au point mort bas.

$$(V_{\text{cyl}} + V_{\text{chambre}}) / V_{\text{chambre}}$$

Les moteurs modernes à allumage commandé ont un taux de compression souvent voisin de 10 et pouvant monter jusqu'à 13, et les Diesel ont un taux de compression allant en moyenne de 16 à 20 pour ceux à injection directe et 19 à 23 pour ceux à injection indirecte. Cette valeur est déterminée lors de la conception du moteur et reste invariable sur les moteurs conventionnels.

Le point mort haut (PMH) du piston de notre moteur est à 8,5 mm, et le point mort bas (PMB) à 46,7 mm. La distance entre le PMH et le PMB, qui correspond à la course, est donc de 38,2 mm. L'alésage est de 53,1 mm. La surface de la base du cylindre, considérée comme circulaire, est $S = \pi \times r^2$ avec $r = \text{alésage}/2$. Le volume du cylindre est $V = S \times \text{course}$ soit $V = \pi \times 53,1^2 \times 38,2 / 4 = 84,59 \text{ cm}^3$.

2. Fonctionnement de ce moteur deux temps

L'essence mélangée à de l'air est injectée par le dessous du moteur puis pénètre entre le piston et le haut du cylindre par les quatre lumières d'admission. Ce mélange est ensuite comprimé puis brûlé par l'étincelle que fournit la bougie dans la chambre de combustion, située sur la surface supérieure du cylindre. Lors de la détente, le piston est repoussé vers le bas du cylindre, et les gaz sont évacués par les trois lumières d'échappement ; le mouvement de translation du piston de haut en bas entraîne une rotation du vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle. Dans le cas d'un véhicule, ce mouvement serait communiqué aux roues, permettant ainsi son déplacement.



Cylindre complet avec les trois lumières d'échappement et l'emplacement du vilebrequin.



Intérieur du cylindre avec deux lumières d'admission, les trois lumières d'échappement et les deux autres lumières d'admission



Bougie d'allumage

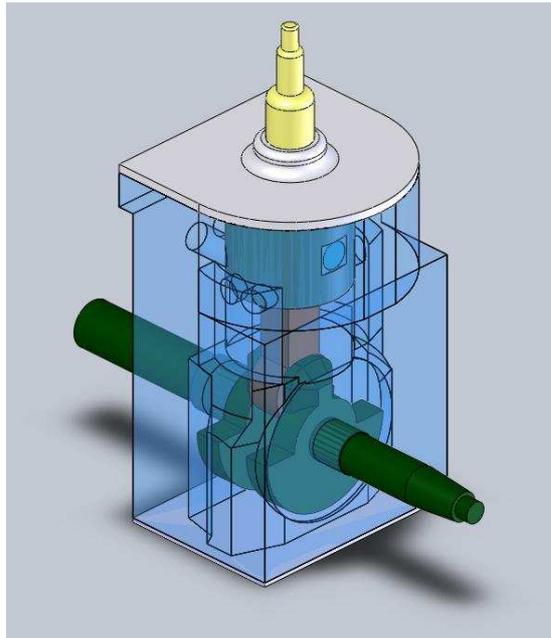


Haut de la chambre de combustion avec l'électrode de masse de la bougie

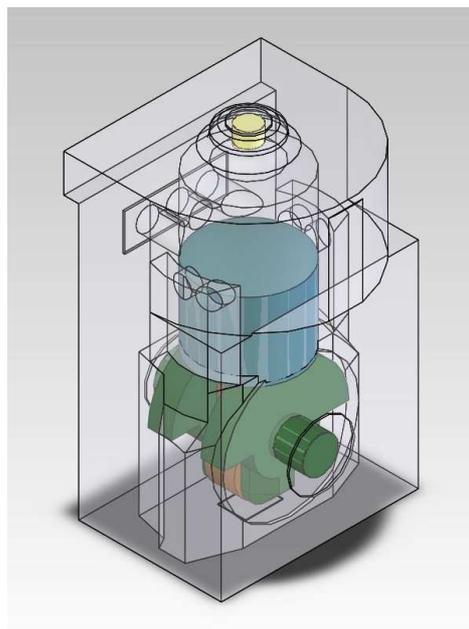
V. CAO et simulation du moteur avec SolidWorks

1. CAO

Nous avons représenté les six pièces du moteur sous SolidWorks avec leurs dimensions réelles : le corps, le vilebrequin, le piston, la bielle, la bougie et l'axe entre la bielle et le piston. Nous les avons ensuite assemblées puis enregistré le tout au format IGES.

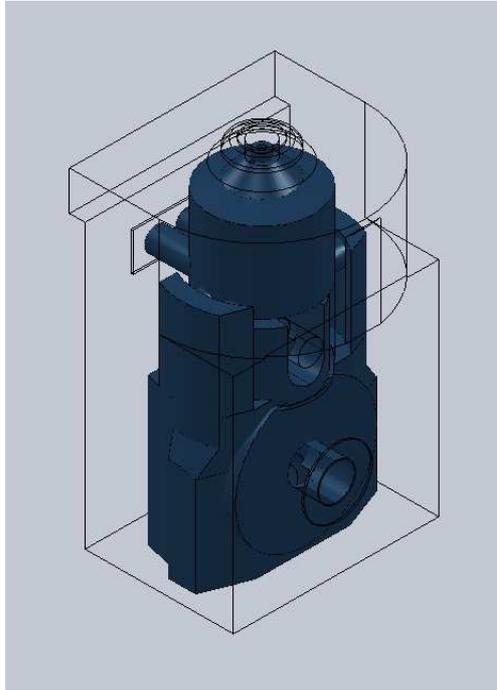


Nous avons, dans un premier temps, dessiné le moteur en respectant les cotations exactes et de manière réaliste, c'est-à-dire que nous avons laissé le vilebrequin et la bougie dépasser du corps du moteur mais nous avons dû fermer celui-ci complètement et obstruer les lumières de manière à avoir un volume fini dans lequel introduire le fluide. On obtient donc cet assemblage :



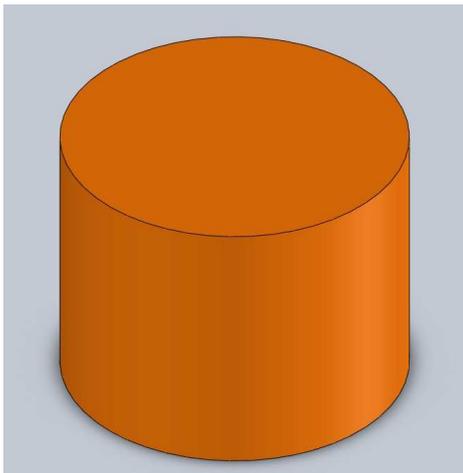
2. Etude de la turbulence

Nous avons étudié l'influence de différentes formes de pistons sur la turbulence du fluide avec le module de mécanique des fluides FloXpress de Solid Works, qui sert uniquement de pré-étude pour ce type de problèmes. La géométrie utilisée est celle représentée ci-dessus.

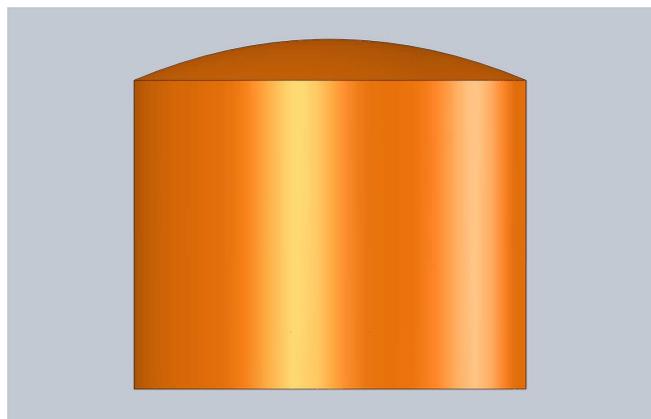


Volume fluide considéré par le logiciel

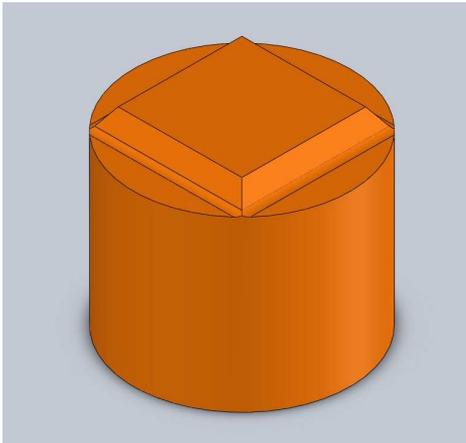
Nous avons travaillé avec 4 types de pistons pour étudier l'influence de la forme du piston sur la turbulence :



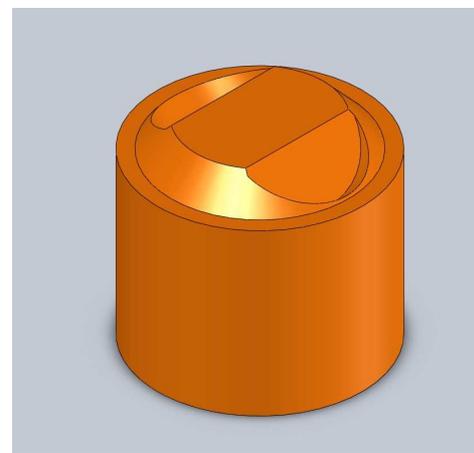
Piston à tête plate correspondant à notre moteur



Piston à tête bombée



Piston d'une Aston Martin

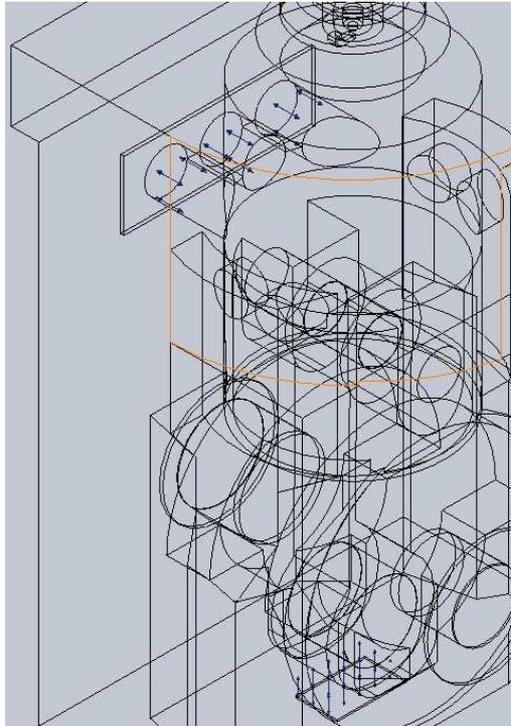


Piston d'une Porsche

Ces dernières formes ont été dessinées approximativement puisque nous n'avons pas les dimensions exactes des pistons.

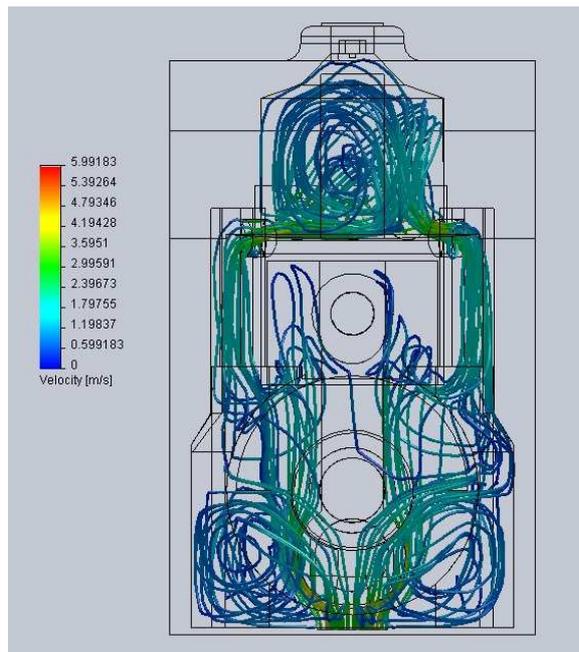
a. Conditions aux limites

Une pression de 131225 Pa est imposée sur la surface du bas et la sortie est à pression atmosphérique. Avec ce module, on ne peut faire entrer que de l'air ou de l'eau ; nous avons opté pour ce deuxième fluide. L'étude se fait avec le piston en position basse.



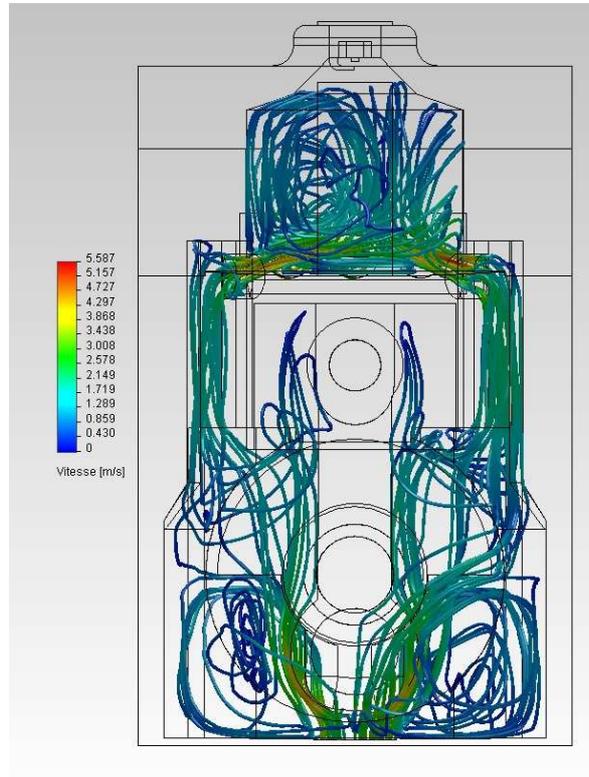
b. Résultats

– Piston à tête plate



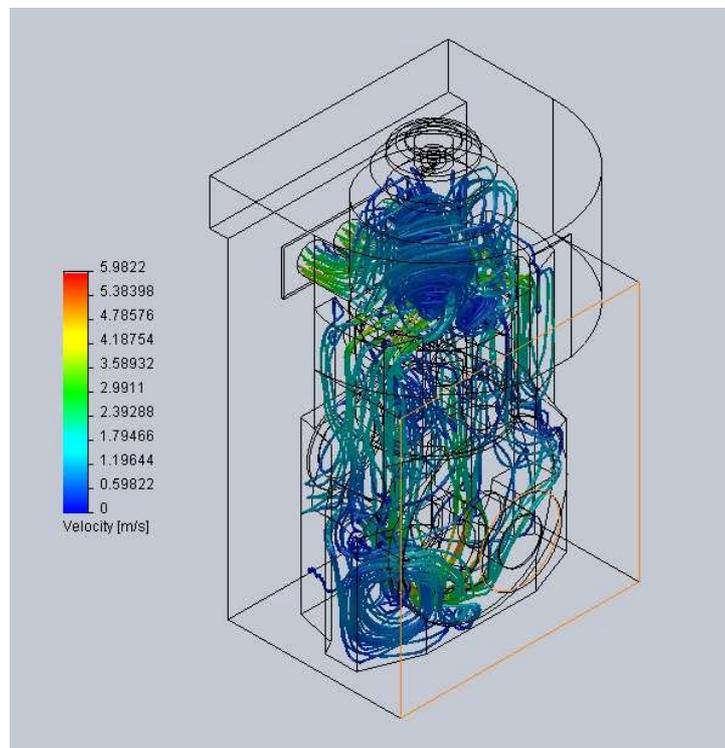
On remarque que la turbulence est relativement homogène dans la chambre de combustion.

– Piston à tête bombée



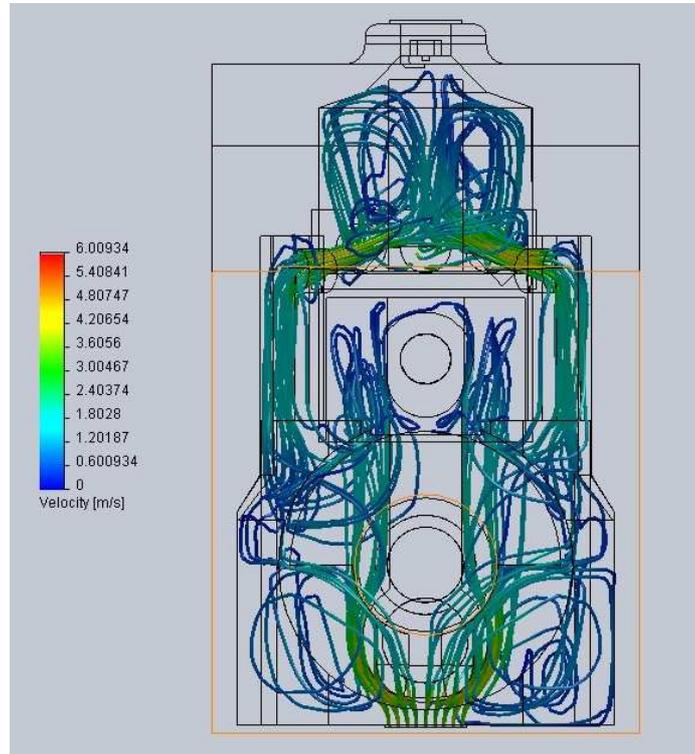
On remarque que la turbulence est très peu changée par rapport à la précédente.

– Piston de l'Aston Martin



La forme du piston entraîne un « tourbillon » très important dans la chambre de combustion.

– Piston de la Porsche



On observe deux turbulences, ce qui a priori devrait améliorer le mélange.

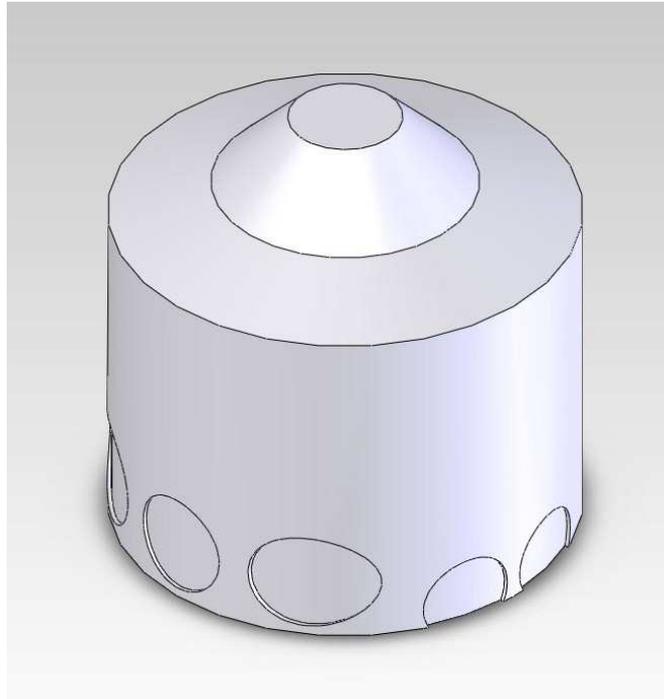
VI. Etude de la combustion avec Star-CD

1. Maillage de la chambre de combustion

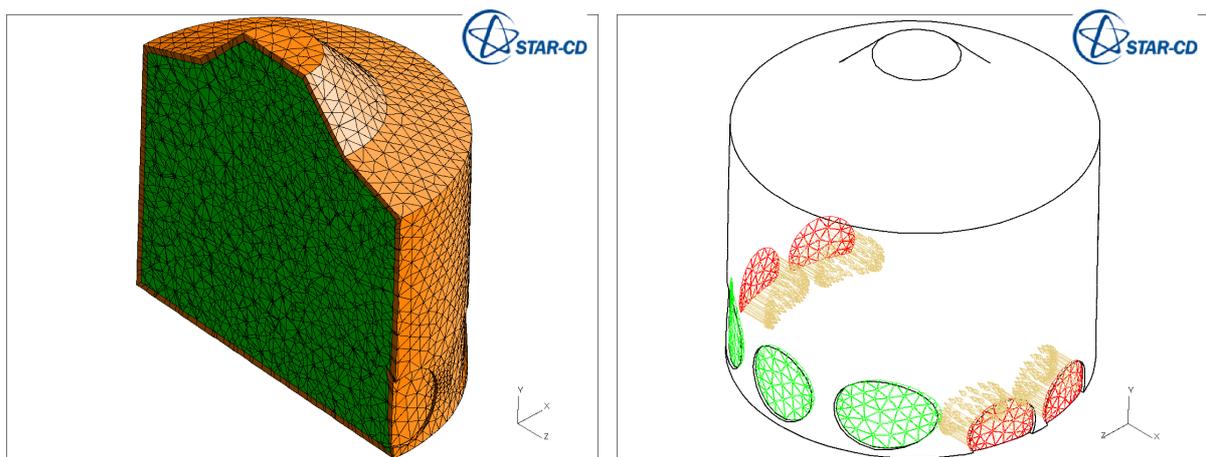
L'étude de la combustion a été réalisée grâce à différents modules de star cd. Le premier maillage est d'abord effectué en important le fichier IGES dans pro-surf, avec lequel on corrige également la géométrie, puis ce fichier est exporté en .stl. Avec le mesh wizard de pro-amm, on réalise un second maillage avec les étapes suivantes :

- importation du fichier .stl
- préparation de la surface pour faciliter le maillage et suppression des détails inférieurs à la taille minimale d'élément choisie.
- génération de la couche limite qui est la frontière du domaine de calcul
- finesse du maillage : aux angles et aux sommets, les éléments doivent être plus petits, car les grandeurs physique varient fortement dans de telles zones
- création du maillage définitif
- extrusion de la couche limite en utilisant les règles de la modélisation par éléments de frontière
- affichage des statistiques : le nombre de mailles de fluide, le nombre de mailles générées par l'extrusion de la couche limite, et le nombre de mailles dont la création a échoué sont affichées

Cependant, nous n'avons pu mailler cette CAO avec le mailleur automatique. Donc nous avons dû simplifier notre étude et nous limiter à la partie supérieure du cylindre, avec la chambre de combustion et les lumières, et la représenter comme pleine, car en la représentant vide, star-cd introduisait du fluide dans les parois et non pas dans le cylindre. De plus, les lumières sont obstruées de manière à avoir un volume fluide fermé, mais leur contour est dessiné.



Chambre de combustion avec les empreintes des
 lumières d'admission et d'échappement



Ainsi, le fluide est bien introduit dans le cylindre (en vert). Puis, nous avons défini des entrées (inlets) de fluide au niveau des lumières d'admission avec une vitesse initiale de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (en rouge) et une sortie (outlet) par les trois lumières d'échappement (en vert).

De manière à nous familiariser avec l'utilisation de Star-cd, nous avons utilisé la partie 9 du tutoriel de Star-ccm pour réaliser une étude en statique, puis une injection de gouttelettes de carburant dépendante du temps. La complexité du modèle utilisé dans chaque cas est donc croissante.

2. Etude statique de la combustion du propane

Nous avons dans un premier temps réalisé une étude statique de la combustion du propane dans des conditions adiabatiques (sans perte de chaleur).

a. Descriptif

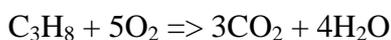
On utilise le modèle PPDF single fuel, basé sur la fonction densité de probabilité, avec un seul carburant et un seul oxydant, sans prémélange et on suppose que l'équilibre chimique est instantané.

Nous avons défini un carburant, le propane C_3H_8 , l'oxydant O_2 ainsi que les produits de la réaction (CO , CO_2 , H_2O), sans oublier le diazote N_2 , constituant principal de l'air.

On considère que l'air est un mélange de 76,8% de diazote et 23,2% de dioxygène en masse.

La pression du système est d'un bar et la température de 293K. On fait entrer par deux lumières d'admission adjacentes le propane et par les deux autres l'air (oxygène + azote), à la vitesse de 10 m.s^{-1} dans chaque cas.

La réaction de combustion du propane dans l'air est la suivante :

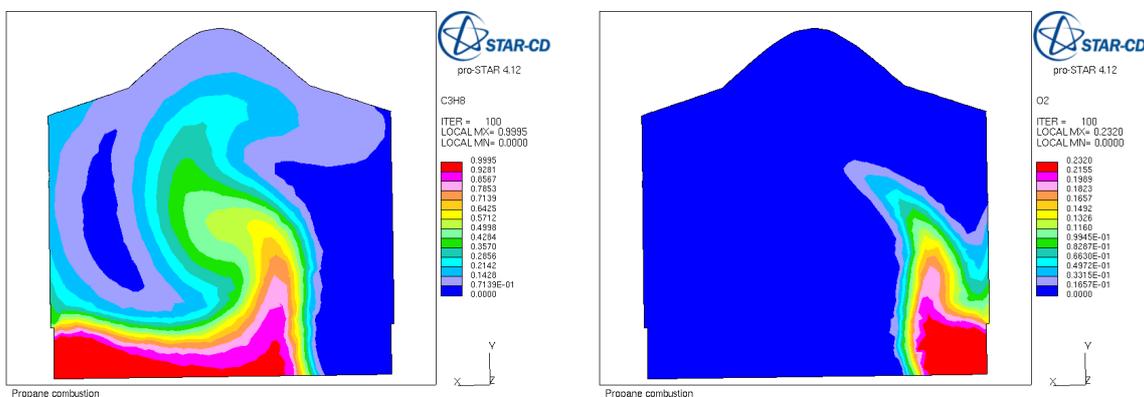


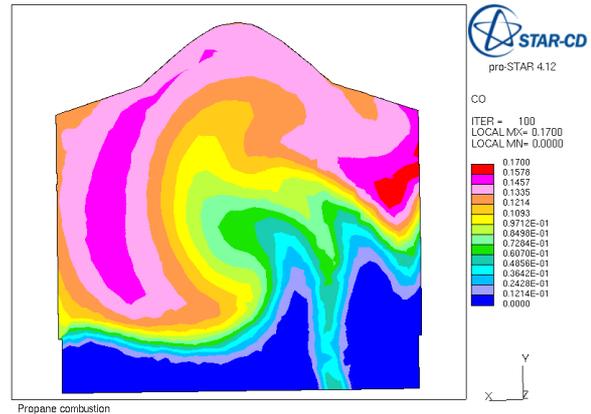
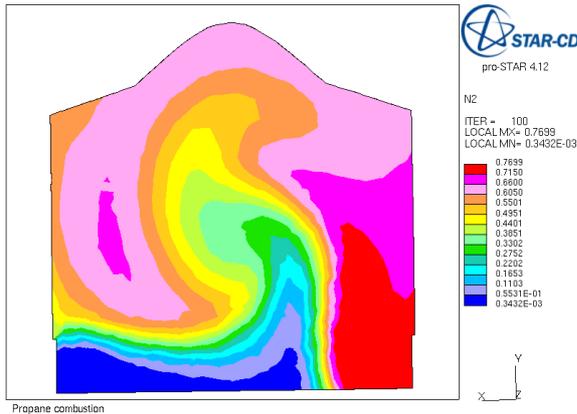
Cette analyse est assimilable à la combustion du propane et de l'oxygène par un chalumeau.

b. Résultats

– A l'entrée

On voit, ici, que le propane entre d'un côté et l'oxygène de l'autre.

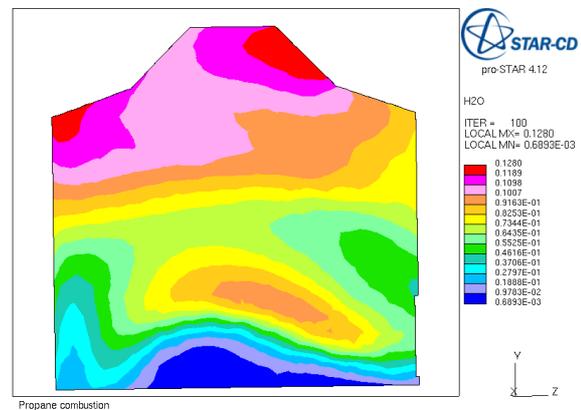
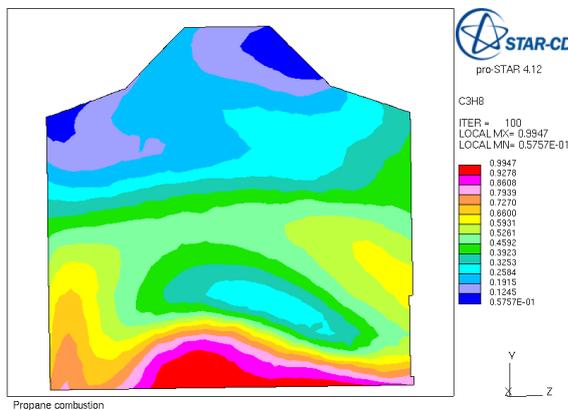
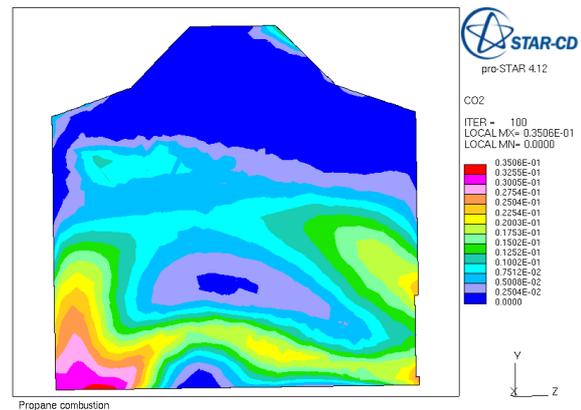
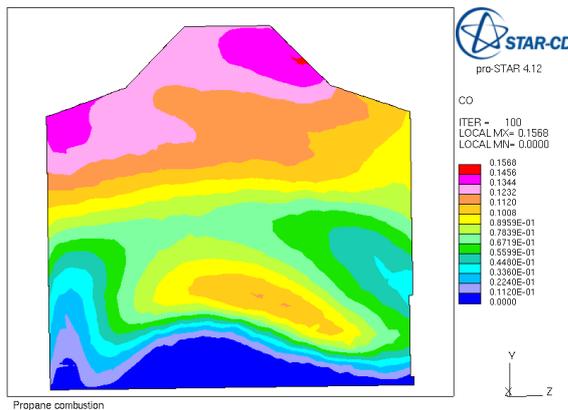




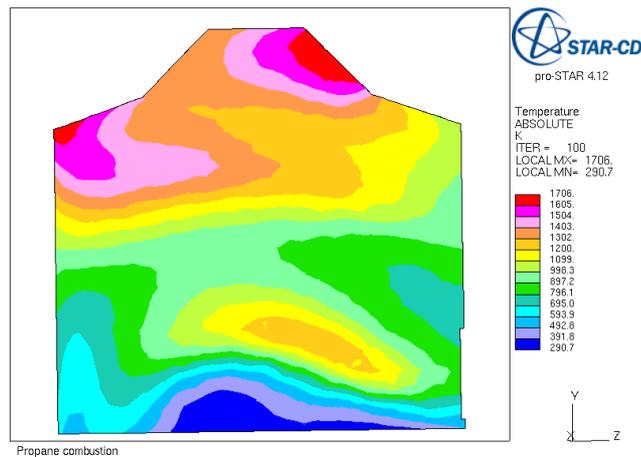
On remarque que l'azote est introduit avec l'oxygène et qu'il est diffusé dans la chambre, tandis que l'oxygène disparaît au fur et à mesure de sa combustion. De monoxyde de carbone (CO) est formé.

– En sortie

Le fait que nous ayons beaucoup plus de CO que de CO₂ signifie que la réaction est trop pauvre en oxygène.



Nous observons que là où la concentration de propane est pauvre, nous avons l'apparition des autres espèces chimiques formées.



La température monte jusqu'à 1706 K.

3. Combustion du propane en trois étapes

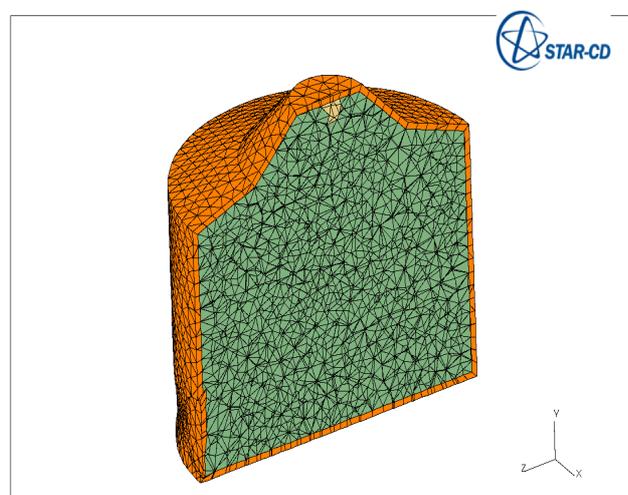
Dans cette seconde étude, le modèle utilisé est EDBR (Eddy Break Up), et la réaction de combustion du propane est cette fois réalisée en deux étapes : en premier lieu, la pyrolyse du propane, puis l'oxydation des produits de cette première réaction.

On utilisera donc les réactions suivantes :

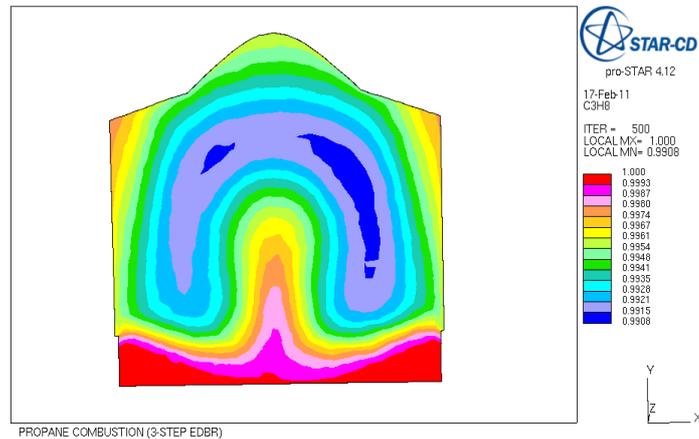
- $C_3H_8 + 1.5O_2 \rightarrow 3CO + 4H_2$
- $CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$
- $H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$

Comme dans l'étude précédente, le carburant est le propane (C_3H_8), l'oxydant O_2 et les produits de la réaction sont CO , CO_2 , H_2O . On définit nous-mêmes le lieu de la combustion, c'est-à-dire au centre de la chambre, emplacement auquel se situe normalement la bougie, en créant un ensemble de cellules. Le propane entre par les quatre lumières d'admission.

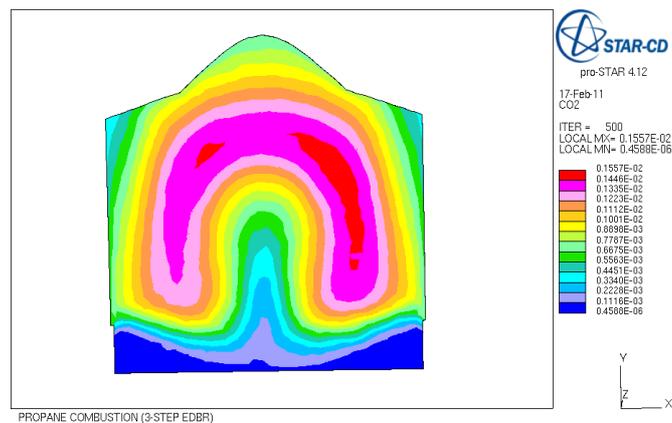
La zone de combustion est située au sommet de notre cylindre, au centre de la face supérieure, à peu près où se situe la bougie. Elle est représentée en jaune sur cette photo.



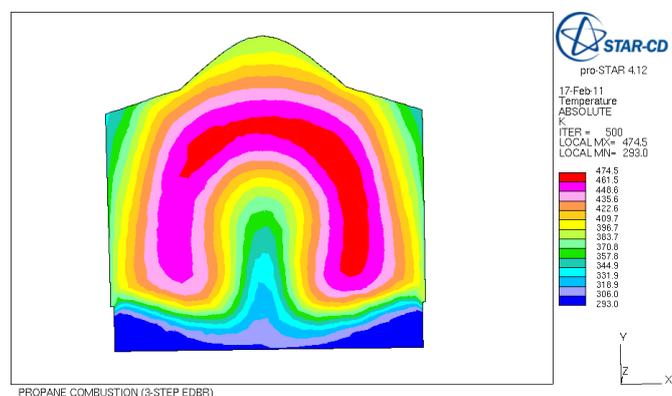
Cependant, cette étude n'a pas bien fonctionné, la combustion a eu lieu dans tout le cylindre et non pas à l'emplacement prévu. On observe que le propane a bien été introduit par toutes les lumières d'admission mais l'oxygène n'a pas été introduit. La combustion s'est donc faite uniquement avec l'oxygène présent dans la chambre donc la combustion a duré très peu de temps.



Les produits CO, CO₂, H₂ et H₂O sont formés au centre du cylindre et non pas à proximité de la bougie comme on le souhaiterait. L'oxygène a été entièrement consommé.



La température a peu augmenté, sa valeur maximale est de 474,5 K.



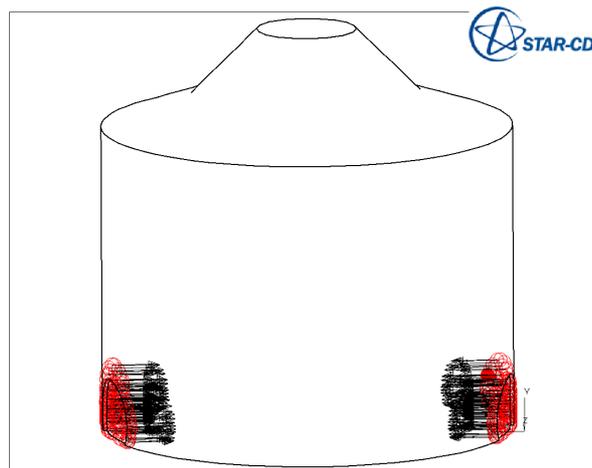
4. Injection de gouttelettes d'octane liquide

a. Principe

Dans le troisième tutoriel, le principe est le même que dans le précédent, mais en injectant des gouttelettes de toluène ; toutefois nous n'avons pas suivi celui-ci à la lettre : nous avons considéré la combustion de l'octane, et non pas celle du toluène. Les trois réactions chimiques qui entrent en jeu sont donc :

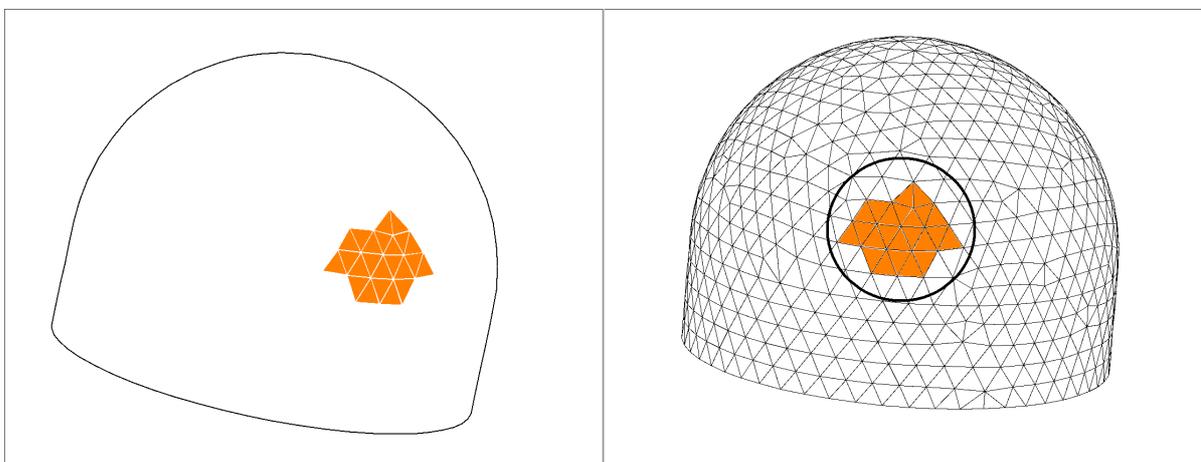
- Pyrolyse de l'octane $C_8H_{18(l)} + 4O_{2(g)} \rightarrow 8CO_{(g)} + 9H_{2(g)}$
- Oxydation du monoxyde de carbone $CO_{(g)} + 0.5O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$
- Oxydation du dihydrogène $H_{2(g)} + 0.5O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)}$

En outre, nous n'avons pas tenu compte des radiations, de manière à simplifier le calcul, et nous n'avons pas ajouté de subroutine Fortran. Nous avons également activé le calcul des émissions de suie (émises lors de combustions incomplètes) et de NO_x (formés par oxydation passive de l'azote par le dioxygène). Enfin, l'étude a été effectuée en fonction du temps, contrairement aux précédentes, qui étaient stationnaires.



injection des gouttelettes

N'ayant pas réussi à lancer le calcul avec notre chambre de combustion, nous avons dû utiliser une chambre de combustion simplifiée fournie par M. Calvayrac.

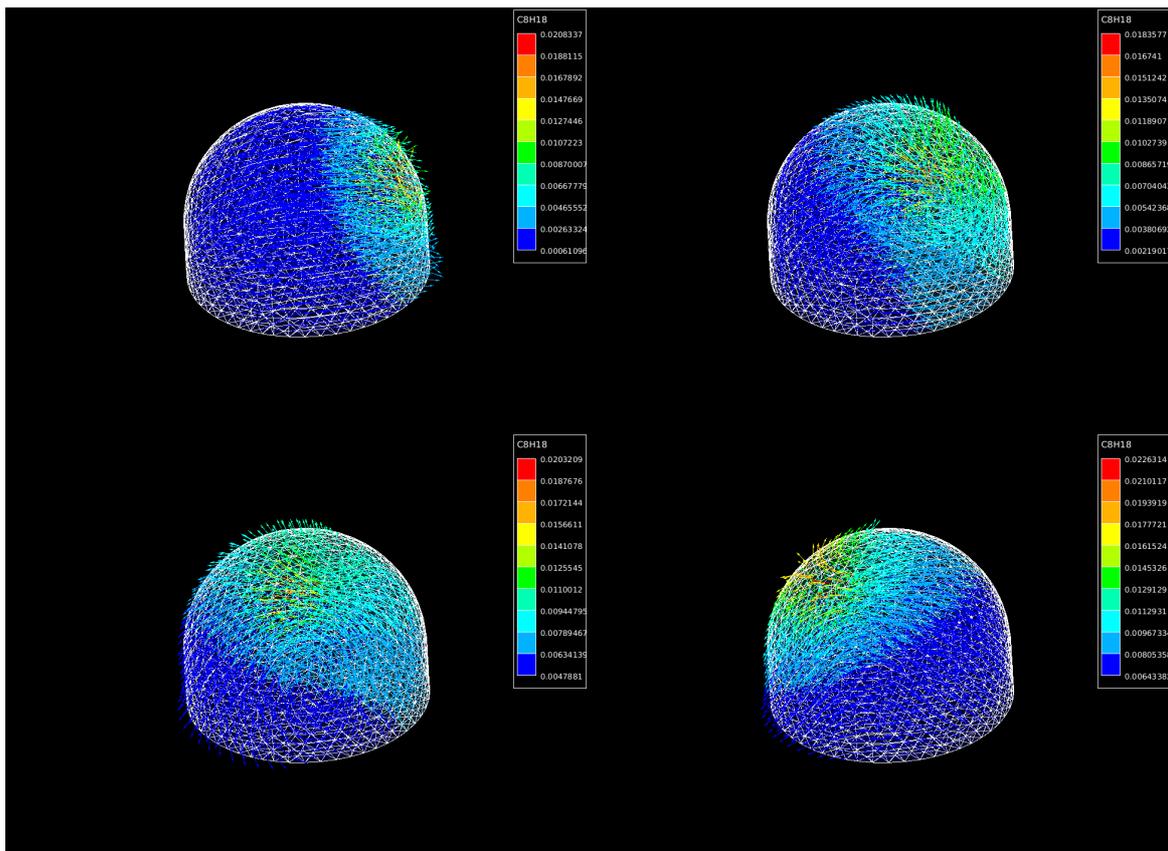


zone d'injection sur le modèle simplifié

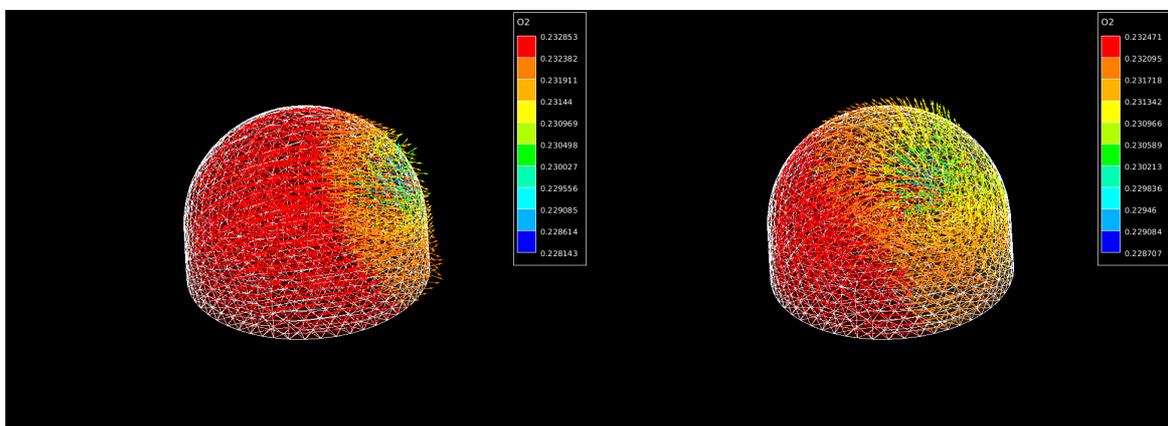
b. Combustion avec un excès de carburant

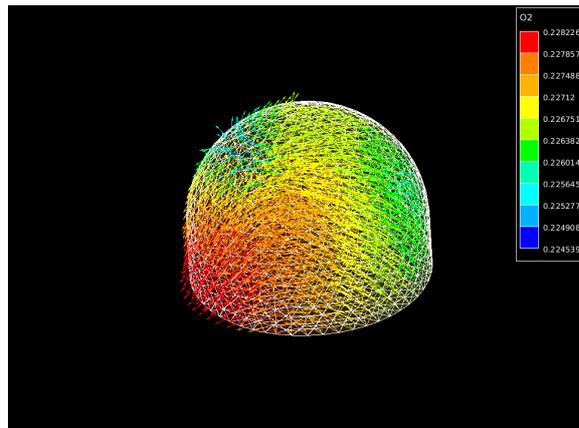
Le taux d'injection est de 10^{-6} kg.s⁻¹, l'injection se termine à 0.001 secondes, et on a 100 000 gouttelettes par point d'injection. L'étude est réalisée sur 0,001 secondes, et le pas varie entre 10^{-6} et 10^{-4} secondes. Pour visualiser l'évolution de la température dans la chambre de combustion ainsi que la formation des produits et la disparition des réactifs, nous avons utilisé pro-vis, de la suite Star-cd.

– Réactifs



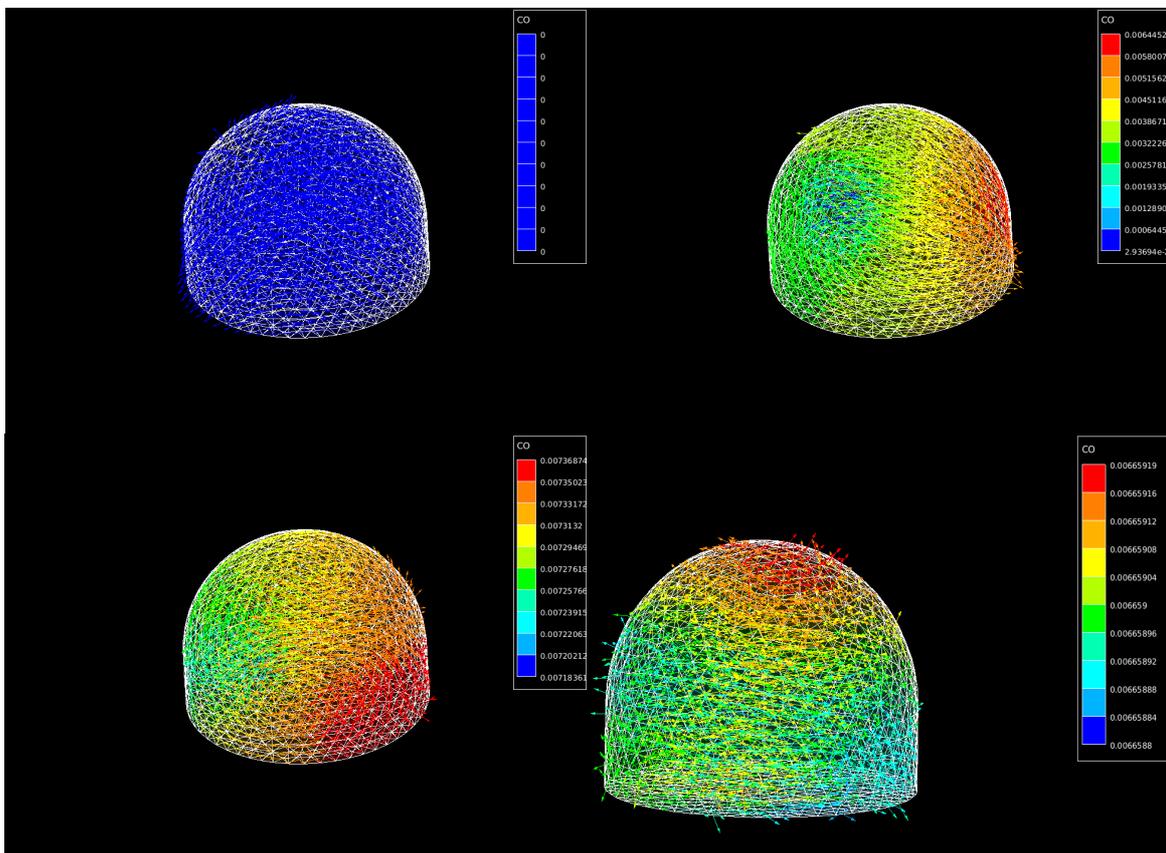
On observe l'injection puis la diffusion de l'octane liquide dans la chambre de combustion, ainsi que sa combustion.



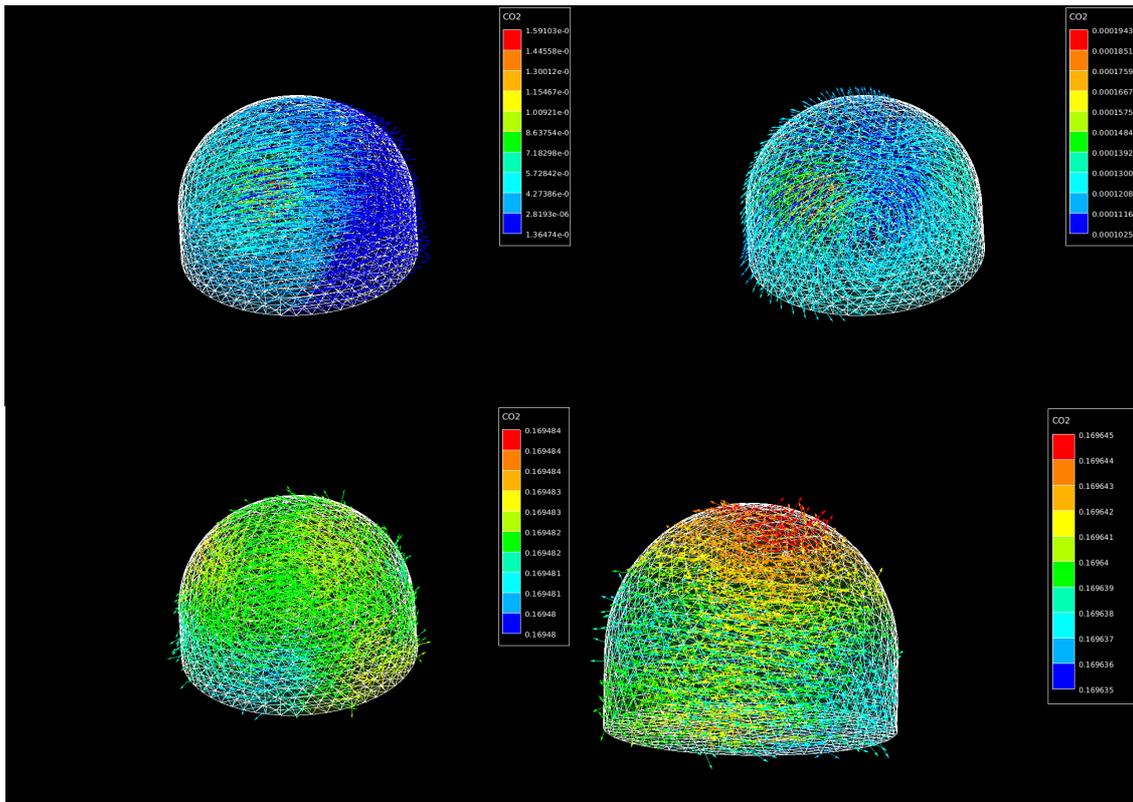


Parallèlement, on constate que l'oxygène est consommé par la combustion de l'octane au fur et à mesure de sa diffusion dans la chambre ; à la fin de la réaction, il a totalement réagi.

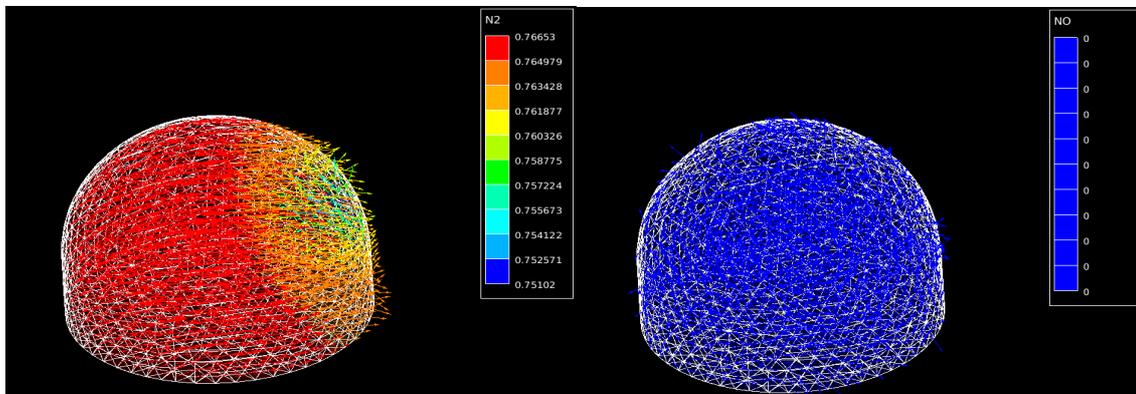
– Produits



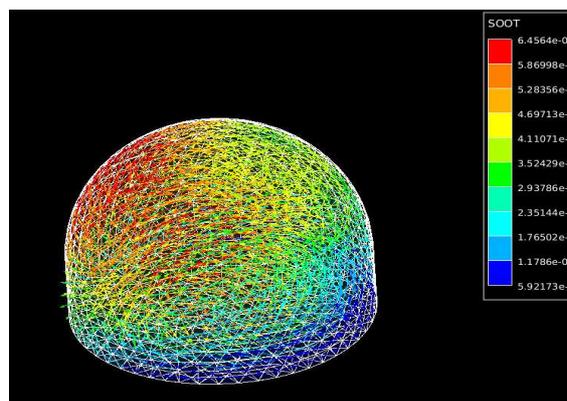
La combustion de l'octane forme du monoxyde de carbone.



Du dioxyde de carbone est formé à partir de ce monoxyde de carbone.



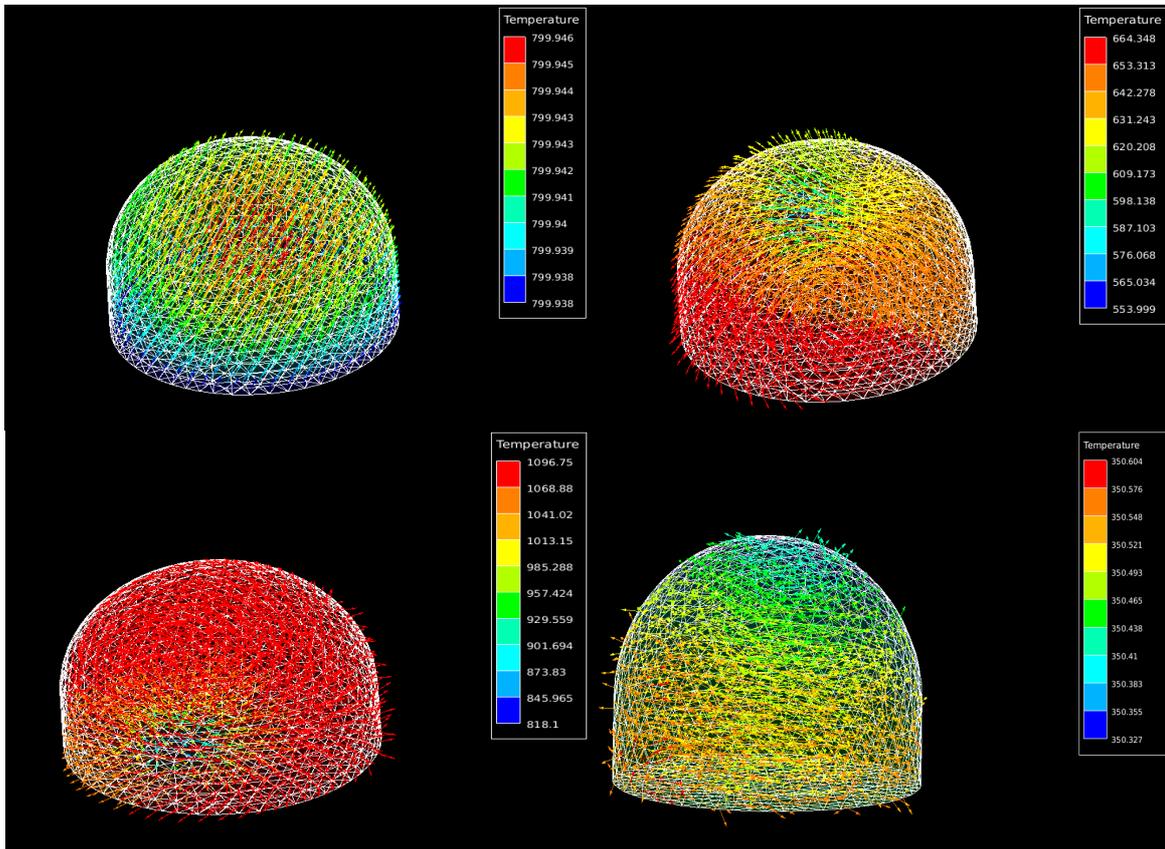
On constate que le diazote reste présent en grandes quantités et n'est pas vraiment affecté par la combustion. Le mélange étant riche en octane, nous n'avons pas de formation de NO_x.



En revanche, de la suie se forme, la quantité de dioxygène présente ne permettant pas d'assurer la combustion complète du carburant.

Il y a dû y avoir un problème concernant la formation d' H_2 et donc ensuite de H_2O car on ne constate pas la formation de ces deux produits.

– Température



La température initiale de 800K diminue lors de l'injection puis augmente fortement jusqu'à atteindre quasiment 1100K ; à la fin de la réaction, elle redescend à 350K.

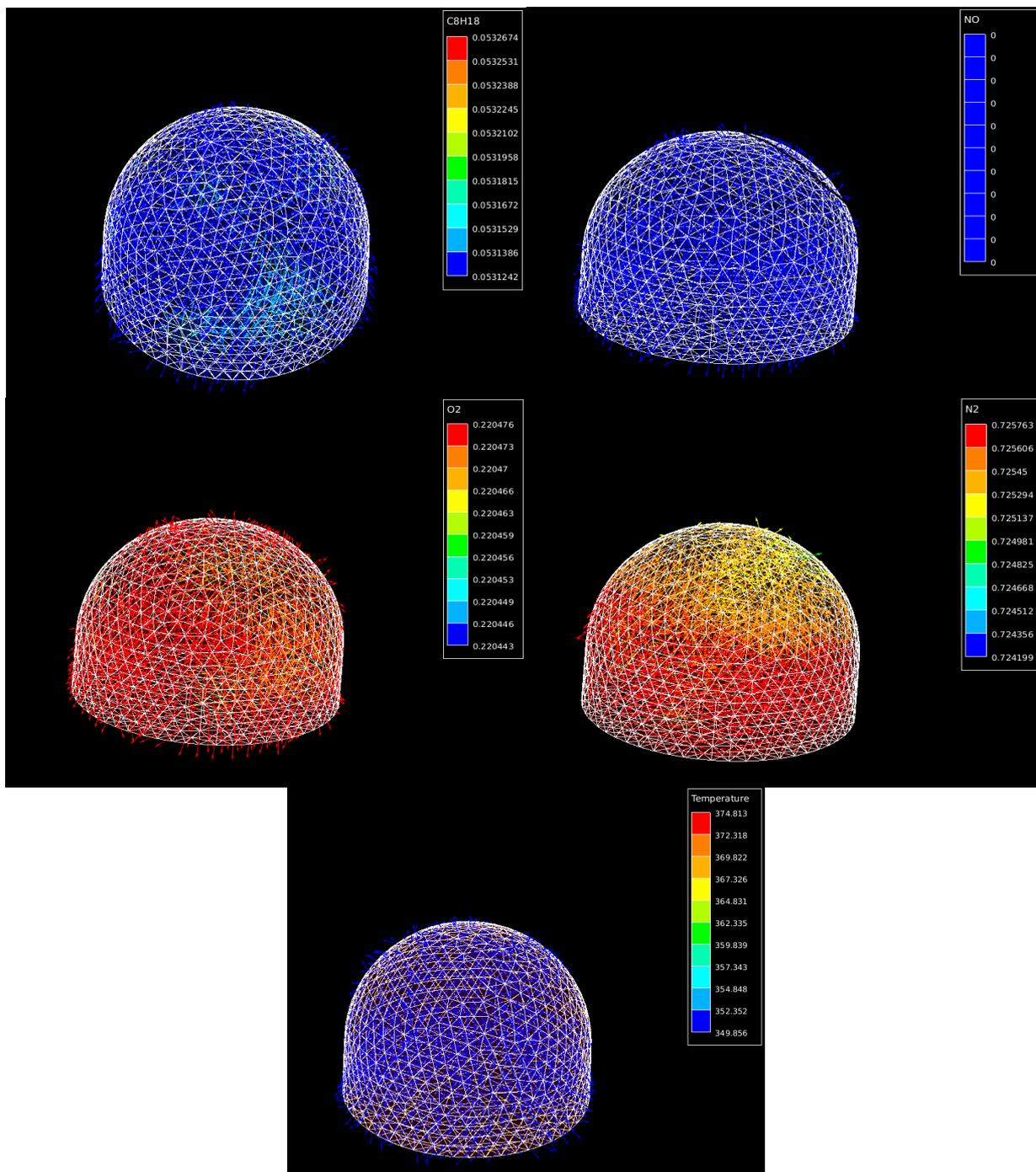
c. Combustion avec un défaut de carburant

Nous avons lancé une seconde simulation à partir du fichier de Mr Calvayrac en modifiant les paramètres d'injection de l'octane liquide et le pas de temps entre chaque calcul. Lors de ce calcul, nous avons diminué le nombre de gouttelettes injectées pour avoir un mélange pauvre en carburant.

Le taux d'octane est de $1e^{-7}$ kg.s⁻¹ avec un nombre de gouttelettes par point d'injection de 30000. On a fait une simulation de 0 à 0.001 seconde avec un pas de $1e^{-7}$ seconde et en commençant la première itération à $5e^{-5}$ seconde, cette dernière valeur n'étant pas judicieuse puisque, comme on le verra, la combustion commence dès le début de la simulation.

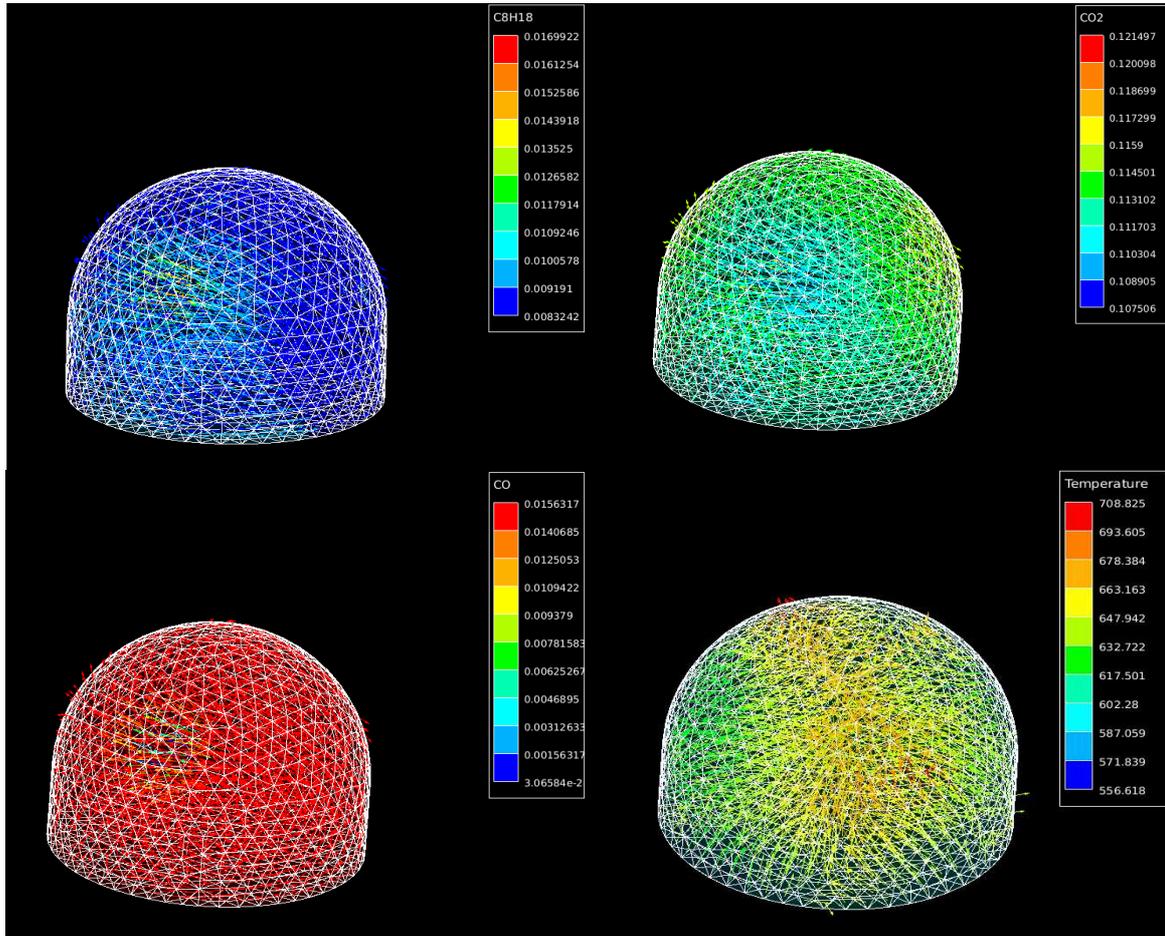
On va présenter les résultats à quelques temps différents, les plus significatifs, pour montrer au mieux l'évolution de la combustion et l'avancement des espèces chimiques qui sont consommées et produites au cours de la réaction.

– Conditions initiales à $t = 1e^{-5}$ s



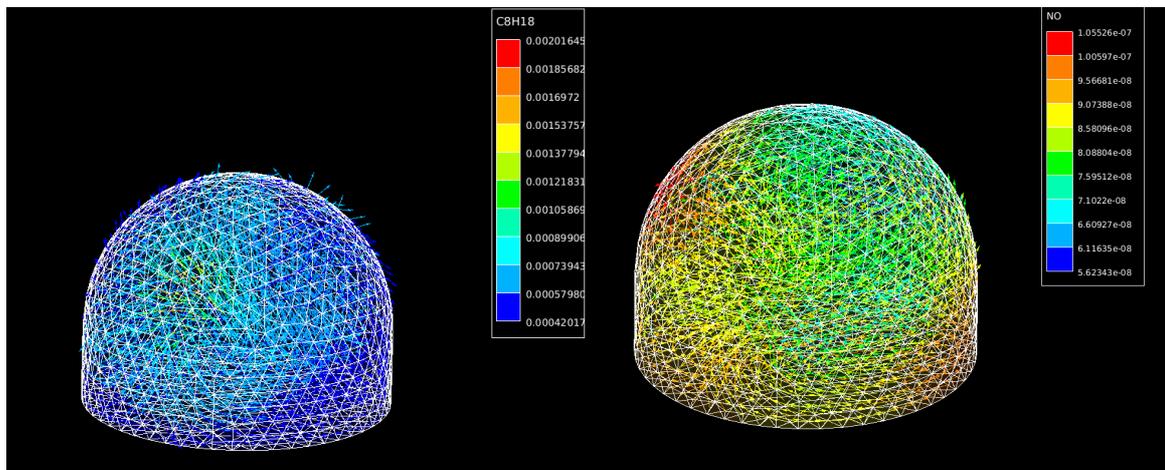
On remarque que dès le début, de l'octane est présent dans le cylindre soit à cause de notre temps de calcul au départ, soit dû à un problème de « restart » c'est-à-dire que le logiciel n'aura pas repris les calculs à zéro mais aura recommencé à partir d'un calcul précédent. La proportion massique de l'oxygène qui est théoriquement de 0.232 n'est que de 0.22 dans notre cas. La température est celle que l'on a posée, soit 350K, et nous n'avons pas de traces de NO ni de suie à cet instant.

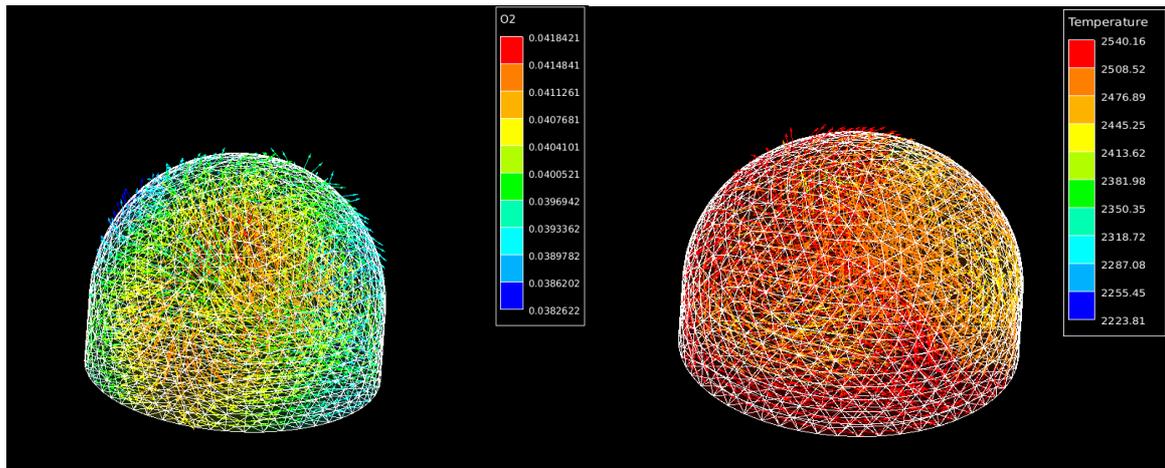
– A $t = 5.03e^{-5}$ soit 3 pas de temps plus tard :



Après l'injection de l'octane que l'on visualise ici, la combustion est lancée puisque l'on voit une élévation de la température jusqu'à 700K. On remarque que du CO_2 et du CO sont produits.

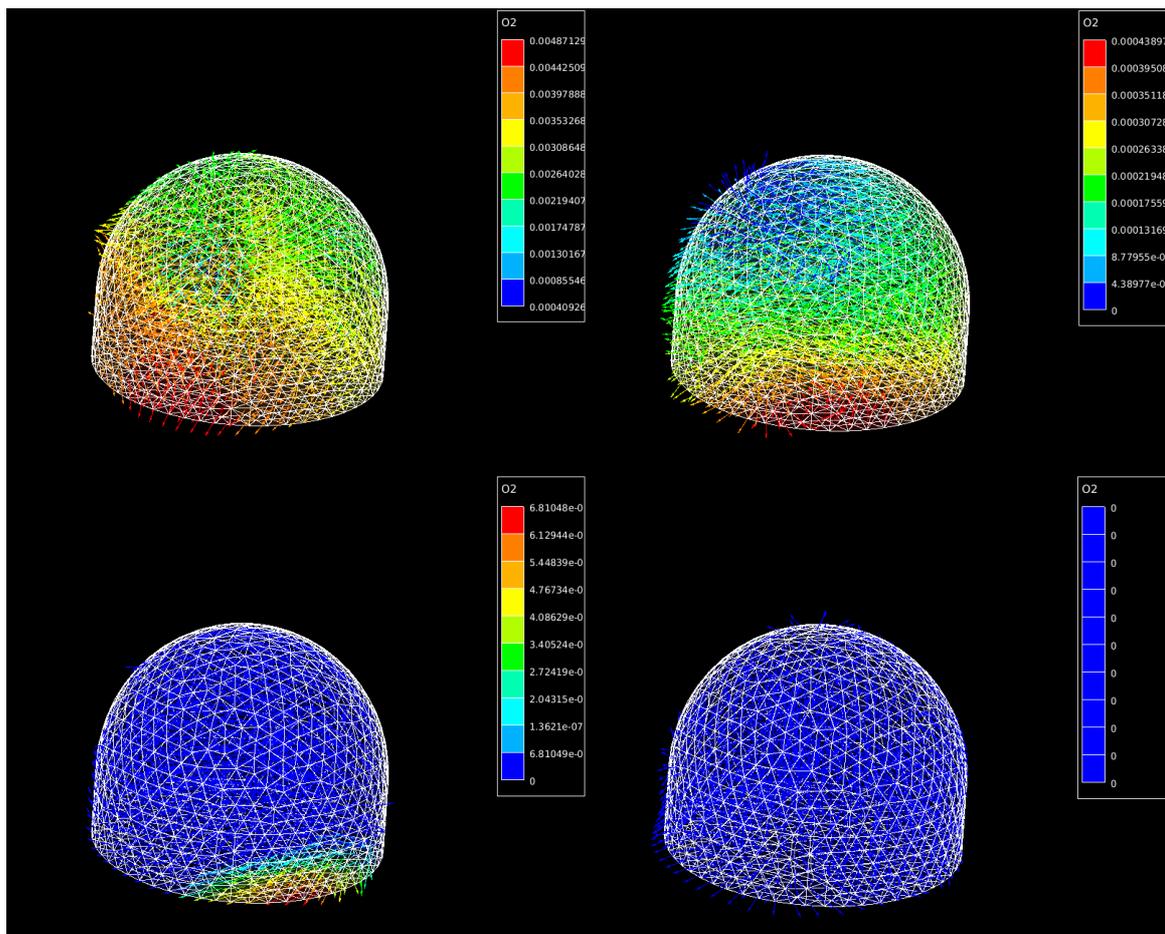
– A $t = 5.06e^{-5}$ s



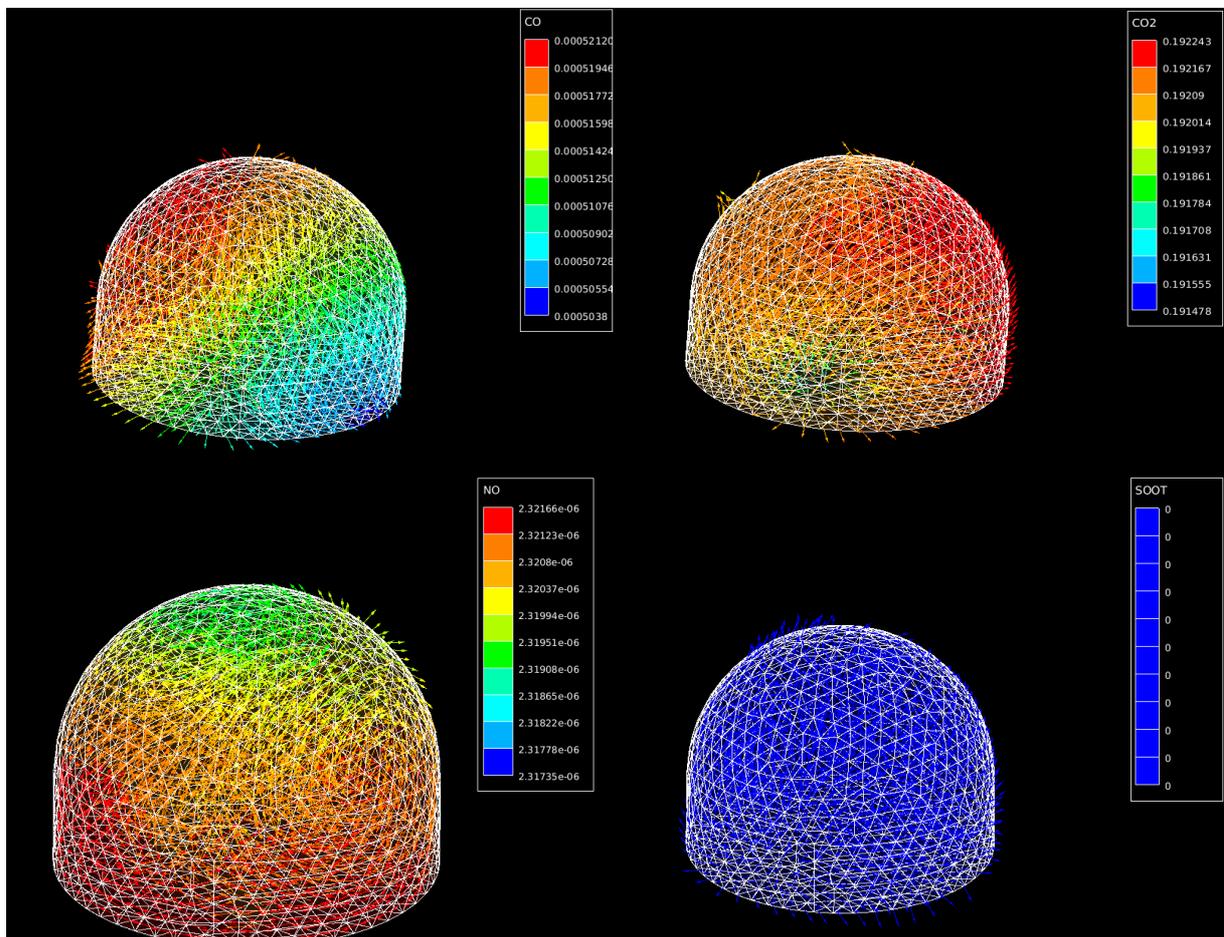


On voit que la concentration en O_2 a diminué de manière importante. Il est intéressant de constater la formation de NO , que l'on peut corrélérer à la température extrême de 2500K qui règne dans la chambre de combustion à cet instant. On peut néanmoins affirmer que dans un moteur, une telle température est inconcevable, puisqu'elle entraînerait une dégradation rapide du moteur.

On remarque, ici, la disparition complète de l'oxygène.



On a représenté, ici, la concentration finale des produits de la réaction. Il y a beaucoup plus de CO_2 que de CO , ce qui signifie que l'oxygène était bien prépondérant par rapport à l'octane. On note l'apparition de NO pendant la combustion due à une température élevée causée par le manque de carburant lors de la réaction.



d. Conclusion

Si la quantité de dioxygène présente ne permet pas la combustion complète du carburant, le carbone contenu dans celui-ci entraîne la formation de suies, qui sont cancérigènes. A l'inverse, un excès de dioxygène à haute température oxydara le diazote de l'air en oxydes d'azote NO_x qui affectent la respiration et sont donc également nocifs. L'idéal est donc d'injecter du carburant tel que sa combustion soit stoechiométrique et que les seuls produits obtenus soient le dioxyde de carbone et l'eau.

Conclusion

Durant ce projet, nous avons simulé la combustion de carburant dans une chambre de combustion afin de visualiser le front de flamme, les produits formés et l'évolution de température.

Nous avons constaté que la quantité de carburant injectée par rapport à celle d'oxygène disponible joue un rôle prépondérant sur la formation des polluants. Si elle est trop faible, la température s'élève énormément et des NOx sont formés ; au contraire, si elle est trop élevée, de la suie est produite.

Ce projet nous a permis d'acquérir des connaissances théoriques sur le fonctionnement d'un moteur essence mais également de nous familiariser avec l'utilisation de différents logiciels de CAO, comme SolidWorks, et de mécanique des fluides tels que Star-Cd. Nous avons également appris à mettre en œuvre un projet de la bibliographie à la simulation.

En menant ce projet, nous avons rencontré différents problèmes : maillage du moteur, injection directe de carburant, etc... qui reflètent ceux que connaît l'industrie. Néanmoins, bien que le temps nécessaire à la réalisation d'une étude numérique d'un moteur soit relativement important, cette approche reste nettement plus efficace que d'effectuer les mesures expérimentalement.

Il serait intéressant de poursuivre cette étude en réalisant l'injection dans notre chambre de combustion et en parvenant à mailler l'assemblage du moteur, puis de reproduire le mouvement du piston sur Abaqus grâce à la pression calculée par Star-Cd, en couplant ces deux logiciels.

Bibliographie

Sites Internet

- <http://fr.wikipedia.org/>
- <http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/mnthermo.html>
- <http://www.youtube.com/watch?v=4fcQo9jrDu4> : vidéo de la chambre de combustion
- <http://www.youtube.com/watch?v=3OS-Vj7d6Do&feature=fvsvr>
- <http://www.lemusee24h.com/>
- www.motoculture-jardin.com/moteur-2t.html
- www.toutsurlenautisme.com/les-moteurs-hors-bord-deux-temps.html
- www.moto-125.com/Moteurs-2-temps-4-temps

Livre

- La combustion : Inflammation, combustion, pollution, applications, Philippe Arquès

Tutoriels de star-cd

- CCM tutorial STAR-CD 4.12
- CCM User guide STAR-CD 4.12

Autres documents

- Rapport de projet de master MNPM 2009/2010 : « Modélisation du régime de combustion dans un cylindre de moteur thermique »