

République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
Filière : GENIE MECANIQUE  
Spécialité : MECANIQUE ET ENERGETIQUE  
Thème

***Etude des performances mécaniques et  
énergétiques d'un moteur d'automobile  
à hydrogène***

**Présenté le: 16-06-2019**

**Par:**

- BENZINA Mohammed
- TRIKI Malika

**Devant le jury composé de:**

Président:

Examineur:

Encadreur: Mr. Beloufa Mohamed amine

*Année universitaire 2018/2019*

# Remerciement

*Nous remercions le bon DIEU*

*qui nous a aidé dans*

*nos pas, qui nous a donné le courage et  
la volonté pour continuer nos études.*

*Nous tenons expressément et chaleureusement à remercier*

*nos parents pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de nos études*

*Nous tenons particulièrement à remercier le professeur*

***MR Beloufa Mohamed amine*** pour l'attention qu'il a apporté à

*notre travail. Il a encadré ce mémoire avec une grande rigueur scientifique et a*

*répondu à nos demandes faisant preuve d'une grande disponibilité*

*Il est également très agréable de remercier toutes personnes ayant participées de près*

*ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Enfin, nous exprimons nos remerciements à l'ensemble des enseignants de Génie mécanique,*

***Dr.BENZNINE Hamidou, DR,OUDED, DR,BOUAFIA,***

***Mr.GUENDOZ***

*Ainsi que tous les autres, Qui on  
contribué*

*à notre formation de master*

# *Dédicace*

*J'ai le plaisir de dédie ce mémoire à :*

*Mes parentes qui ont œuvés pour ma réussite pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, et leurs prières tout au long de mes études, merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien constant de vous.*

*A ma chère famille **BENZINA** pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral tout au long de mon parcours universitaire.*

*A tous mes collègues et mes amis chacun son nom.*

*A tous l'équipe de la formation de génie mécanique énergétique chacun son nom.*

**BENZINA**

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste mémoire de fin d'étude :  
A ma mère, mon père et mes grands-parents Aucune  
dédicace ne saurait exprimer mon respect et mon  
amour*

*Pour l'amour que vous me portez depuis mon  
enfance.*

*A mes frères et sœurs et à toute ma famille **TRIKI**.  
A tous mes chers collègues de  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib  
d'Ain-Temouchent*

*Et à tous les enseignants Pour ses conseils et  
son aide constante tout au long de ma vie scolaire.*

*A tous nos amis.  
A notre pays l'Algérie.*

**TRIKI**

## **Résumé**

Dernièrement, des moteurs à hydrogène ont connu une évolution remarquable grâce à leur rendement exceptionnel bien que l'hydrogène est un gaz inflammable et explosif.

La déformation du bloc moteur à cause des grandes températures de fonctionnement et des contraintes thermomécaniques est un défi pour les constructeurs de ce type de moteurs. L'objectif principal de notre travail est de déterminer le matériau convenable qui peut résister à l'impact des températures et des contraintes thermomécaniques élevées. L'analyse thermomécanique du bloc moteur à l'aide d'un logiciel éléments finis ANSYS-Workbench nous permis de trouver le matériau le plus convenable. Notre analyse a montré que l'utilisation de la fonte grise minimise les contraintes thermomécaniques et la propagation des températures dans les temps (combustion, échappement, compression).

## **Abstract**

Lately, hydrogen engines have undergone a remarkable evolution thanks to their outstanding performance although the hydrogen is an inflammable and explosion gas.

The deformation of the engine bloc because of the high temperatures of functioning of the engine and the thermo mechanical stresses it is a challenge for the builders of this type from engines. The main objective of our work is to determinate the suitable material which can resist against the impact of the high temperatures and the high thermo mechanical stresses. The thermo mechanical analysis of the engine bloc using ANSYS-Workbench finite element software has allowed us to find the suitable material. Our analysis is showed us that the utilization of the grey font is reduce the thermo mechanical stresses and the distribution of the temperatures in times (combustion, exhaust, compression).

## ملخص

أخيراً، عرفت محركات الهيدروجين تطوراً ملحوظاً بفضل مردودها الإستثنائي بالرغم من أن الهيدروجين هو غاز سريع الإشتعال ومتفجر.

تشوه كتلة المحرك بسبب الحرارة المرتفعة لإشتغال المحرك و الضغوط الميكانيكية الحرارية هو تحدي بالنسبة للمصنعين لهذا النوع من المحركات. الهدف الرئيسي لعملنا هو تحديد المادة المناسبة التي تستطيع المقاومة ضد تأثير الحرارة المرتفعة و الضغوط الميكانيكية الحرارية العالية. التحليل الميكانيكي الحراري بمساعدة ANSYS-Workbench برنامج العناصر المحدودة، سمح لنا بإيجاد المادة المناسبة. تحليلنا بين لنا أن إستعمال الزهر الرمادية يقلل من الضغوط الميكانيكية الحرارية و إنتشار الحرارة في أوقات (الإحتراق، إنبعاث الغازات المحترقة، الإنضغاط).

# SOMMAIRE

<i>Remerciement</i> .....	ii
<i>Dédicace</i> .....	iii
Résumé.....	v
SOMMAIRE.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
NOMENCLATURE.....	xv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I.....	3
Différents types de moteurs.....	3
Introduction.....	4
1. Les moteurs à combustion interne.....	4
1.1. Moteur diesel.....	4
1.1.1. Histoire.....	4
1.1.2. Définition du moteur diesel.....	5
1.1.3. Cycle théorique diesel.....	5
1.1.4. Principe de fonctionnement.....	6
1.1.5. La consommation et le rendement d'un moteur diesel.....	8
1.1.6. Les avantages et les inconvénients.....	8
1.2. Moteur essence.....	9
1.2.1. Histoire.....	9
1.2.2. Définition.....	10
1.2.3. Cycle théorique de Beau de Rochas (4temps).....	10
1.2.4. Principe de fonctionnement.....	11
1.2.5. La consommation et le rendement.....	11
1.2.6. Avantages et inconvénients.....	12
1.3. Moteur GPL.....	12
1.3.1. Histoire.....	12
1.3.2. Définition.....	13
1.3.3. Principe de fonctionnement.....	13
1.3.4. La consommation et le rendement.....	13
1.3.5. Avantages et inconvénients.....	14

1.4. Moteur à hydrogène.....	14
1.4.1. Histoire.....	14
1.4.2. Définition.....	15
1.4.3. Principe de fonctionnement de moteur à hydrogène.....	16
1.4.4. Le rendement du moteur à hydrogène et son consommation.....	16
1.4.5. Avantages et inconvénients.....	16
1.5. Moteur hybride.....	18
1.5.1. Histoire.....	18
1.5.2. Définition.....	18
1.5.3. Principe de fonctionnement.....	18
1.5.4. Les différents types d'hybridation.....	18
1.5.5. Les différents types de montages.....	20
1.5.6. Avantages et inconvénients de chaque montage.....	22
1.5.7. La consommation et le rendement.....	23
1.5.8. Avantages et inconvénients.....	23
2. Moteur électrique.....	24
2.1. Histoire.....	24
2.2. Définition .....	24
2.3. Principe de fonctionnement.....	25
2.4. Différents types de moteurs électriques.....	25
2.5. Le rendement de moteur électrique et la consommation.....	29
2.6. Avantages et inconvénients.....	30
Comparaison entre les moteurs.....	30
Conclusion.....	34
REFERENCE.....	35
CHAPITRE II.....	36
Introduction.....	37
I/ l'hydrogène.....	37
1. Définition de l'hydrogène.....	37
2. Composition de l'hydrogène.....	37
3. Les états de l'hydrogène.....	39
4. Les techniques de production.....	40
4.1. Production par vapo-reformage.....	40
4.2. L'électrolyse de l'eau.....	41



4.3. Production par nucléaire.....	42
4.4. Production à partir du charbon.....	43
5. Stockage de l'hydrogène.....	43
6. Stations de ravitaillement en hydrogène.....	46
7. L'utilisation de l'hydrogène.....	47
8. L'hydrogène est une source d'énergie dangereuse à manipuler.....	48
9. L'hydrogène est plus dangereux que les carburants traditionnels.....	49
10. Avantage et inconvénients de l'hydrogène.....	50
II/ Le moteur à hydrogène.....	51
1. Définition.....	51
2. Différents types de moteurs à hydrogène.....	51
2.1. Moteur à hydrogène thermique.....	51
2.2. Moteur à hydrogène électrique avec pile à combustible.....	53
3. Avantages et inconvénients.....	56
Conclusion.....	58
REFERENCE.....	59
CHAPITRE III.....	60
Introduction.....	61
1. La conception du bloc moteur.....	61
2. Simulation du bloc moteur en ANSYS 15.0 (Workbench).....	62
3. Dimensionnement et géométrie du bloc moteur.....	62
4. Propriétés des matériaux.....	63
5. Maillage.....	64
5.1. Les éléments utilisés dans ce maillage.....	65
6. Moteur à 4 temps 1342.....	66
7. Procédure de calcul thermomécanique.....	66
7.1. Les conditions aux limites thermiques.....	67
7.1.1. La zone de refroidissement par le liquide de refroidissement.....	67
7.2. Les conditions aux limites mécaniques.....	71
REFERENCE.....	74
CHAPITRE IV.....	75
Introduction.....	76
I/ Acier standard.....	76
A. Cas normal.....	76

<b>B. Cas accidentel.....</b>	<b>82</b>
<b>II/ Alliage d'aluminium 2024.....</b>	<b>88</b>
1. Température.....	88
2. Flux de chaleur.....	88
3. Déformation thermique.....	89
4. Déformation totale équivalente.....	89
5. Contrainte équivalente (Von-Mises).....	90
6. Déplacement total.....	90
<b>III/ Fonte grise.....</b>	<b>92</b>
1. Température.....	92
2. Flux de chaleur.....	92
3. Déformation thermique.....	93
4. Déformation totale équivalente.....	93
5. Contrainte équivalente (Von-Mises).....	94
6. Déplacement total.....	94
<b>Comparaison entre les 3 types de matériaux.....</b>	<b>96</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>99</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>101</b>

# LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1</i> : Le premier moteur diesel en 1897.....	5
<i>Figure 2</i> : Représentation du cycle théorique du diesel.....	5
<i>Figure 3</i> : Les quatre temps de moteur diesel.....	6
<i>Figure 4</i> : Le cycle théorique.....	7
<i>Figure 5</i> : Moteur essence.....	9
<i>Figure 6</i> : Cycle théorique de Beau de Rochas pour un moteur à 4 temps.....	10
<i>Figure 7</i> : Principe de fonctionnement d'un moteur à essence.....	11
<i>Figure 8</i> : Moteur GPL.....	13
<i>Figure 9</i> : Moteur à hydrogène.....	15
<i>Figure 10</i> : Les différents composants du système Start & Stop de la Citroën C3.....	19
<i>Figure 11</i> : Fonctionnement de la motorisation semi- hybride.....	19
<i>Figure 12</i> : Schéma explicatif du montage en série.....	21
<i>Figure 13</i> : Schéma explicatif du montage en parallèle.....	21
<i>Figure 14</i> : Schéma explicatif du montage série-parallèle.....	22
<i>Figure 15</i> : Roue de Barlow.....	24
<i>Figure 16</i> : Charbons.....	25
<i>Figure 17</i> : Moteur à courant continu.....	25
<i>Figure 18</i> : Moteur électrique de type universel.....	26
<i>Figure 19</i> : Moteur électrique asynchrone.....	27
<i>Figure 20</i> : Moteur électrique synchrone.....	27
<i>Figure 21</i> : Moteur à réluctance variable.....	28
<i>Figure 22</i> : Moteur électrique de type pas à pas.....	28
<i>Figure 23</i> : Moteur linéaire.....	29
<i>Figure 24</i> : Diagramme de phase de l'hydrogène.....	38
<i>Figure 25</i> : L'hydrogène est le premier élément de la classification périodique.....	38
<i>Figure 26</i> : Production d'hydrogène par vapo-reformage.....	41
<i>Figure 27</i> : L'électrolyse de l'eau.....	41
<i>Figure 28</i> : Production à partir du charbon.....	43
<i>Figure 29</i> : Les bouteilles de stockage de l'hydrogène.....	44
<i>Figure 30</i> : Bouteille de l'hydrogène gazeux.....	45
<i>Figure 31</i> : Réservoir pour l'hydrogène liquide.....	45

<b>Figure 32</b> : Station de ravitaillement en hydrogène.....	<b>47</b>
<b>Figure 33</b> : La bombe d'hydrogène.....	<b>48</b>
<b>Figure 34</b> : Un taxi hype à paris.....	<b>48</b>
<b>Figure 35</b> : Moteur à hydrogène.....	<b>51</b>
<b>Figure 36</b> : La réaction entre l'hydrogène et l'oxygène produire H <sub>2</sub> O.....	<b>51</b>
<b>Figure 37</b> : Une véhicule à hydrogène fonctionne avec un moteur à thermique.....	<b>52</b>
<b>Figure 38</b> : Une pile à combustible.....	<b>53</b>
<b>Figure 39</b> : Principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	<b>54</b>
<b>Figure 40</b> : Pile à combustible à membrane d'échange de protons.....	<b>55</b>
<b>Figure 41</b> : Pile à combustible à oxyde solide.....	<b>56</b>
<b>Figure 42</b> : La conception d'un bloc moteur à 4 temps.....	<b>61</b>
<b>Figure 43</b> : Simulation du bloc moteur en ANSYS-Workbench.....	<b>62</b>
<b>Figure 44</b> : Les dimensions du bloc moteur (mm).....	<b>62</b>
<b>Figure 45</b> : Maillage fin tétra-hydrique quadratique du bloc moteur.....	<b>65</b>
<b>Figure 46</b> : Elément volumique tétra-hydrique quadratique.....	<b>65</b>
<b>Figure 47</b> : Un moteur à 4 temps fonctionne selon le principe 1342.....	<b>66</b>
<b>Figure 48</b> : Les températures appliquées sur notre bloc moteur.....	<b>67</b>
<b>Figure 49</b> : Représentation des surfaces exposées à la température de liquide de ref.....	<b>68</b>
<b>Figure 50</b> : La gravité appliquée sur le bloc moteur.....	<b>71</b>
<b>Figure 51</b> : Support fixe.....	<b>71</b>
<b>Figure 52</b> : La pression appliquée dans chaque cylindre.....	<b>72</b>
<b>Figure 53</b> : La pression appliquée sur les 5 paliers.....	<b>73</b>
<b>Figure 54</b> : Distribution de la température dans le bloc moteur (Cas normal).....	<b>76</b>
<b>Figure 55</b> : Flux de chaleur total.....	<b>77</b>
<b>Figure 56</b> : Déformation thermique.....	<b>77</b>
<b>Figure 57</b> : La déformation totale équivalente.....	<b>78</b>
<b>Figure 58</b> : Contrainte équivalente (Von-Mises).....	<b>78</b>
<b>Figure 59</b> : Déplacement total.....	<b>79</b>
<b>Figure 60</b> : La trajectoire.....	<b>79</b>
<b>Figure 61</b> : Température en fonction de la longueur de la trajectoire.....	<b>80</b>
<b>Figure 62</b> : La contrainte équivalente (Von-Mises) en fonction de la longueur.....	<b>81</b>
<b>Figure 63</b> : La déformation thermique en fonction de la longueur.....	<b>81</b>
<b>Figure 64</b> : Le déplacement total en fonction de la longueur.....	<b>82</b>
<b>Figure 65</b> : Distribution de la température dans le bloc moteur (Cas accidentel).....	<b>82</b>

<b>Figure 66</b> : Flux de chaleur total.....	<b>83</b>
<b>Figure 67</b> : Déformation thermique.....	<b>83</b>
<b>Figure 68</b> : La déformation totale équivalent.....	<b>84</b>
<b>Figure 69</b> : Contrainte équivalente (Von-Mises).....	<b>84</b>
<b>Figure 70</b> : Déplacement total .....	<b>85</b>
<b>Figure 71</b> : Température en fonction de la longueur.....	<b>85</b>
<b>Figure 72</b> : La contrainte équivalente (Von-Mises) en fonction de la longueur.....	<b>86</b>
<b>Figure 73</b> : La déformation thermique en fonction de la longueur.....	<b>86</b>
<b>Figure 74</b> : Le déplacement total en fonction de la longueur.....	<b>87</b>
<b>Figure 75</b> : Comparaison entre le cas normal et le cas accidentel.....	<b>87</b>
<b>Figure 76</b> : Distribution de la température dans le bloc moteur.....	<b>88</b>
<b>Figure 77</b> : Flux de chaleur total.....	<b>88</b>
<b>Figure 78</b> : Déformation thermique.....	<b>89</b>
<b>Figure 79</b> : La déformation totale équivalente.....	<b>89</b>
<b>Figure 80</b> : Contrainte équivalente (Von-Mises).....	<b>90</b>
<b>Figure 81</b> : Déplacement total.....	<b>90</b>
<b>Figure 82</b> : Température en fonction de la longueur de la trajectoire.....	<b>90</b>
<b>Figure 83</b> : La contrainte équivalente (Von-Mises) en fonction de la longueur.....	<b>91</b>
<b>Figure 84</b> : La déformation thermique en fonction de la longueur.....	<b>91</b>
<b>Figure 85</b> : Le déplacement total en fonction de la longueur.....	<b>91</b>
<b>Figure 86</b> : Distribution de la température dans le bloc moteur (Fonte grise).....	<b>92</b>
<b>Figure 87</b> : Le flux de chaleur.....	<b>92</b>
<b>Figure 88</b> : La déformation thermique.....	<b>93</b>
<b>Figure 89</b> : La déformation totale équivalente.....	<b>93</b>
<b>Figure 90</b> : La contrainte équivalente (Von-Mises).....	<b>94</b>
<b>Figure 91</b> : Le déplacement total.....	<b>94</b>
<b>Figure 92</b> : Température en fonction de la longueur de la trajectoire.....	<b>95</b>
<b>Figure 93</b> : $\sigma$ (Von-Mises) en fonction de la longueur.....	<b>95</b>
<b>Figure 94</b> : La déformation thermique en fonction de la longueur.....	<b>95</b>
<b>Figure 95</b> : Le déplacement total en fonction de la longueur.....	<b>96</b>
<b>Figure 96</b> : La contrainte équivalente (Von-Mises) en fonction de la longueur.....	<b>96</b>
<b>Figure 97</b> : La déformation totale en fonction de la longueur.....	<b>97</b>
<b>Figure 98</b> : Le déplacement total en fonction de la longueur.....	<b>97</b>

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : La consommation des voitures diesel	8
<b>Tableau 2</b> : La consommation des voitures à essence	11
<b>Tableau 3</b> : Avantages et inconvénients de chaque montage	22
<b>Tableau 4</b> : La consommation des voitures hybrides	23
<b>Tableau 5</b> : Comparaison entre le moteur diesel et le moteur essence	31
<b>Tableau 6</b> : Comparaison entre le moteur essence et le moteur électrique	32
<b>Tableau 7</b> : Comparaison entre le moteur GPL et le moteur hybride	33
<b>Tableau 8</b> : Comparaison entre le moteur diesel et le moteur à hydrogène	34
<b>Tableau 9</b> : Les propriétés des matériaux suggérer pour la simulation	63
<b>Tableau 10</b> : Les propriétés physiques pour l'étude de ce bloc moteur	64
<b>Tableau 11</b> : Comparaison des conditions thermiques des trois moteurs à CI	69
<b>Tableau 12</b> : Comparaison des conditions mécanique des trois moteurs à CI	71
<b>Tableau 13</b> : Les coordonnées de la trajectoire	80
<b>Tableau 14</b> : Comparaison des Max entre les trois types de matériau	98

# NOMENCLATURE

T : Température [ $^{\circ}\text{C}$ ]

P : Pression [MPa]

$\rho$  : Masse volumique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\lambda$  : Conductivité thermique [ $\text{W}/\text{mk}$ ]

T<sub>f</sub> : Température de fusion [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\sigma$  : Contrainte mécanique [MPa]

E : Module de Young [MPa]

$\Phi$  : Flux de chaleur [ $\text{W}/\text{m}$ ].

C<sub>p</sub> : Capacité thermique massique à pression constante [ $\text{J}/\text{kg.K}$ ].

q : Rapport de chaleur interne [ $\text{W}/\text{m}^3$ ].

$\Delta L$  : Dilatation due à une variation de température [mm]

$\alpha$  : Coefficient de dilatation thermique [ $1/\text{K}$ ]

L : Longueur caractéristique [mm]

$\Delta T$  : Différence de température entre la température initiale et la température du matériau finale [ $^{\circ}\text{C}$ ].

D<sub>c</sub> : Diamètre cylindre [mm]

D : Diamètre palier [mm]

e : Epaisseur palier [mm]

$\gamma$  : Coefficient isentropique ou exposant adiabatique

P<sub>m</sub> : Poids moléculaire [g/mol]

Re : Limite d'élasticité [MPa]

La distance [km]

La consommation [L]

Tension électrique [V]

Puissance [kw]

La masse [kg]

Q12 : Compression adiabatique de l'air

Q23 : Transformation isobare

Q34 : Détente adiabatique

Q41 : Transformation isochore

QBC : Compression adiabatique

QCD : Transformation isochore

QDE : Détente adiabatique

QEB : Transformation isochore

$[K_{\text{ther}}]$  : La matrice de rigidité elle dépend de la géométrie et les propriétés thermiques du matériau.

$\{T\}$  : Le vecteur de la température.

$\{Q\}$  : Le vecteur du flux de chaleur.

$[K_{\text{mec}}]$  : La matrice de rigidité elle dépend de la géométrie et les propriétés mécanique du matériau

$\{U\}$  : Le vecteur de déplacement.

$\{F\}$  : Le vecteur de la force

## Abréviations

GPL	Gaz de pétrole liquéfié
ADEME	L'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
VHTR	Réacteur à gaz à très haute température
AOA	Avance ouverture admission
AOE	Avance ouverture échappement
RFE	Retard à la fermeture d'échappement
RFA	Retard à la fermeture d'admission





***INTRODUCTION***

***GENERALE***

# INTRODUCTION GENERALE

Le moteur est un dispositif qui peut transformer une énergie non-mécanique (chimique, électrique, thermique par exemple) en une énergie mécanique ou travail.

Les moteurs à combustion interne sont des machines thermiques émettant de l'énergie utile développée par la combustion de carburant.

La plupart des voitures présentes sur le marché actuel fonctionne avec un moteur thermique (diesel, essence, hydrogène, hybride, GPL), chaque type est différent de l'autre avec son principe de fonctionnement, consommation, rendement,... etc.

Ce travail se compose principalement de quatre parties différentes associées à l'analyse thermomécanique du bloc moteur.

**Le premier chapitre décrit les différents types de moteurs.** Dans ce chapitre, on présente les différents types de moteur, le principe de fonctionnement de chaque type, après nous allons citer la consommation et le rendement, puis les avantages et les inconvénients de chaque types.

**Le deuxième chapitre s'intéresse à donner des notions générales sur l'hydrogène et le moteur à hydrogène.** Dans ce chapitre, on montre deux parties :

**Dans la première partie,** nous allons voir c'est quoi l'hydrogène, quelle sont ces états, leur composition chimique et les techniques de production et de stockage de ce combustible, puis les avantages et les inconvénients de hydrogène.

**Dans la deuxième partie,** on va voir c'est quoi un moteur à hydrogène, le principe de fonctionnement et les différents types ce moteur, après nous allons citer les avantages et les inconvénients du moteur à hydrogène.

**Le troisième chapitre s'intéresse à modéliser et simuler un bloc moteur.** Ce chapitre commence par le dimensionnement et la conception d'un bloc moteur à l'aide du logiciel « CATIA », en suite nous entamons la partie de simulation numérique par le logiciel (ANSYS 15.0 Workbench), où on a fait le maillage fin avec l'application des conditions aux limites thermiques et mécaniques sur notre Bloc moteur.

**Le quatrième chapitre s'appuie sur le chapitre précédent, où il représente les résultats de l'analyse.** Donc, dans ce chapitre on va utiliser trois types de matériau, et on va faire une comparaison entre les trois types de matériau pour déterminer la solution convenable qui peut minimiser les contraintes, les déformations, et les déplacements thermomécaniques pour notre bloc moteur.



# **CHAPITRE I**

## **Différents types de moteurs**

## **Introduction :**

Dans ce chapitre, on donne un aperçu général sur les différents types des moteurs, on va passer d'un type à un autre, nous allons introduire le principe de fonctionnement de chaque moteur ainsi que le rendement, et les avantages et les inconvénients de chaque type:

## **1. Les moteurs à combustion interne :**

### **1.1. Moteur diesel :**

#### **1.1.1. Histoire :**

Si le brevet du moteur à combustion interne a été déposé dès 1807 par **François Isaac de Rivaz**, il faut attendre **Etienne Lenoir** en 1860 pour en voir apparaître la première véritable application. La machine qui s'apparente un moteur à allumage commandé, fonctionne d'abord au gaz d'éclairage, ce qui impose de la relier aux canalisations de la ville. La découverte du pétrole dans les années 1850, et l'invention du carburateur par l'autrichien **Siegfried Marcus** en 1865, poussent Lenoir à présenter à l'Exposition universelle de 1867 un moteur à essence, alors un sous-produit de la distillation du pétrole lampant. Tandis que la technique se perfectionne, notamment par les premières applications que fait **Nikolaus Otto** du cycle Beau de Rochas à partir de 1876, **Rudolf Diesel** cherche à la rendre plus simple, petite et accessible, permettant l'usage de n'importe quel carburant. Le 27 février 1892, il dépose un brevet pour un moteur à charbon pulvérisé, dans lequel la combustion est déclenchée par la forte compression, et non par allumage commandé. Assisté du Français **Frédéric Dyckhoff**, et soutenu par le directeur de la fabrique de machines d'Augsbourg, il entreprend d'en construire les premiers prototypes à partir de 1894. Ils testent différents combustibles, entre produits du pétrole et gaz d'éclairage, puis aboutissent à un premier vrai résultat en 1897 : un moteur à injection pneumatique de combustible liquide, d'une cylindrée de 19,6 L, offrant 14,7 KW ( 20 ch ) à 172 tr/min pour une consommation contenue de 238 g/ch/h, En 1900 à l'occasion de son lancement commercial, l'invention décroche le Grand Prix de l'exposition universelle. [1]



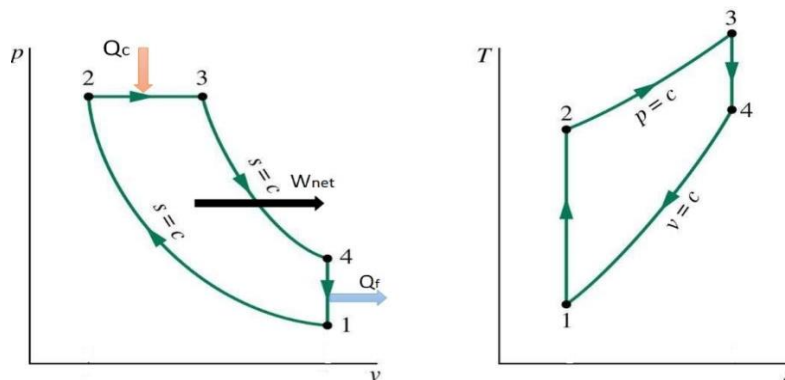
*Figure 1:* Le premier moteur diesel de 1897

**1.1.2. Définition du moteur diesel:**

Le moteur diesel appelé également moteur à allumage par compression est un moteur à combustion interne dont l'allumage est spontané lors de l'injection du carburant, par phénomène d'auto-inflammation lié aux températures élevées dans la chambre de combustion. Celles-ci sont atteintes grâce à un fort taux de compression (rapport volumétrique de 14 à 25), permettant d'obtenir une température de 700 à 900 °C.

**1.1.3. Cycle théorique diesel:**

Le cycle diesel théorique est considéré comme étant celui des moteurs à allumage par compression. Le cycle est composé de quatre (4) transformations représentées sur la figure ci-dessous :



*Figure 2:* Représentation du cycle théorique du Diesel [2]

Les transformations sont :

1-2 Compression adiabatique de l'air ( $Q_{12}=0$ ).

2-3 transformation isobare ( $P=cst$ ).

3-4 détente adiabatique ( $Q_{34}=0$ ).

4-1 transformation isochore ( $V=cst$ ).

## 1.1.4.Principe de fonctionnement :

Tous les moteurs à combustion interne à quatre temps fonctionnent sur le même principe. Ils ont quatre (4) temps qui sont, voir:

- ✓ Admission
- ✓ Compression
- ✓ Combustion/Explosion
- ✓ Echappement

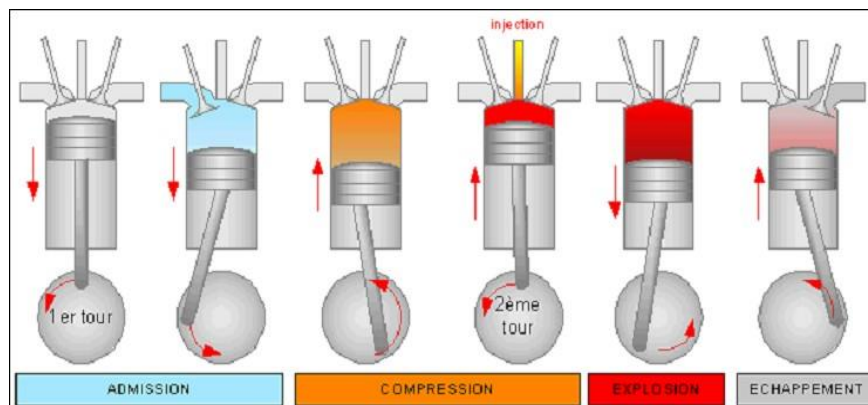


Figure 3: Les quatre temps de moteur diesel [3]

- **Admission:**

La soupape d'échappement se ferme, celle d'admission s'ouvre et l'air est introduit dans la chambre de combustion, le piston est descendu jusqu'en bas, et la soupape d'admission se ferme.

- **Compression:**

Le piston remonte, l'air se comprime et sa température augmente. De plus, en se comprimant et grâce à la forme du piston et de la chambre de combustion, la soupape d'admission étant fermée.

- **Combustion:**

Le piston arrive en bout de course, la pression et la température sont au maximum : Le gasoil est injecté dans la chambre de combustion par différents procédés et s'enflamme spontanément.

La combustion dilate les gaz dans la chambre de combustion et le piston redescend : c'est la phase de "détente" des gaz brûlés et c'est durant cette même phase que le moteur fournit un travail. La transformation de l'énergie est dite isobare ( $P=cst$ ).

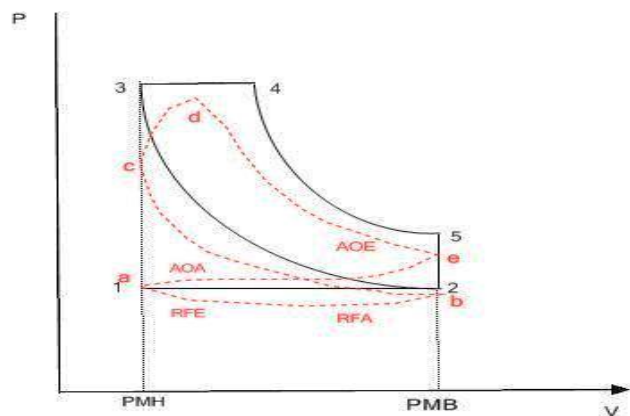
Le carburant utilisé dans le moteur diesel sont caractérisés par l'indice cétane qui caractérise l'auto-inflammation du combustible.

**NB.** L'indice de cétane évalue la capacité d'un carburant à s'enflammer sur une échelle de 0 à 100°C.

### • Echappement:

Le piston descend en bout de course inférieur puis dès le début de la remonté, les soupapes d'échappements s'ouvrent et les gaz brûlés sont expulsés de la chambre de combustion durant toute la remontée. Le piston termine sa course et le cycle recommence.

**NB.** Le cycle pratique diffère du cycle théorique car l'ouverture et fermetures des soupapes ne s'effectuent pas au point mort haut et point mort bas. Elles sont plus ou moins décalées pour un bon fonctionnement du moteur.



**Figure 4:** Le cycle théorique ( — ), et le cycle réel ( - - )

**Avec :**

**AOA**= Avance ouverture Admission

**AOE**= Avance ouverture échappement

**RFE**= Retard à la fermeture d'échappement

**RFA**= Retard à la fermeture d'admission

**1.1.5. La consommation et le rendement d'un moteur diesel:**

Le taux de compression est plus élevé sur le moteur diesel (deux à trois fois plus élevé sur les diesels).

Alors le rendement global du moteur diesel est plus élevé.

Quelques exemples sur la consommation des voitures diesel:

<b>Type de voiture (diesel)</b>	<b>La distance (Min/Max)</b>	<b>La consommation (Route/mixte/urbain)</b>
Audi A5 2.0 TDI (150ch)	800 à 1100 km	54 L
Audi A5 3.0 TDI (286ch)	700 à 800 km	54 L
BMW Série 2 (2013)	900 à 1200 km	52 L
Peugeot 308 2.0 HDI (163ch)	800 à 1100 km	60 L

**Tableau 1: La consommation des voitures diesel [4]**

**1.1.6. Les avantages et les inconvénients:****1.1.6.1. Les avantages:**

- Meilleur rendement grâce à l'augmentation du rapport volumétrique, la combustion est plus complète et la consommation spécifique est réduite.
- Le couple moteur est plus important et il reste sensiblement constant pour les faibles vitesses.
- Le combustible employé coûte moins cher.
- Les risques d'incendie sont moindres car le point d'inflammation du gazole est plus élevé que celui de l'essence.
- Les gaz d'échappement sont moins toxiques car ils contiennent moins d'oxyde de carbone.
- L'admission est toujours maximale.
- La consommation moyenne en combustible est voisine de 190 g/ch.



## 1.1.6.2. Les inconvénients:

- Les organes mécanique doivent être surdimensionnés.
- Le bruit de fonctionnement est élevé.
- La température dans les chambres de combustion est élevée ce qui implique un refroidissement plus efficace.
- L'amplitude au démarrage à froid est moins bonne qu'un moteur à allumage commandé.

## 1.2. Moteur essence:

### 1.2.1. Histoire:

L'ingénieur belge **Étienne Lenoir** fabrique en 1860 le premier moteur à allumage commandé.

Le 24 janvier 1860 **Étienne Lenoir** dépose le brevet d'un " système de moteurs à un deux temps dilaté par la combustion des gaz enflammés par l'électricité" mais sans compression préalable des gaz.

Le 16 janvier 1862 le physicien Alphonse **Beau de Rochas** publie la théorie du moteur à **allumage commandé à quatre temps**, avec compression des gaz c'est le principe **des moteurs essence** actuels.

Mais c'est finalement l'ingénieur allemand **Nikolaus Otto** qui construit et met au point le premier **moteur à allumage à commandé** fondé sur ce principe, en 1864 puis les moteurs à allumage commandé sont installés à partir de 1886 sur les premières automobiles par les futures constructeurs : Goettlieb Daimles, Carl Benz, Armand Peugeot, les frères Renault, Panhard et le vassor.[5]



*Figure 5: Moteur essence*

Communément appelé « moteur essence » il s'agit d'un moteur à combustion interne a 2 ou 4 temps utilisant un carburant léger : l'essence.

## 1.2.2. Définition:

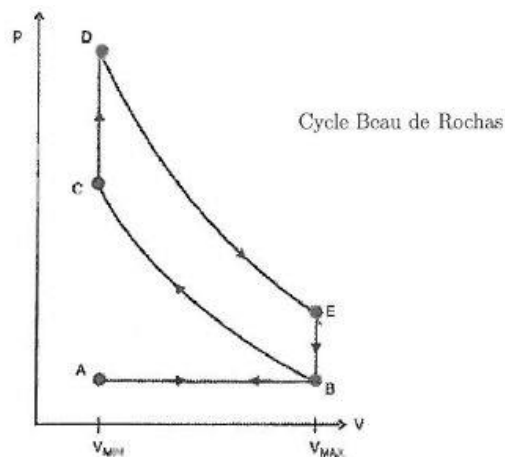
Le moteur essence est un moteur à allumage commandé qui utilise l'essence comme un carburant,

très improprement appelé « moteur à explosion ».

## 1.2.3. Cycle théorique de Beau de Rochas (4temps):

On appelle aussi le cycle de Beau De Rochas :

**Alphonse Beau** dit **Beau de rochas** (1818-1893) à développer les connaissances scientifiques de base et la description de cycle relative aux moteurs à quatre temps, le cycle théorique de Beau de Rochas et le cycle théorique de moteur essence, il est composé de deux transformation isentropique et de transformation isochore sa représentation dans le diagramme de Clapeyron est le suivant:



**Figure 6:** Cycle théorique de Beau de Rochas pour un moteur à 4 temps

Représentation théorique de cycle de beau de Rochas :

**B-C** : Une compression adiabatique ( $Q_{BC}=0$ ).

**C-D** : Une transformation isochore ( $V=cts$ ).

**D-E** : Une détente adiabatique ( $Q_{DE}=0$ ).

**E-B** : Une transformation isochore ( $V=cts$ ).

## 1.2.4.Principe de fonctionnement:

Tous les moteurs à combustion interne à quatre temps fonctionnent sur le même principe Ils ont quatre (4) temps :

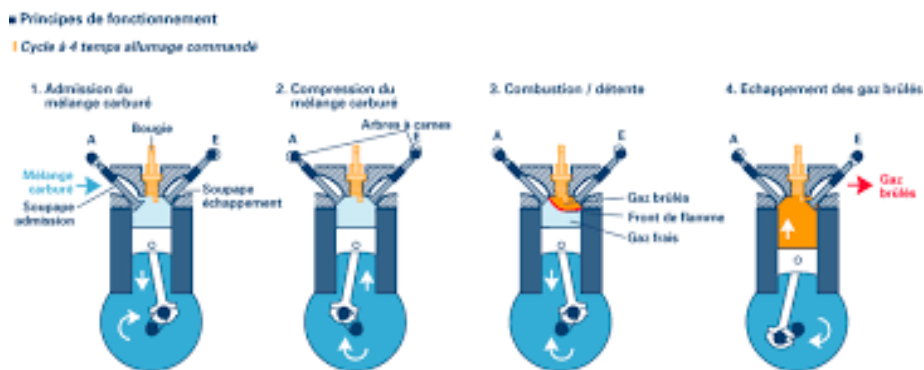


Figure 7: Principe de fonctionnement d'un moteur à essence

- **Admission:**

Le piston aspire le mélange gazeux à pression (air + carburant) à pression constant.

- **Compression:**

Lors de la compression le piston comprime de façon adiabatique le mélange.

- **Détente:**

A moment de la combustion, le mélange est enflammé par une bougie d'allumage, la pression des gaz portés à haute température force le piston à descendre, provoque une détente des gaz.

- **Echappement:**

Les gaz brûlés sont évacués du cylindre via la soupape d'échappement poussée par la remontée du piston. [6]

## 1.2.5. La consommation et le rendement :

Le rendement d'un moteur à essence est élevé.

Quelques exemples sur la consommation des voitures à essence :

Le type de voiture (essence)	La distance (km)	La consommation (L)
Peugeot 3008	100 km	6,2 L
Toyota Yaris	100 km	5,4 L
Citroen D55	100 km	7,1 L

Tableau 2: La consommation des voitures à essence [8]

### **1.2.6. Avantages et inconvénients:**

#### **1.2.6.1. Avantages:**

- La facilité d'utilisation et de maintenance de ce type de moteur explique également son succès. Aussi, ces moteurs ne sont pas délicats et fonctionnent sans problème avec divers carburants.
- Le moteur essence est relativement plus silencieux qu'un moteur diesel.
- Le moteur à allumage commandé est plus vif lorsqu'il est froid par rapport à un moteur diesel, car l'allumage se fait par l'intermédiaire d'une bougie. Le démarrage à froid est meilleur pour un moteur à explosion essence.
- Une voiture essence neuve est moins chère à l'achat qu'une voiture diesel neuve (environ 10%).

#### **1.2.6.2. Inconvénients:**

- La combustion entraîne le rejet de gaz potentiellement polluants (**CO<sub>2</sub>, HC, CO, NO<sub>2</sub>**).
- Les moteurs à explosion utilisent généralement un carburant d'origine fossile. Cette source d'énergie n'est pas renouvelable, donc son prix ne va cesser d'augmenter.

## **1.3.Moteur GPL**

### **1.3.1. Histoire:**

Le butane est commercialisé en 1932 exclusivement pour un usage domestique en bouteille, le propane ne sera lancé que plus tard en 1954.

En 1969, le propane sera autorisé comme carburant, mais uniquement pour les engins de manutention.

En réalité, les 2 composants du GPL-C, C pour carburant, sont issus à 60% de champs de gaz. Les 40% restants étant extraits du pétrole comme son nom l'indique, il faudra attendre 1979 pour que l'état permette enfin l'utilisation du GPL sur des véhicules automobiles, mais également en mono-carburant. Jusqu'au début de l'année 2000, la législation française obsolète interdisait la soupape de surpression considérant le réservoir de GPL comme les autres. Cette disposition anachronique et dangereuse obligeait les installateurs français à la démonter et à souder un bouchon à la place.

### 1.3.2. Définition:

Le GPL (gaz de pétrole liquéfié) est une adaptation du moteur à essence, qui devient alors à bicarburant. Deux réservoirs alimentent le bloc, l'un au sans plomb, l'autre au gaz.

Ce mélange de gaz butane et propane à parts égales ayant un indice d'octane élevé possède des propriétés proches de celles de l'essence malgré un pouvoir calorifique supérieur à la même masse d'essence, le moteur alimenté en GPL devient plus gourmand et légèrement moins toxique.



*Figure 8:* Moteur GPL

### 1.3.3. Principe de fonctionnement:

On trouve donc le cycle à 4 temps des moteurs essence mais carburant est remplacé par le GPL-C. Lorsqu'il est utilisé dans le domaine automobile, on parle du GPL carburant en Europe la première utilisation du GPL carburant remonte à 1979.

### 1.3.4. La consommation et le rendement :

Le rendement de moteur GPL est mauvais.

Le pouvoir calorifique inférieur (kcal/litre) d'essence est de **7600** contre **6050** pour le GPL il y' a donc 25.6% plus d'énergie dans litre d'essence que dans un litre de GPL.

Quelque exemple de différence de conso calculée à partir du site de l'ADEME (conso mixte) :

Berlingot (Partner) essence 7.8 / GPL 10.2 / soit 30.8%.

Twingo essence 5.8 / GPL 7.5 / soit 29.3%.

Clio essence 6.1 / GPL 7.7 / soit 28.3%.

Kango essence 7 / GPL 9 / soit 28.5%.

**NB.** ADEME c'est l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

### 1.3.5. Avantages et inconvénients:

#### 1.3.5.1. Avantages:

- ✓ Composantes GPL en première monte sur de nombreux modèles de constructeurs automobile.
- ✓ Norme européenne de sécurité ECE 67 – 01 pour les composantes GPL.
- ✓ Zéro émission de particules polluante.
- ✓ 18% de nus en moins que l'essence.
- ✓ Bonus écologique à l'achat.
- ✓ Le GPL est plus respectueux de l'environnement.
- ✓ Bicarburant (GPL et essence).
- ✓ Emission de CO<sub>2</sub> -13% par rapport à l'essence.
- ✓ Autonomie étendue avec les réservoirs essence et GPL.
- ✓ Le coût du GPL est moins cher que l'essence (Le GPL, le carburant le moins cher du marché).

#### 1.3.5.2. Inconvénients:

- ✓ Consommation plus 30 par rapport à celle d'un véhicule essence.
- ✓ Baisse de la performance de 5% comparé à celle de l'essence.
- ✓ La roue de secours se substitue au réservoir de GPL (sauf si on monte une citerne).
- ✓ Poids de réservoir de GPL.
- ✓ Ces motorisations sont moins agréables à utiliser car elles engendrent une perte de puissance de 5 à 10% (comparé à l'essence).
- ✓ Embout spécifique pour faire le plein de GPL.
- ✓ Le risque de l'explosion de la bouteille de GPL.

### 1.4. Moteur à hydrogène:

#### 1.4.1. Histoire:

Dans son brevet de 1799, **Lebon** avait prédit que son " gaz hydrogène " du gaz de bois, dont on peut supposer qu'il contenait au moins 50% de dihydrogène, serait " une force applicable à toutes espèces de machine ". Le gaz de houille inventé par **William Murdoch** à la même époque, est nommé " gaz hydrogène carboné ", puis gaz d'éclairage (" gaz light ", voir aussi gaz de ville, et gaz manufacturé) et contient 50% de dihydrogène, 32% de méthane, 8 % de monoxyde de carbone. Certains gaz à l'eau, à destination de l'éclairage contiendront jusqu'à 94% de dihydrogène.

A partir de 1804, **François Isaac de Rivaz** construit les premiers moteurs à gaz utilisant du

gaz de houille. Il s'inspire du fonctionnement du Pistolet de Volta pour construire le premier moteur à combustion interne dont il obtient le brevet le 30 janvier 1807.

En 1859, **Etienne Lenoir** dépose un " brevet d'un moteur à gaz et à air dilaté ", un moteur à combustion à deux temps qui utilise le gaz de houille.

Le gaz d'éclairage est encore utilisé dans le moteur à gaz par **Nikolaus Otto** en 1867. Les grands constructeurs automobiles, **Deutz AG**, **Daimler AG**, **Mercedes-Benz**, et **BMW** sont redevables aux innovations du moteur à gaz apportées par celui-ci et à la création de la " **Gasmotoren-Fabrik Deutz AG** " (**Deutz AG**), fondée par **Otto** en 1872.

En 1970 **Paul Dieges** brevète une modification des moteurs à combustion interne qui autorise la consommation d'hydrogène. Le brevet indique clairement que le but de l'invention est de fournir un combustible non-polluant à l'inverse des hydrocarbures.

A partir de 1980, le constructeur automobile japonais **Mazda** planche sur l'application du dihydrogène aux moteurs rotatifs (**Moteur Wankel**), et en 1991 présente un concept de moteur rotatif à hydrogène au salon automobile de Tokyo. En 2006 Mazda loue des véhicules hydrogène RE aux bureaux du gouvernement nippon.

**La BMW Hydrogène 7**, présenté pour la première fois au salon de **Los Angeles** en novembre 2006, serait la première voiture de série fonctionne à l'hydrogène. [7]



*Figure 9:* Moteur à hydrogène

### **1.4.2. Définition:**

Le moteur à hydrogène est un moteur à combustion interne utilisant l'hydrogène comme un carburant.

**1.4.3. Principe de fonctionnement de moteur à hydrogène:**

Le moteur à hydrogène à combustion interne, aussi appelé moteur à explosion, convertit l'énergie chimique de la réaction explosive entre le dihydrogène et le dioxygène en énergie mécanique.



L'énergie mécanique récupérée actionne un piston selon le même principe que dans un moteur à explosion à essence ou à gazole. Cependant, les spécificités de l'hydrogène nécessitent quelques modifications pour tenir compte de son état gazeux, de sa sensibilité à l'autoallumage, de sa vitesse de combustion plus rapide et de son effet corrosif.

En outre, des réglages sont nécessaires pour limiter les rejets d'oxydes d'azote ( **NOx** ) dus à l'oxydation de l'azote atmosphérique.

**1.4.4. Le rendement du moteur à hydrogène et son consommation:**

Un des plus gros points forts de la voiture à hydrogène est son rendement énergétique, c'est la raison prédominante pour laquelle on cherche à développer ce moteur.

Le rendement du moteur à hydrogène est plus élevé (**80%**).

***Pour la consommation:***

Toyota Mirai est la première voiture à hydrogène, avec :

Une puissance de moteur 113 kw (154ch).

Consommation cycle mixte 0,76 kg /100 km

Consommation cycle urbain 0,69 kg /100 km

Consommation cycle mixte extra-urbain 0,8 kg /100 km

**1.4.5. Avantages et inconvénients:****1.4.5.1. Avantages :**

Si l'hydrogène est produit de manière peu polluante, alors on gagne en termes de pollution par rapport à un moteur à énergie fossile, car sa combustion ne produit pas que de l'eau, rien de plus. Aucun autre sous-produit n'est produit. De plus, à partir de n'importe de quelle source électrique et avec simplement de l'eau comme matière première, il est facile de produire et stocker l'hydrogène ; cette production pourrait donc être distribuée et même être faite individuellement par des panneaux photovoltaïques ou toute autre sources d'énergie renouvelable.



### **1.4.5.2. Inconvénients :**

Le dihydrogène n'est pas une énergie primaire: il n'est pas disponible sous forme brute dans la nature, c'est un vecteur énergétique qui a besoin d'être produit à partir d'une autre source d'énergie. Avec la technologie d'aujourd'hui en 2018, il serait plus polluant d'utiliser massivement des moteurs à hydrogène en remplacement des moteurs à pétrole si l'on tient compte de l'énergie nécessaire à la production. En effet et à moins d'utiliser l'énergie géométrique, l'énergie solaire, le nucléaire ou la houille blanche, cette production utilise du pétrole ou du charbon comme source d'énergie. Ce qui ne fait que déplacer le problème de la non-utilisation des énergies fossiles et augmente leur consommation par rapport à une utilisation directe de ces énergies dans les moteurs.

En outre, le stockage du dihydrogène au sein des véhicules pose un problème: en plus d'être plus explosif que l'essence (sous forme stockée, une explosion ne peut survenir que si de l'oxygène en quantité est adjoint à l'hydrogène), sous forme de gaz peu comprimé, il prendrait beaucoup trop de place pour être embarqué dans un véhicule; sous forme de gaz très comprimé, le risque d'auto-ignition augmente largement; les techniques d'absorption ne sont pas au point et coûtent encore cher. Elles progressent d'année en année mais la masse embarquée d'absorbant (poudres ou pastilles d'alliage métallique) est encore pénalisante.

Il faut cependant noter la présence en 2013 d'une Aston Martin sur le circuit du Nürburgring, fonctionnant à l'hydrogène comprimé ou à l'essence ou un mélange des deux.

Cependant, un système d'électrolyse permet de créer du dihydrogène et du dioxygène à partir d'eau. Mais un système comme celui-ci nécessiterait un apport d'électricité qui devrait être produite par des procédés non polluants, ce qui pose alors un problème d'accessibilité économique par rapport au coût économique et de pollution de la production mais surtout un problème politique.

### **1.5. Moteur hybride:**

#### **1.5.1. Histoire:**

En 1894, **Paul Pouchain**, un inventeur lillois conçoit une voiture avec un moteur à essence sous le capot et des moteurs électriques.

En 1899 une autre automobile de ce type est présentée par les Etablissements Pieper, de Liège. Étonnamment similaire dans ses caractéristiques aux hybrides modernes, elle utilise un moteur à pétrole de **3,5 chevaux** qui entraîne directement les roues, selon le principe de **l'hybride parallèle**.

Le moteur fonctionne toujours à pleine charge, le dynamo permet la charge d'accumulateurs, lorsque la tension de la dynamo est supérieur à celle de la batterie celle-ci est chargée sinon le courant électrique s'inverse et la dynamo se comporte alors comme un moteur électrique.

En 2018, Honda prévoit la sortie de son véhicule hybride Honda Clarity qui présente la plus forte autonomie de conduite en mode tout électrique, jusqu'à 76 km.

#### **1.5.2. Définition:**

Les véhicules hybrides sont équipés de deux moteurs: un thermique et un électrique afin de réduire au maximum la consommation de carburant. S'ils disposent quasiment tous d'un moteur à combustion interne principale et d'un moteur électrique complémentaire.

#### **1.5.3. Principe de fonctionnement:**

D'une façon générale, ces véhicules donnent la priorité à la machine électrique en utilisant urbaine, ce qui favorise d'autant les consommations normalisées. Dès que l'autonomie des batteries ou un surcroît de puissance sont nécessaires, le moteur thermique vient toutefois épauler sa version électrique embraquée.

#### **1.5.4. Les différents types d'hybridation:**

On peut distinguer différents types de voitures hybrides en fonction de l'importance de leur système électrique :

##### **a) *Start & Stop:***

La première solution Micro Hybride correspond au niveau le plus faible d'hybridation. Il s'agit d'un système réversible équipé d'un alerno-démarrreur (Stop&Start) qui coupe le moteur lors d'un arrêt et le réactive automatiquement dès le démarrage. Ce dispositif permet d'économiser entre 6 et 15 % de carburant (8g de CO<sub>2</sub>/km en moyenne). Les polluants notamment dus au CO<sub>2</sub> et aux gaz d'échappement sont particulièrement émis lors des multiples arrêts et redémarrages dans la circulation urbaine (feu tricolore, embouteillage, etc...).

Citroën avait fait une première expérience de ce type avec le « Dynavolt » en 1998 sur la Xsara, mais ce n'est qu'en 2004 que le système fut commercialisé sur la Citroën C3, avec une motorisation à essence.

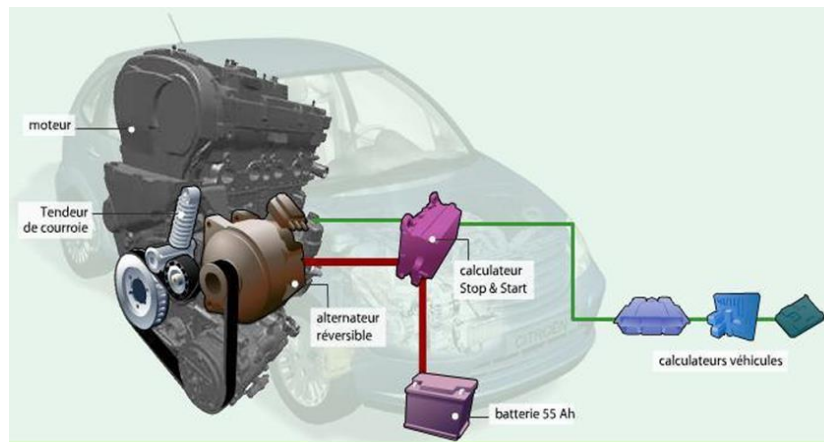


Figure 10: Les différents composants du système Start & Stop de la Citroën C3

## b) Mild-hybrid

Le second niveau correspond au semi hybride il a les mêmes fonctionnalités que le système start and stop avec en plus la possibilité de récupérer l'énergie cinétique déployé lors du freinage. Le moteur électrique joue donc le rôle de générateur. Cette énergie est stockée dans la batterie puis redistribuée.

Autrement dit, ce modèle d'hybridation est constitué du système Start & Stop, d'une batterie et d'un moteur électrique. La batterie est rechargée par l'alternateur couplé au moteur thermique et par le moteur électrique qui fonctionne comme un générateur lors des phases de freinage régénératif. Le moteur électrique quant à lui, assure le démarrage de la voiture et assiste le moteur thermique lorsqu'il a besoin d'un gain en puissance lors d'une accélération ou d'un redémarrage

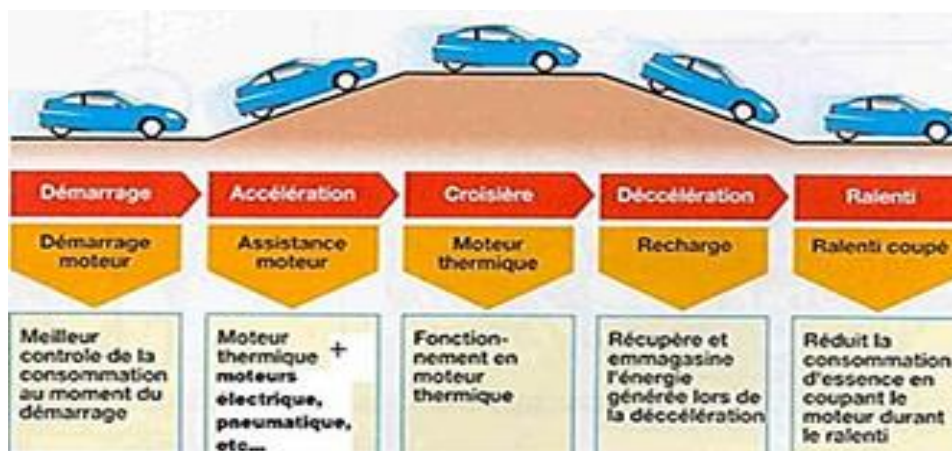


Figure 11: Fonctionnement de la motorisation semi-hybride (démarrage / assistance /récupération de l'énergie)

### ***c) Full-hybrid:***

Le full hybride constitue le dernier niveau d'hybridation. Il s'agit d'un véhicule dont l'hybridation est totale, il comporte deux motorisations utilisant des énergies différentes, le plus souvent du carburant et de l'électricité. L'énergie provient donc du moteur thermique et du moteur électrique. La voiture peut rouler soit en « tout électrique » à faible vitesse et peut atteindre les 30 km/h soit elle peut utiliser les deux énergies, en combinant les deux moteurs afin d'engendrer une puissance maximale lors des accélérations.

À faible vitesse et lorsque la batterie est complètement chargée, le moteur électrique se charge du démarrage, par contre face à de grandes vitesses ou quand la batterie est déchargée, le moteur thermique prend le relais. Enfin, lorsqu'il y a besoin d'une puissance plus conséquente que ce soit pour une reprise ou une accélération, les deux moteurs fonctionnent parallèlement.

### ***d) Plug-in-hybrid:***

Il s'agit d'une variante de la « full-hybrid ». Elle se différencie par le fait qu'elle dispose d'une prise extérieure lui permettant de recharger la batterie indépendamment du fonctionnement du moteur thermique. Elle dispose ainsi d'une autonomie plus importante que les voitures « full hybrid » classique.

(L'autonomie électrique varie de 25 à 80 Km sur une plug-in-hybrid.) [8]

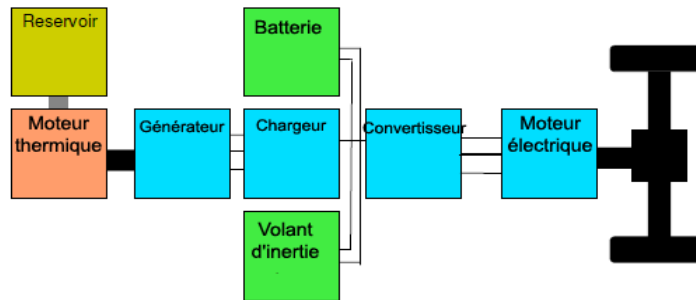
### **1.5.5. Les différents types de montages:**

Il existe différentes architectures utilisées pour le montage des moteurs électriques et thermique sur une voiture hybride. On peut distinguer 3 montages qui sont:

- Le montage série.
- Le montage en parallèle.
- Le montage série-parallèle.

#### **1.5.5.1. Le montage en série:**

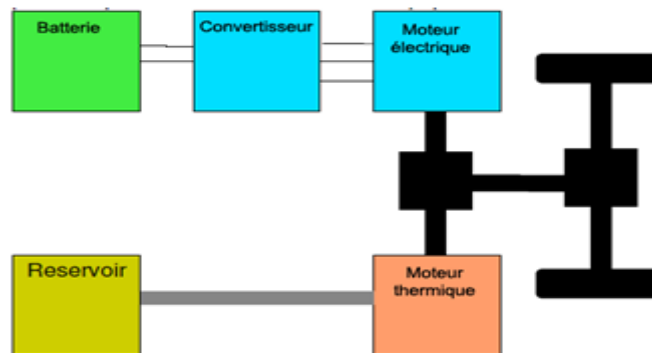
Le moteur thermique est utilisé pour alimenter un générateur d'électricité pour recharger les batteries ou alimenter directement le moteur électrique en transformant l'énergie issue de la combustion en énergie électrique grâce à un générateur. Cette énergie électrique est utilisée par le moteur électrique, caractérisée par une grande puissance, pour assurer la motricité et la propulsion de la voiture. Il n'y a donc aucune liaison mécanique entre le moteur thermique et les roues.



*Figure 12:* Schéma explicatif du montage en série

**1.5.5.2. Le montage en parallèle:**

Le montage en parallèle est l'architecture la plus courante, ce type de montage offre la possibilité de faire tourner les roues avec les 2 moteurs, soit le thermique seul, soit l'électrique seul, soit les deux en même temps «Full hybride». En effet, le moteur thermique assure une transmission en fonctionnement classique, auquel on ajoute un moteur électrique qui fonctionne avec l'énergie des batteries «énergies récupérées lors des phases d'accélération et de freinage du véhicule».



*Figure 13:* Schéma explicatif du montage en parallèle

**1.5.5.3. Le montage série-parallèle:**

C'est la combinaison des deux modes les deux moteurs assurent la rotation des roues et une recharge permanente de la batterie. le moteur thermique et l'électrique sont connectés à la transmission via des voies séparées permettant une propulsion indépendante. Ce système sélectionne les moteurs (électrique ou le thermique) en fonction de différents modes (moteur principal et moteur de réserve, suivant la vitesse) pour obtenir le meilleur rendement possible.

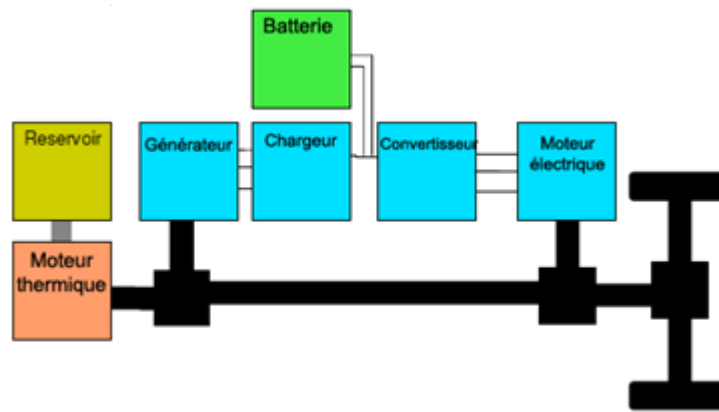


Figure 14: Schéma explicatif du montage série-parallèle

1.5.6. Avantages et inconvénients de chaque montage :

Type de montage	Avantages	Inconvénients
<b>Montage en série</b>	*on peut considérer la voiture comme électrique avec un générateur en plus pour accroître l'autonomie. *la puissance du moteur thermique importe peu.	*Les multiples conversions d'énergies pénalisent le rendement de cette chaîne.
<b>Montage en parallèle</b>	*Hybrides parallèle fonctionnent mieux à des vitesses élevées.	*Le cumul des puissances dépendra de plusieurs facteurs comme la puissance de la batterie, les caractéristiques techniques des moteurs...
<b>Montage série-parallèle</b>	*cette installation garantit plus d'économie sur les frais de l'énergie et offre plus de stabilité. Ce qui peut être expliqué par le fait que ce système sélectionne le type de fonctionnement (thermique ou électrique) pour un meilleur rendement et que les moteurs sont connectés par des voies séparées à la propulsion du véhicule.	*Les pièces de rechange des hybrides série-parallèle sont plus chères par rapport aux pièces des autres montages car c'est un système plus complexe combinant deux montages différents.

Tableau 3: Avantages et inconvénients de chaque montage [8]

**1.5.7.La consommation et le rendement:**

Le rendement de moteur hybride est élevé.

La consommation de certain voitures hybrides selon l'ADEME:

<b>Le type de voiture</b>	<b>La distance (km)</b>	<b>La consommation (L)</b>
3008 hybride4	100 km	3,8 L
Yaris hybride	100 km	3,8 L
D55 hybride	100 km	3,5 L

**Tableau 4: La consommation des voitures hybrides [8]**

*NB.* ADEME c'est l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

**1.5.8.Avantages et inconvénients:****1.5.8.1.Avantages:**

- La motorisation hybride permet de diminuer de 10 à 40% la consommation moyenne de véhicule, suivant le niveau d'hybridation et l'utilisation qui en est faite.
- Permet également de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluants.
- L'avantage de l'hybride sur l'électrique pur est son autonomie, non limité par les batteries.
- Le temps de recharge moindre.

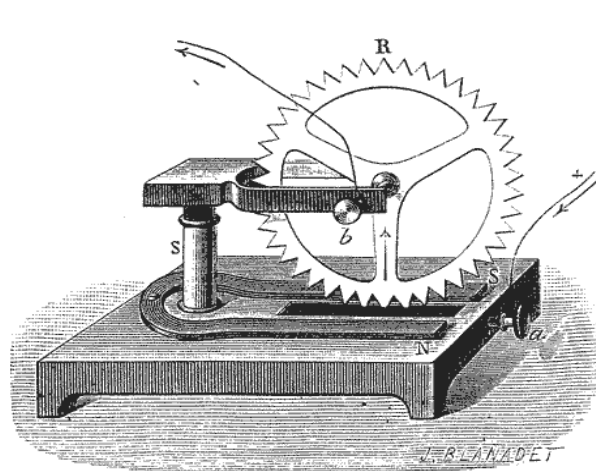
**1.5.8.2.Inconvénients:**

- Les accumulateurs électrochimiques des véhicules hybrides n'auraient pas ne durée de vie aussi longue que le véhicule lui-même: il faudrait donc changer ceux-ci une ou plusieurs fois avant le recyclage total du véhicule, ce qui entraînerait un surcoût de maintenance et une obligation importante de recyclage pour le fabricant
- Faible capacité de la batterie, qui ne permet pas de rouler en mode **100%** électrique sur plus d'une dizaine de kilomètres.

## 2.Moteur électrique:

### 2.1.Histoire:

- **1821:** électromagnétisme.
- **1822:** roue de Barlow.
- **1832:** premier moteur électrique utilisable.
- **1869:** apparition de dynamo.
- **1871:** **Zénobe Gramme** il présente la première génératrice industrielle de courant continu que l'on appelle **Machine de Gamme**.
- **1987:** le premier brevet du moteur électrique à courant alternatif actuel est déposé par **Nicola Tesla**.
- **1889:** **Mikhaïl, Dolivo-Dobrovolski** électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de **1891**. Sans oublié la contribution de **Nicola Tesla** et **Galileo Ferraris** dans ce contexte. [9]



**Figure 15:** Roue de Barlow

### 2.2.Définition:

Le moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique, il est composé de fils conducteurs placés à la périphérie d'un axe tournant. Le façon de disposer les fils conducteurs permet de créer des forces. Ces dernières constitueront le couple moteur (effort de rotation appliqué à un axe par deux forces égales et opposées sr différents points de ce axe) (plus un couple est élevé, plus sa puissance libérée au démarrage de l'outil électrique est grande).



## 2.3.Principe de fonctionnement:

Dans un moteur électrique, le couple est produit par l'interaction des champs magnétique créés au stator et au rotor. Ce couple dépend de l'intensité et de l'angle entre ces deux champs. Pour obtenir un couple constant. Il existe plusieurs types de moteurs électriques, réalisant cette fonction de différentes manières.

## 2.4.Différents types de moteurs électriques:

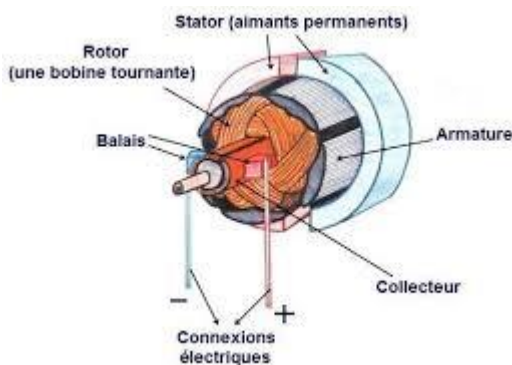
### 2.4.1. Moteur à courant continu:

Dans ce type de moteurs, le champs au stator est fixe et est obtenu par un simple bobinage.

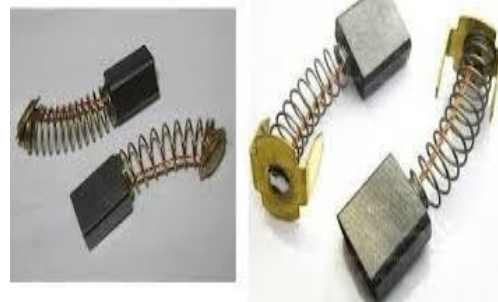
Afin de maintenir un angle à peu près constant, il est nécessaire de déplacer le champs du rotor lorsque celui-ci tourne. Ceci est obtenu par la consommation de plusieurs bobinages au rotor, grâce à un dispositif électromécanique appelé collecteur. Le courant alimentant les bobines du rotor est donc amené par ce dispositif est des balais (appelé parfois charbons (*Figure16*)) frottant sr celui-ci.

Le moteur à courant continu a l'avantage de fonctionner directement en *courant continu*, qui est le type de courant fourni par une batterie. L'électronique de pilotage est aussi très simple.

Son principal inconvénient réside dans le collecteur, qui est une pièce couteuse, fragile, et soumise à l'usure. De plus, ce type de moteur est plus lourd et encombrant que les autres types de moteur, et son rendement est plus faible. C'est pour ces raisons que le moteur à courant continu n'est plus utilisé dans les voitures électriques de dernière génération, les voitures électriques des années 90, telles la Peugeot 106 par exemple, utilisaient ce type de moteur (*Figure17*).



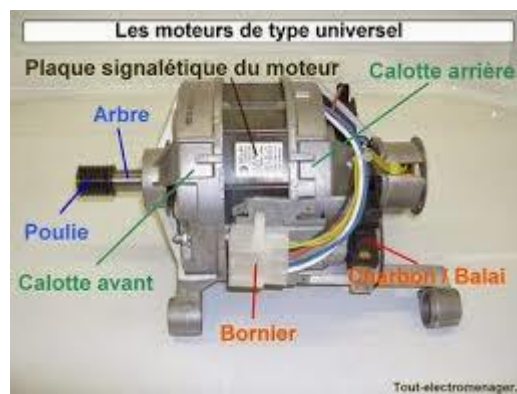
*Figure 17:* Moteur à courant continu



*Figure 16:* Charbons

### 2.4.2. Moteur électrique universel:

Un moteur universel est un moteur électrique qui fonctionne sur le même principe qu'une machine à courant continu à excitation série. Le rotor est connecté en série avec l'enroulement de l'**inducteur**; il peut donc être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif, d'où son appellation. D'une manière générale, le rendement de ce type de machine est mauvais, mais leur coût de fabrication est minime. Ce genre de moteur électrique est utilisé sur de petits et moyens électroménagers, perceuse, aspirateurs et outillages électroportatifs de faible puissance.



*Figure 18:* Moteur électrique de type universel

### 2.4.3. Moteur électrique asynchrone:

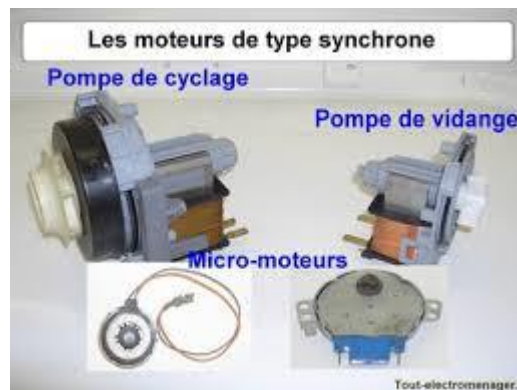
Le moteur électrique asynchrone est plus répandu des moteurs alternatifs. Le moteur asynchrone connu également sous le terme "anglo-saxon" de **moteur à induction**, est un moteur à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces moteurs n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. Le moteur asynchrone est uniquement alimenté par un courant alternatif triphasé. Il a la particularité d'être robuste et simple. Le moteur asynchrone est aujourd'hui le moteur électrique le plus utilisé, car sa gamme de puissance peut aller de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Ce genre de moteur électrique est utilisé sur des machines-outils tels que des nettoyeurs à haute pression.



*Figure 19:* Moteur électrique de type asynchrone

**2.4.4.Moteur électrique synchrone:**

Le moteur synchrone existe dans deux versions soit bobinées pour les fortes puissances et à aimant pour les entrainements à haute performances. Le terme de moteur synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de "rotation de l'arbre de sortie" est égale à la vitesse de "rotation de champ tournant". Les moteurs électriques synchrones sont généralement des moteurs **triphase**. Le rotor, souvent appelé " **roue polaire** ", est alimenté par une source continue ou équipé d'aimants permanents. Le moteur synchrone est souvent utilisé comme **génératrice**. On l'appelle alors "alternateur".



*Figure 20:* Moteur électrique de type synchrone

**2.4.5.Moteur à réluctance variable:**

Le moteur à réluctance variable possède un dispositif prometteur et est toujours en développement. Il s'agit d'un moteur qui comporte un **rotor à encoches** se positionnant dans la direction de la plus faible **réluctance**. Ce rotor, en fer doux, comporte moins de dents qu'il n'y a de pôles au stator. Le étant en fer doux, son mouvement est indépendant du sens d'alimentation des différentes phase. Le choix de la séquence d'alimentation détermine son sens de rotation. Le fonctionnement du moteur est assuré par un pilotage du type unipolaire et l'avance du rotor est

obtenu en excitant tour à tour une paire de pôles.



*Figure 21:* Moteur à réluctance variable

### 2.4.6. Moteur pas à pas:

Les moteurs pas à pas sont de petits moteurs de précision dotés d'un système de **commande électronique**. Un moteur pas à pas permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement angulaire. Ce type de moteur est très courant dans tous **les dispositifs** où l'on souhaite faire un contrôle de vitesse ou de position en boucle ouverte, typiquement dans les systèmes de positionnement. L'usage le plus connu du grand public est dans les imprimantes et les lecteurs.

**Il existe 3 types de moteur pas à pas:**

- Le moteur à réluctance variable.
- Le moteur à aimants permanents.
- Le moteur hybride.



*Figure 22:* Moteur électrique de type pas à pas

### 2.4.7.Moteur linéaire:

Un moteur linéaire est essentiellement un **moteur asynchrone**. Dans celui-ci le rotor " a été déroulé " de sorte qu' au lieu de produire un couple de rotation, il produit une **force linéaire** sur sa longueur en installant un **champ électromagnétique** de déplacement. Les moteurs linéaire sont des moteurs à entrainements directs électromagnétique. Les déplacements linéaire sont réalisés sans avoir recours à des **réducteurs mécanique** donc il en résulte aucune usure de pièce. Le moteur est composé de deux pièces: le slider ( partie mobile ) et le stator. Le slider comprend des aimants en montés dans un tube de précision en acier inoxydable. Le stator comprend les bobinages du moteur, le guidage du slider, et un microprocesseur intégré qui assurent les fonctions de mesure de position, la commutation et la surveillance de la température du moteur.

#### Il existe 2 types de moteur linéaire:

- Ceux à accélération faible utilisés dans le transport.
- Ceux à accélération rapide dans les armes comme le canon magnétique.

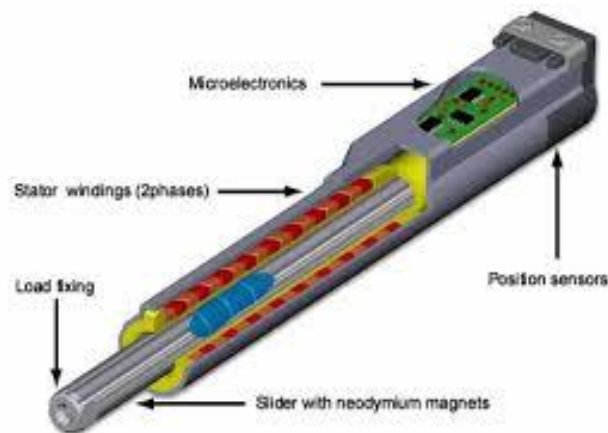


Figure 23: Moteur linéaire

### 2.5.Le rendement de moteur électrique et la consommation des voitures électriques:

- Les moteurs à courant continu ont un rendement d'environ 80% - 85%.

Pour les moteurs à courant alternatif: les moteurs monophasés n'ont pas un bon rendement 50% - 60% pour les moteurs dit universels.

Par contre les moteurs triphasés ont un bon rendement, qu'ils soient asynchrone ou synchrone. Pour certains synchrones on atteint des rendements supérieurs à 95%. Mais ces moteurs nécessitent une gestion par une électronique de puissance assez pointue.

- Une petite voiture électrique consomme environ 25 kw/h aux 100 km.

**2.6. Avantages et inconvénient du moteur électrique:****2.6.1. Avantages:**

- ✓ Peut fournir tout son couple même à vitesse nulle: il n'a donc pas besoin d'un embrayage, et permet des démarrages vifs.
- ✓ Est réversible: si on l'entraîne, par exemple en descendant une pente ou en freinant, il transforme l'énergie mécanique en énergie électrique qui va recharger la batterie. Grace à cela, on limite l'usure et l'échauffement des freins tout en économisant de l'énergie.
- ✓ A un excellent rendement: le rendement peut dépasser 90%.
- ✓ Peut fonctionner sur une large plage de couple et de vitesse: il n'a donc pas besoin d'une boîte de vitesses.
- ✓ N'émet pas de gaz de combustion, ni de particules.
- ✓ Ne perd pas de puissance ni de rendement avec l'altitude.
- ✓ A très peu de pièces d'usure, mis à part les roulements et les balais sur certains moteurs.
- ✓ Est beaucoup plus silencieux et ne vibre pas.

**2.6.2. Inconvénients:**

Le principale inconvénient du moteur électrique est: la batterie qui l'alimente. En effet, la quantité d'énergie contenue dans une batterie est bien moindre que celle contenue dans un réservoir de carburant, et elle ne peut être rechargée aussi rapidement que l'on fait un plein. De plus la batterie reste un élément lourd et couteux.

C'est la cause des faibles performances des batterie que la voiture électrique est restée pendant longtemps un serpent de mer dans l'automobile, mais l'apparition des batteries au lithium, performantes et légères, a permis à la voiture électrique d'émerger enfin.

**❖ Comparaison entre les moteurs:**

- ❖ Moteur diesel / essence
- ❖ Moteur à essence / électrique
- ❖ Moteur GPL / hybride
- ❖ Moteur à hydrogène / diesel

**1. Moteur diesel / Moteur essence:**

	<b>Moteur diesel /essence</b>
<b>Mode d'inflammation</b>	L'essence a besoin d'une étincelle pour s'enflammer, étincelle produite par la bougie d'allumage, tandis que le diesel fonctionne par l'auto-inflammation.
<b>Moment d'injection</b>	Dans le moteur essence, l'injection se fait dans la phase d'admission pour obtenir un mélange air-carburant homogène. Par contre, dans le moteur diesel, le carburant est injecté après la phase de compression, où la température et la pression est idéal pour provoquer L'auto-inflammation.
<b>Les risques d'incendie</b>	Les risques d'incendie sont moindres (pour le diesel) car le point d'inflammation du gazole est plus élevé que celui de l'essence.
<b>Rendement</b>	Dans le moteur diesel, le rendement est élevé par rapport le moteur à essence, à cause de l'augmentation de de Taux de compression dans le moteur diesel.
<b>Bruits</b>	Le moteur à essence est relativement plus silencieux qu'un moteur diesel. Le moteur diesel vibre plus car justement son taux de compression est plus élevé.
<b>Consommation</b>	La différence réside dans le fait qu'avec la même quantité de carburant (un seul plein), le parcours est beaucoup plus de kilomètres avec un moteur diesel qu'avec un moteur fonctionnant à l'essence, alors une consommation plus basse pour le moteur diesel.
<b>Coût de carburant</b>	Le diesel est moins cher que l'essence dans les stations de services.
<b>La pollution</b>	Les <i>gaz</i> d'échappement de moteur diesel sont moins toxiques que les gaz d'échappement de moteur à essence (car ils contiennent moins d'oxyde de carbone).

**Tableau5: Comparaison entre le moteur diesel et le moteur essence**

**2. Moteur essence / Moteur électrique:**

	<b>Moteur essence / électrique</b>
<b>Principe de fonctionnement</b>	Le moteur à essence utilise le carburant (essence) pour le fonctionnement, contrairement le moteur électrique qui utilise la batterie.
<b>Les vibrations (bruits)</b>	Le moteur électrique est silencieux, par contre le moteur essence qui produit les bruits.
<b>Rendement</b>	Le rendement de moteur électrique est supérieur, il peut dépasser le 90% (pas de pertes), par contre, le moteur à essence qui a un rendement plus inférieur par rapport l'électrique à cause des pertes.
<b>La pollution</b>	Le moteur essence est un amis de pollution parce qu'il dégage beaucoup des gaz d'échappement, contrairement le moteur électrique c'est un amis d'entourage parce qu'il ne dégage pas des gaz (les gaz d'échappement sont <b>0%</b> ).

**Tableau 6: Comparaison entre le moteur essence et le moteur électrique**



**3. Moteur GPL / Moteur hybride:**

	<b>Moteur GPL / hybride</b>
<b>Principe de fonctionnement</b>	La voiture GPL contient un moteur à allumage commandé (essence) et une bouteille de GPL, le moteur à allumage commandé fonctionne avec 2 carburants (essence et GPL), contrairement la voiture hybride qui fonction avec un moteur à combustion interne (diesel ou essence), et un moteur électrique secondaire+ une batterie, le moteur thermique alimente la batterie et cette dernière alimente le moteur électrique, et quand le moteur électrique fonctionne la voiture devient <b>100%</b> électrique.
<b>Rendement</b>	Le rendement de moteur GPL est mauvais, par contre le moteur hybride a un rendement plus élevé.
<b>Consommation</b>	La motorisation hybride permet de diminuer de 10 à 40% de la consommation moyenne de véhicule moins que les voitures de GPL.
<b>Coût de carburant</b>	Le coût de GPL est plus inférieure que diesel ou essence. Le GPL, le carburant le moins cher du marché.
<b>La pollution</b>	Le GPL ou gaz propane liquide est constitué de Butane et de Propane, et a la particularité de rejeter moins de monoxyde de carbone, par contre la voiture hybride qui contient un moteur thermique qui dégage plus de CO <sub>2</sub> .

**Tableau7: Comparaison entre le moteur GPL et le moteur hybride**

**4. Moteur diesel / Moteur à hydrogène:**

	<b>Moteur à hydrogène / diesel</b>
<b>Principe de fonctionnement</b>	Le moteur à hydrogène utilise l'hydrogène comme un carburant, et l'autre utilise le diesel aussi comme un carburant
<b>Rendement</b>	Le moteur à hydrogène a un rendement plus élevé (rendement explosif) que le moteur diesel.
<b>consommation</b>	La consommation cycle mixte est 0,76 kg /100 km pour une véhicule fonctionne avec l'hydrogène. La consommation moyenne en combustible est voisine de 190 g/ch pour le moteur diesel.
<b>coût de carburant</b>	Le hydrogène est très cher par rapport le diesel.
<b>La pollution</b>	Quand on parle sur la pollution, le moteur à hydrogène ne produit pas la pollution parce qu'il ne dégage pas les gaz d'échappement comme le moteur diesel, il dégage juste le vapeur d'eau ( $H_2O$ ), alors le diesel est polluant par rapport le moteur à hydrogène.

**Tableau 8: Comparaison entre le moteur diesel et le moteur à hydrogène****Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence des notions générales sur les moteurs et leur différents types puis on a donné le principe de fonctionnement et les avantages et les inconvénients et la consommation de chaque type.

On a conclu que:

Le moteur est un dispositif qui transforme une énergie non-mécanique ( chimique, électrique, thermique par exemple) en une énergie mécanique ou travail.

### **REFERENCE:**

- [1] [Https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_Diesel&hl=fr-DZ](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Moteur_Diesel&hl=fr-DZ).
- [2] JN Beury exemple des machines thermiques.
- [3] Pierrick Calvet et Labella Florent Le Moteur Turbo Diesel à Injection Directe (17 mai 2002).
- [4] <Http://www.fiches-auto.fr/consommation-audi/&hl>.
- [5] [Https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_%25C3%25A0\\_allumage\\_command%25C3%25A9&hl=fr-DZ](Https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Moteur_%25C3%25A0_allumage_command%25C3%25A9&hl=fr-DZ).
- [6] Modélisation de la combustion d'un moteur à essence (project combustion.PDF, page8).
- [7] [Https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_%25C3%25A0\\_hydrog%25C3%25A8ne&hl=fr-DZ](Https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Moteur_%25C3%25A0_hydrog%25C3%25A8ne&hl=fr-DZ)
- [8] PDF : Rapport-P6-2015-25.
- [9] [Https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Machine\\_%25C3%25A9lectrique&hl=fr-DZ](Https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Machine_%25C3%25A9lectrique&hl=fr-DZ)

# **CHAPITRE II**

## **Le Moteur à hydrogène**

### Introduction :

Dans ce chapitre, on va voir deux parties :

Dans la première partie, nous allons voir des notions générales sur l'hydrogène et leur composition chimique et son production puis on va voir les différentes techniques de stockage de ce combustible et l'utilisation de l'hydrogène et les avantages et les inconvénients de combustible.

Dans la deuxième partie, on va voir c'est quoi un moteur à hydrogène, quelle sont ces types et c'est quoi le principe de fonctionnement de chaque type, après nous allons citer les avantages et les inconvénients de moteur à hydrogène.

### I/ l'hydrogène:

#### 1. Définition de l'hydrogène:

L'**hydrogène** est l'élément le plus abondant de l'Univers. C'est le principal composant des étoiles et des planètes gazeuses.

En général, l'hydrogène se trouve rarement à l'état pur, qui plus est sur terre. Il est généralement combiné avec d'autres atomes tels que l'oxygène dans l'eau (**H<sub>2</sub>O**) ou le carbone dans les hydrocarbures (**CH<sub>4</sub>**, **C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>**, ...).

On peut le trouver sous la forme gazeuse lorsque deux atomes d'hydrogène sont réunis, on parle alors de « **dihydrogène** », et sous forme liquide lorsque le gaz a été refroidi à **-252.87°C**.

#### 2. Composition de l'hydrogène:

L'**hydrogène** est l'élément chimique de numéro atomique 1, de symbole **H**. L'hydrogène présent sur Terre est presque entièrement constitué de l'isotope **<sup>1</sup>H** (un proton, zéro neutron) ; il comporte environ 0,01 % de **<sup>2</sup>H** (un proton, un neutron). Ces deux isotopes sont stables. Un troisième isotope **<sup>3</sup>H** (un proton, deux neutrons), instable, est produit dans les explosions nucléaires. Ces trois isotopes sont respectivement appelés « **protium** », « **deutérium** » et « **tritium** ». [1]

L'hydrogène peut avoir les nombres oxydation **0** (dihydrogène **H<sub>2</sub>** ou hydrogène métallique), **+1** (dans la plupart de ses composés chimiques) et **-1** (dans les hydrures métalliques). L'hydrogène est un élément électropositif, fréquemment ionisé à l'état **H<sup>+</sup>** ou **H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>**. Mais il forme aussi des liaisons covalentes, notamment dans l'eau et la matière organique.

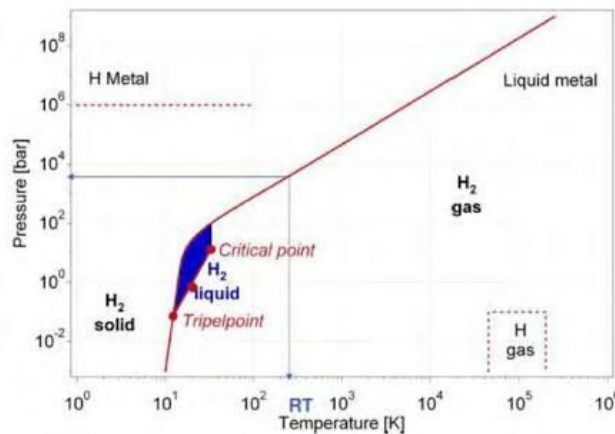


Figure 24: Diagramme de phase de l'hydrogene [2]

L'hydrogene est le principale constituant du Soleil et de la plupart des étoiles (dont l'énergie qui provient de la fusion thermonucléaire de cet hydrogene), et de la matière interstellaire ou intergalactique.

C'est un composant majeur des planètes géants, sous forme métallique au cœur de Jupiter et de Saturne, et sous la forme de dihydrogene solide, liquide ou gazeux dans leurs couches plus externes et dans les autres planètes géantes. Sur Terre il est surtout présent à l'état d'eau liquide, solide (glace) ou gazeuse (vapeur d'eau), mais il se trouve aussi dans les émanations de certains volcans sous forme H<sub>2</sub> et de méthane CH<sub>4</sub>.

Ce gaz a été mis en évidence par Cavendish en 1766, qui l'a appelé « air inflammable » parce qu'il brûle ou explose en présence de l'oxygene, où il forme de la vapeur d'eau. Lavoisier a désigné ce gaz par le nom hydrogene, composé du préfixe « hydro », du grec ὑδωρ (*hudôr*) signifiant « eau », et du suffixe « gène », du grec γεννᾶν (*gennan*), « engendrer ». Il s'agit du gaz de formule chimique H<sub>2</sub> dont le nom scientifique est désormais « dihydrogene ». [3]

H																	He																												
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																												
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																												
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																												
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																												
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																												
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn																																		
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table>																		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																

Figure 25: L'hydrogene est le premier élément de la classification périodique

### **3. Les états de l'hydrogène: [4]**

La production d'hydrogène, ou plus exactement de dihydrogène, s'obtient le plus souvent par un procédé d'extraction chimique d'hydrocarbures fossiles. Le dihydrogène peut également être extrait de l'eau via la production biologique par des **algues**, ou par **électrolyse**, par **réduction chimique**, ou encore par **la chaleur (thermolyse)** ; ces autres méthodes sont moins propices à la production industrielle, par rapport à celle dérivée des hydrocarbures par voie chimique. La découverte et le développement de méthodes moins coûteuses de production d'hydrogène en masse permettraient d'accélérer la mise en place d'une « **économie hydrogène** ».

#### **3.1. Hydrogène gazeux:**

Dans des conditions normales de pression et de température, c'est à dire les conditions qui intéressent la chimie et les sciences de la Terre, l'hydrogène est présent sous la forme d'un gaz moléculaire de dihydrogène, de formule **H<sub>2</sub>**. En effet, le dihydrogène est capable de former dans les galaxies des nuages moléculaires à l'origine de la formation des étoiles.

Comme dit précédemment, à basse pression et à haute température, l'hydrogène est présent sous la forme de gaz monoatomique, de formule **H**. C'est dans cette forme que nous pouvons le trouver dans l'espace, en tant que gaz interstellaire ou intergalactique.

C'est à cause de l'immensité de l'espace, et ce malgré la faible densité du gaz, que l'hydrogène monoatomique constitue environ **75%** de la masse baryonique de l'Univers.

La masse baryonique est un terme désignant toute la matière composée de particules élémentaires appelées baryons. Cela correspond alors aux protons et neutrons auxquels on lie des électrons, appelés leptons, qui composent les atomes, les molécules et toutes les structures visibles dans l'Univers observable.

#### **3.2. Hydrogène solide:**

Il est possible d'obtenir de l'hydrogène solide en abaissant la température en dessous du point de fusion du dihydrogène, c'est à dire à **14,01 K**, soit **-259,14°C**.

Cet état fut obtenu pour la première fois en **1899** par **James Dewar**.

**3.3. Hydrogène métallique:**

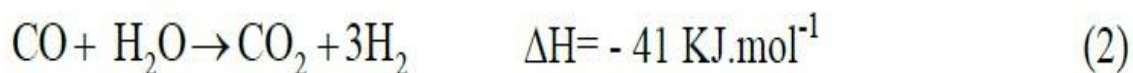
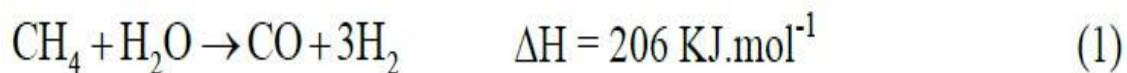
Lorsqu'il est soumis à de très fortes pressions et à de très basses températures, l'hydrogène atteint une phase dite métallique. Certains estiment qu'il existe un intervalle de pressions sous lesquelles, même soumis à de très basses températures, l'hydrogène métallique est liquide.

**4. Les techniques de production de l'hydrogène :****4.1. Production d'hydrogène par vapo-reformage :**

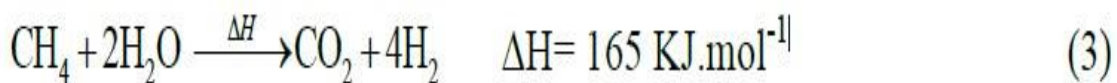
Le vaporeformage [5], ou reformage à la vapeur, consiste à transformer les hydrocarbures en gaz de synthèse par réaction avec le vapeur d'eau et en présence d'un catalyseur à base de nickel.

Le gaz naturel est la source la plus propre des hydrocarbures (il est composé en majorité en méthane) dans la synthèse de l'hydrogène. Le procédé de vapo-reformage du gaz naturel se fait en trois étapes :

En premier, le méthane est prétraité (débarrassé des impuretés telles que, les sulfures), ensuite introduit avec la vapeur d'eau dans le réacteur catalytique (nickel et alliages nickel-fer), à haute température (700C° - 900C°) et pression (15 - 30 atm) pour former un mélange de l'hydrogène et de monoxyde de carbone (réaction 1). Dans la deuxième étape, après un refroidissement, une réaction Shift dans laquelle le monoxyde formé précédemment réagit encore avec la vapeur d'eau pour produire du dioxyde de carbone et de l'hydrogène (réaction 2).



La réaction globale peut être écrite ainsi :



Globalement, le bilan des deux réactions est endothermique. Le mélange gazeux à la sortie de réacteur est approximativement composé de 70% hydrogène ,25% CO2 ,4% méthane et moins de 1% de CO. La troisième étape consiste à séparer ces gaz. Le procédé industriel le plus utilisé c'est l'adsorption du CO2 sur charbon actif, permettent d'obtenir de l'hydrogène pur à environ 99,99%.



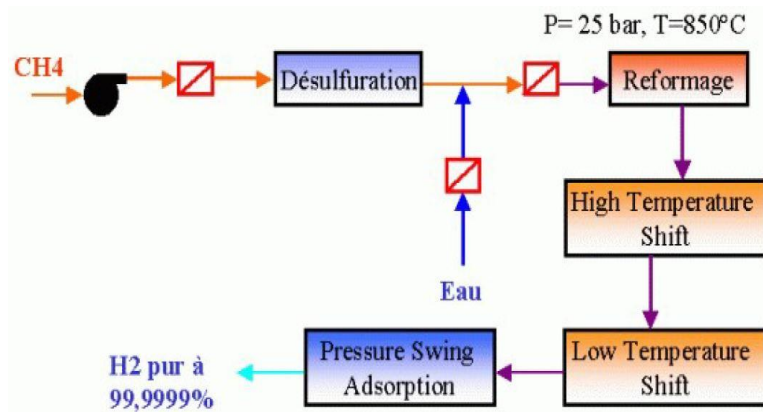


Figure 26: Production d'hydrogene par vapo-reformage

4.2. L'électrolyse de l'eau :

Bien que l'électrolyse de l'eau soit l'une des méthodes les plus simples pour la production d'hydrogene et qu'elle soit connue depuis environ 200 ans, sa part dans la production totale d'hydrogene est encore faible.

A l'échelle industrielle, deux procédés ayant le plus grand intérêt et caractérisées la non-émission de gaz à effet de serre, sont l'électrolyse utilisant une source d'électricité renouvelable (solaire, éolienne, hydraulique...) et l'électrolyse à haute température à travers le nucléaire. Pour que cette technique soit compétitive, il est impératif de réduire la consommation d'énergie, le coût et l'entretien des électrolyseurs et d'augmenter leur rendement.

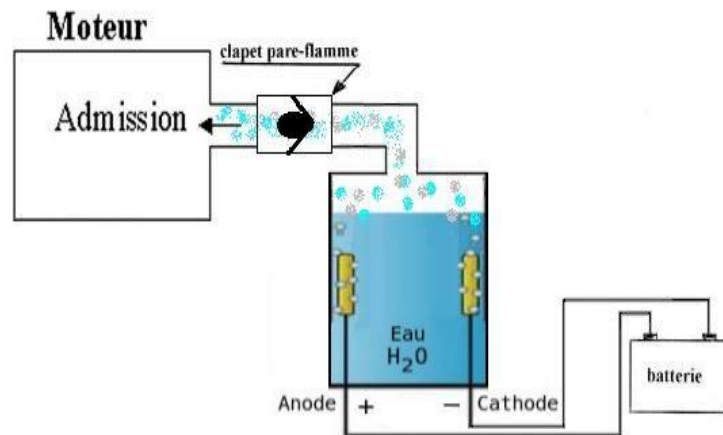


Figure 27: L'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogene et en oxygene gazeux. Elle est effectuée par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes séparées par une membrane et immergées dans un électrolyte liquide ou solide.

En solution acide, on admet généralement que la décomposition de l'eau s'effectue suivant les réactions



En solution alcaline, par contre, les ions  $\text{OH}^-$  prédominent et le phénomène est habituellement exprimé par :



Dans les deux cas, la réaction globale s'écrit :



Avec  $\Delta H = 285 \text{ KJ/mol}$   $\text{H}_2\text{O}$  enthalpie de dissociation de l'eau.

### 4.3. Production à partir du nucléaire :

Une autre possibilité de production d'hydrogène réside dans le nucléaire.

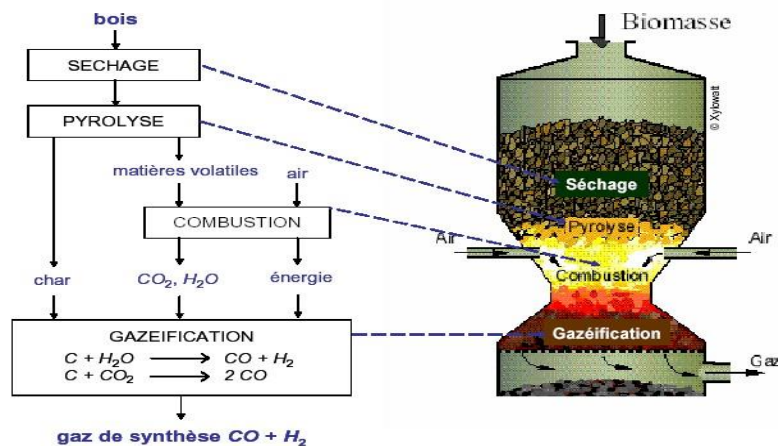
Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires dits de 4ème génération.

Non seulement plus sûrs, ils permettront une moindre consommation de combustible nucléaire, une production plus faible de déchets mais également en plus de la fourniture d'électricité, la production d'hydrogène. Les rendements devraient être de l'ordre de 50%. Aujourd'hui, une dizaine de pays travaillent sur cette innovation technologique : la France, les USA, le Japon, le Royaume-Uni, la Suisse, l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada et la Corée du Sud. En outre, au total, six nouvelles technologies de réacteur sont à l'étude : un réacteur refroidi avec de l'eau supercritique, un réacteur à neutrons rapides à refroidissement avec au choix sodium liquide ou alliage de plomb liquide, un réacteur à gaz à très haute température et un réacteur à sels fondus.

. **Le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique)** a choisi de retenir en particulier le réacteur à gaz à haute température (1100°C), noté **VHTR**. Le haut niveau de température permet la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. S'agissant du Japon et des USA, ils se tournent plutôt vers le réacteur à refroidissement au sodium liquide. Néanmoins, cette technologie ne serait commercialement disponible que vers 2030-2040.

**4.4. Production à partir du charbon :**

La production d'hydrogène à partir du charbon est plus complexe que la production de l'hydrogène du gaz naturel. Le coût de l'hydrogène résultant est également plus haut, mais puisque le charbon est abondant dans beaucoup des régions du monde et sera employé probablement comme source d'énergie de réserve et il est intéressant d'explorer le développement des technologies propres pour son usage. Une réaction typique pour le processus est donnée dans l'équation :



*Figure 28:* Production à partir du charbon

**5. Stockage de l'hydrogène:**

**L'hydrogène** est le gaz le plus léger de tout l'Univers : un litre de ce gaz ne pèse que **90 mg** à pression atmosphérique, il est donc environ 11 fois plus légères que l'air que nous respirons.

Il faut un volume d'environ **11 m<sup>3</sup>**, c'est-à-dire le volume du coffre d'un grand utilitaire, pour seulement stocker **1 kg** d'hydrogène, soit la quantité nécessaire pour parcourir **100 km**.

Il existe trois méthodes essentielles pour le stockage d'hydrogène : [6]

- a) Le stockage à haute pression sous forme gazeuse (CGH<sub>2</sub>).
- b) Le stockage à très basse température sous forme liquide (LH<sub>2</sub>).
- c) Le stockage moléculaire (SSH<sub>2</sub>).

Pour un transport plus facile et plus efficace, l'hydrogène est stocké dans des réservoirs ou des bouteilles en matériaux composites. Les chercheurs d'Air Liquide travaillent notamment sur la tenue mécanique des matériaux composant ces bouteilles au cours du temps. Ils effectuent des tests de fatigue accélérée grâce à des cycles de remplissage et de perméabilité à très haute pression pour s'assurer de leur étanchéité parfaite. Toutes ces recherches vont poser les

fondements scientifiques du comportement des matériaux et permettre de déterminer les critères de dimensionnement des réservoirs. Grâce à ces travaux de recherche, Air Liquide est un acteur décisif dans la définition des normes de sécurité qui devront être mises en place pour assurer une sécurité maximale pour l'utilisateur.

Autre axe de recherche du Groupe, le développement des technologies de contrôle des bouteilles durant leur utilisation. Cette étape est, elle aussi, indispensable pour la sécurité des utilisateurs et consiste à s'assurer de l'absence de défaut comme des microfissures. Pour cela, les chercheurs s'approprient des méthodes de contrôle non destructif comme par exemple l'émission acoustique permettant de détecter ce type d'anomalies.



*Figure 29:* Les bouteilles de stockage de l'hydrogène

### a) Stockage gazeux sous haute pression :

Le conditionnement sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes sont toutefois nombreuses.

Léger et volumineux, le gaz doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. L'hydrogène est stocké à **350 bars** aujourd'hui, et les développements concernent maintenant des réservoirs pouvant résister à des pressions de **700 bars**.

Le risque de fuite gazeuse doit également être pris en considération, l'étude du stockage haute pression consiste à éprouver la résistance des matériaux à l'hydrogène sous pression. Ces matériaux doivent être résistants mais relativement légers. Les réservoirs métalliques, utilisés actuellement, se révèlent encore coûteux et lourds au regard de la quantité de gaz qu'ils peuvent emporter. Des réservoirs non plus métalliques mais en matériaux polymères sont en cours d'élaboration pour répondre à ces contraintes.



Figure 30: Bouteille de l'hydrogène gazeux (sous haute pression)

**b) Stockage sous forme liquide:**

Le stockage liquide à 20 K (-253°C) [7], sous 10 bars permet d'atteindre des densités volumique et massique intéressantes mais nécessite des réservoirs à l'isolation thermique particulièrement poussée pour minimiser l'évaporation.

Dans ces conditions, le liquide est 800 fois plus dense que le gaz à température ambiante et selon le type de réservoir cryogénique utilisé, une capacité massique de l'ordre de 6,5% est obtenue pour les systèmes complets. Les procédés liquéfaction du gaz font appel à des techniques assez complexes, qui associent apport de froid et détente adiabatique. D'autres procédés peuvent être envisagés comme le cycle de Brayton qui utilise de l'hélium liquide dont la température de liquéfaction est inférieure à celle de l'hydrogène ou la réfrigération par cycles magnétothermiques.

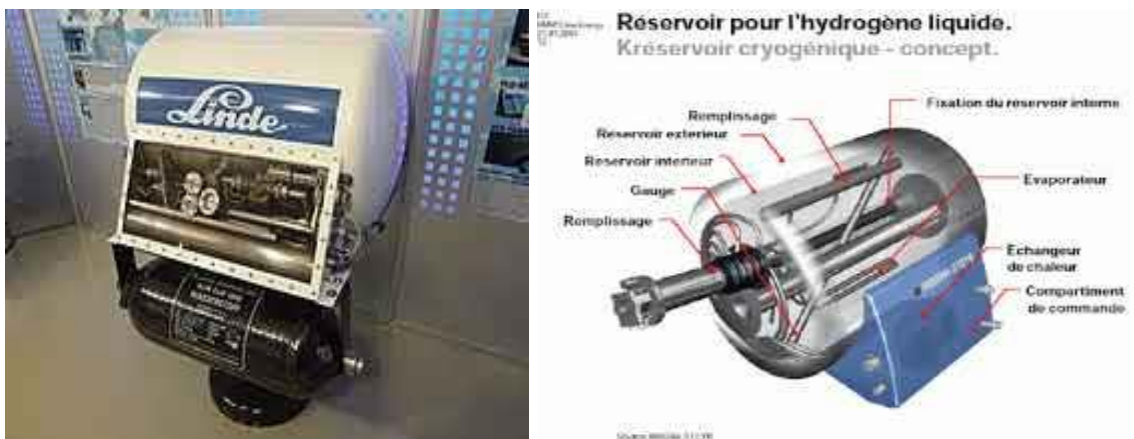


Figure 31: Réservoir pour l'hydrogène liquide

### c) Stockage moléculaire:

C'est un des axes de recherche prometteurs qui va permettre d'utiliser l'hydrogène pour les voitures.

Le stockage sur des substrats sous forme absorbée, surtout sur des hydrures métalliques, présente une densité volumique particulièrement intéressante mais une densité massique faible. Qui plus est la cinétique, la température et la pression de cyclage restent des points durs à maîtriser.

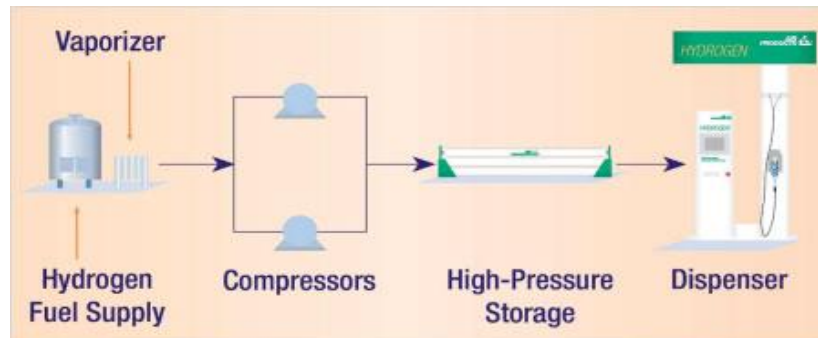
Quelque équipe à travers le monde étudie la piste des hydrures métalliques. Ces alliages sont, en effet, capables d'absorber et de stocker l'hydrogène, à l'image d'une éponge, de manière stable et sûre. Uniquement, on ne connaît que particulièrement mal les mécanismes qui autorisent ces composés d'absorber l'hydrogène gazeux. Un mystère que l'équipe de **Klaus Yvon**, professeur au Laboratoire de cristallographie de l'université de Genève, a réussi à éclaircir grâce à une étude soutenue par le Fonds national suisse (FNS) et parue récemment dans la revue *Physical Review Letters*.

L'alliage métallique **LaMg<sub>2</sub>Ni** (lanthane, magnésium, nickel) est un conducteur électrique. En présence d'hydrogène (**H<sub>2</sub>**), il forme l'hydrure métallique **LaMg<sub>2</sub>NiH<sub>7</sub>** qui, lui, est un isolant. Cette propriété pourrait en faire un détecteur d'hydrogène efficace et bon marché. Qui plus est, les chercheurs ont enfin compris le mécanisme d'absorption pour ce type d'hydrures, qui peuvent contenir une plus grande densité d'hydrogène que l'hydrogène liquide lui-même ! Enfin, un hydrure métallique a été trouvé par les allemands en **2003** pour construire un réservoir pour un sous-marin militaire à hydrogène. Comme l'ensemble des hydrures, ce réservoir allemand chauffe en stockant de l'hydrogène et refroidit en libérant l'hydrogène, cet hydrure est lourd, cher et complexe à créer. Néanmoins des sous-marin allemands et bientôt grecs fonctionnent grâce à ce type de stockage. [8]

### 6. Stations de ravitaillement en hydrogène :

**Air products** offre un équipement complet pour les stations de ravitaillement en hydrogène. Nous possédons une importante expérience dans l'approvisionnement en hydrogène pour une large gamme de véhicules, notamment des chariots élévateurs, des automobiles et des bus.

L'hydrogène est comprimé et stocké à la station de ravitaillement à une pression d'environ **7000 psi (483 bar)**. Cet hydrogène à haute pression est ensuite livré aux véhicules à une pression de **250 ou 350 bars**. Beaucoup de nouveaux véhicules à pile à combustible nécessitent une pression de remplissage de **700 bars**.



*Figure 32:* Station de ravitaillement en hydrogène

## 7. L'utilisation de l'hydrogène:

En tant que vecteur énergétique, l'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou énergie cinétique.

On peut l'utiliser:

- Pour des applications stationnaires, à travers la production d'électricité et/ou de chaleur dans les bâtiments (principe de cogénération).
- Pour des applications industrielles en utilisant l'hydrogène comme composé chimique.
- Pour des applications mobiles, en utilisant l'hydrogène comme force motrice. La transformation de l'hydrogène en énergie nécessite un convertisseur d'énergie : la pile à hydrogène (ou pile à combustible).
- L'hydrogène est principalement utilisé pour la production d'ammoniac et de nombreux autres composés organiques, Il a également été très largement utilisé comme gaz pour gonfler les dirigeables. Mais cela changea suite à l'accident du Hindenburg en 1937, puisqu'il sera remplacé par l'hélium, L'hydrogène est également utilisé pour la production de bombes à hydrogène, également appelées bombes H, dans lesquels l'hydrogène fusionne pour donner de l'hélium.



*Figure 33:* La bombe d'hydrogène

A Paris, la compagnie de taxi **Hype** roule depuis 2015 avec des véhicules à l'hydrogène. Elle souhaite exploiter 200 taxis dans la capitale française d'ici fin 2018. Une soixantaine de taxis Hype pourraient débarquer prochainement à **Bruxelles**.



*Figure 34:* Un taxi hype à paris

## **8. L'hydrogène est une source d'énergie dangereuse à manipuler :**

Depuis la catastrophe du **Hindenburg**, un dirigeable gonflé avec **200.000 m<sup>3</sup>** d'hydrogène qui, en **1937**, s'est embrasé en moins d'une minute, tuant 35 personnes, ce gaz est synonyme de "**danger**". Comme tout combustible, l'hydrogène peut s'enflammer et/ou exploser en cas de fuite.

L'hydrogène est comprimé dans des bouteilles avant d'être refroidi pour pouvoir être distribué. Il est stocké dans un réservoir sous très haute protection. Afin d'éviter les fuites, le plein se fait



grâce à un embout qui ressemble à ceux utilisés en **Formule 1**. La pompe ne démarre pas tant que cet embout n'est pas correctement engagé. **Les pompes** sont dotées d'une technologie infrarouge qui communique avec l'ordinateur de bord de la voiture et gère le remplissage du réservoir. Il est bien sûr interdit de fumer à proximité de la station d'hydrogène.

### **9. L'hydrogène est plus dangereux que les carburants traditionnels:**

Ce postulat est à nuancer. Certes, comme tout combustible, l'hydrogène peut s'enflammer et/ou exploser en cas de fuite. Néanmoins, pour comparer les niveaux de dangerosité entre les carburants traditionnels et l'hydrogène, il convient de discerner la nature du risque évalué.

**Risque de fuite :** la petite taille de la molécule d'hydrogène lui permet de s'échapper à travers des ouvertures de taille extrêmement faible. Le risque de fuite est donc plus élevé avec l'hydrogène qu'avec les autres combustibles.

**Risque d'inflammabilité :** lorsqu'une nappe d'hydrogène se forme, le risque d'inflammabilité est nettement plus élevé que pour une nappe d'essence ou de gaz. L'énergie requise pour l'enflammer est environ 10 fois plus faible que pour le gaz naturel.

**Risque de formation d'une nappe explosive :** l'hydrogène se disperse plus rapidement que les carburants traditionnels. Il se dilue 4 fois plus vite dans l'air que le gaz naturel et 12 fois plus vite que les vapeurs d'essence. Cette volatilité est un facteur protecteur limitant la formation de nappes d'hydrogène.

Rappelons que l'hydrogène est utilisé dans l'industrie. Des moyens de prévention permettent d'en limiter les risques, comme par exemple l'ajout d'un gaz inerte (tel que le **CO<sub>2</sub>**) pour diminuer l'inflammabilité de l'hydrogène. L'utilisation d'un système de ventilation et l'inflammation délibérée de l'hydrogène évitent aussi la formation d'une nappe explosive. Si une réglementation est appliquée en milieu industriel, elle reste encore à définir pour les applications grand public de l'hydrogène. Des mesures de sécurité en garantiraient l'utilisation, notamment dans le cas des véhicules à hydrogène et des infrastructures de distribution.

### **10. Avantages et inconvénients de l'hydrogène :**

#### **a. Avantages:**

- L'hydrogène étant le plus petit élément de la classification périodique, il peut se diffuser rapidement dans l'air (quatre fois plus vite que le gaz naturel), ce qui est un facteur positif pour la sécurité.
- Mais aussi, l'hydrogène qui est incolore, inodore et non corrosif à l'avantage d'être particulièrement énergétique : 1 kg d'hydrogène libère environ trois fois plus d'énergie qu'un kg d'essence.
- L'hydrogène combiné à l'oxygène n'émet pas de dioxyde de carbone ni aucune autre particule polluante, mais uniquement de la vapeur d'eau.

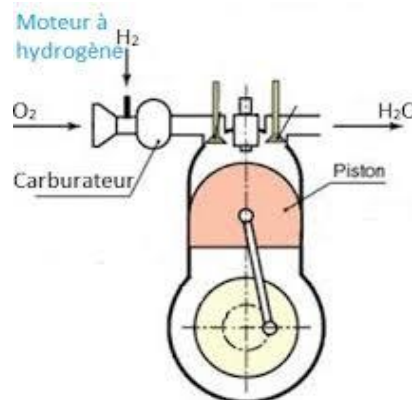
#### **b. Inconvénients:**

- L'hydrogène doit être utilisé avec précaution. En effet, l'hydrogène est un gaz inflammable et explosif, de ce fait, il faut éviter tout risque de fuite, et toute situation confinée peut s'avérer dangereuse.
- Même si l'hydrogène est l'élément le plus abondant, il n'en existe pratiquement pas à l'état pur, c'est-à-dire sous forme de dihydrogène. Ce dernier doit donc être produit. La production d'hydrogène nécessite plus d'énergie que celui-ci peut en produire. L'extraction d'hydrogène nécessite de l'énergie qui va être produite par les centrales thermiques à charbon, à pétrole, à gaz naturels. Le problème vient donc de ces centrales dans la mesure où elles libèrent du dioxyde de carbone ainsi que d'autres gaz à effet de serre.

Pour finir, vient le problème du stockage de l'hydrogène. En effet, la légèreté de l'hydrogène se révèle être un défaut dans la mesure où, à poids égal, l'hydrogène occupe un volume beaucoup plus important qu'un autre gaz. Concrètement, il faut **4,6 L** d'hydrogène comprimés à **700 bars** pour produire autant d'énergie qu'avec un **1 litre** d'essence. Il y a là un grand inconvénient car ces volumes importants sont une contrainte pour le transport et le stockage sous forme gazeuse. De ce fait, il est très difficile de concevoir un réservoir compact, léger, sûr et peu coûteux tout en gardant une autonomie relativement élevée.

**II/ Le moteur à hydrogène:****1. Définition:**

Le moteur à hydrogène est un moteur à combustion interne qui utilise l'hydrogène comme un carburant.



*Figure 35:* Moteur à hydrogène

**2. Différents types de moteurs à hydrogène:**

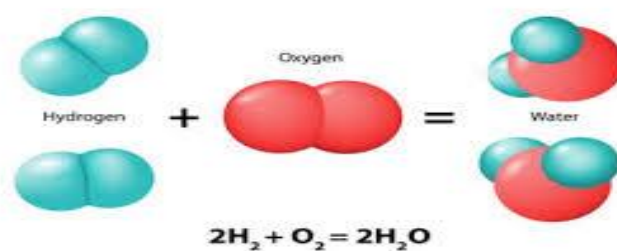
Il existe deux sortes de moteur à hydrogène:

- Moteur à hydrogène thermique (moteur à explosion).
- Moteur à hydrogène électrique avec pile à combustible.

**2.1. Moteur à hydrogène thermique :**

Le moteur à hydrogène thermique est un moteur à combustion interne (moteur à explosion), permet de convertir l'énergie chimique entre le dihydrogène **H<sub>2</sub>** et le dioxygène **O<sub>2</sub>** en énergie mécanique.

Cette combustion est théoriquement très propre, puisqu'elle ne génère que de la vapeur d'eau pure **H<sub>2</sub>O** et **NO<sub>x</sub>** (d'oxyde d'azote) et de la chaleur.



*Figure 36:* La réaction entre l'hydrogène et l'oxygène produit la vapeur d'eau

### ❖ Principe de fonctionnement : [10]

Ces moteurs sont dits à combustion interne, car la combustion du carburant et la détente des gaz produits ont lieu dans chaque cylindre à l'intérieur.

Le moteur à combustion interne fonctionne suivant un cycle à quatre temps :

- a) L'admission du mélange air-carburant par le mouvement du piston vers le bas du cylindre.
- b) La compression par le mouvement du piston vers le haut du cylindre.
- c) La combustion déclenchée par l'étincelle électrique de la bougie (moteur essence), le mélange brûle et repousse le piston vers le bas du cylindre : c'est la phase motrice du cycle. Dans le cas du moteur diesel, l'allumage est obtenu sans étincelle par la seule compression du mélange qui est introduit sous pression dans le cylindre grâce à un injecteur.
- d) L'échappement des gaz brûlés repoussés par le mouvement du piston vers le haut du cylindre, Le moteur est alors prêt pour le cycle suivant. Une soupape assure l'ouverture du cylindre durant l'admission, une autre durant l'échappement, elles sont toutes les deux fermées durant la compression et la détente. Le mouvement linéaire du piston est converti en rotation par un ensemble bielle –manivelle. Un moteur d'automobile comporte couramment 4 ou 6 cylindres dont les cycles sont décalés dans le temps afin d'assurer une rotation régulière.

Le moteur à l'hydrogène ne change rien au principe, seuls quelques changements :

- Le carburant introduit dans les cylindres est gazeux (hydrogène).
- L'hydrogène est très sensible à l'auto-allumage (même principe de moteur diesel qui fonctionne avec l'auto-inflammation).
- La combustion étant environ six fois plus rapide que celle de l'essence.
- Le moteur à hydrogène ne génère pas les gaz polluants (comme  $\text{CO}_2$ ), il génère juste le vapeur d'eau  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{NO}_x$  (d'oxydes d'azote) et la chaleur.



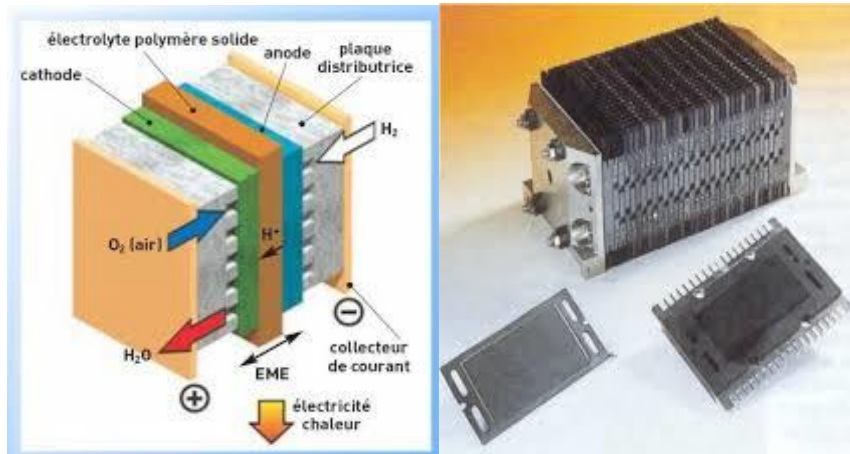
**Figure 37:** Une véhicule à hydrogène fonctionne avec un moteur à hydrogène thermique

### 2.2. Moteur à hydrogène électrique avec pile à combustible :

Une **pile à combustible** est une pile dans laquelle la génération d'une **tension électrique** se fait grâce à l'**oxydation** sur une **électrode** d'un **combustible réducteur** (par exemple l'**hydrogène**), couplée à la **réduction** sur l'autre électrode d'un **oxydant**, tel que l'**oxygène** de l'air.

Les véhicules à pile combustible combinent :

- ✓ Un moteur électrique.
- ✓ Un générateur chimique à pile à combustible.



*Figure 38:* Une pile à combustible

#### ❖ Principe de fonctionnement de la pile à combustible :

L'hydrogène stocké dans le réservoir est envoyé vers une pile à combustible, où il rencontre l'oxygène capté dans l'atmosphère. Ce mélange génère de l'électricité qui fait tourner le moteur.

Une cellule élémentaire est constituée de 2 éléments:

- ✓ Deux électrodes.
- ✓ Un électrolyte.

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. Anode, on amène le combustible (l'hydrogène). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène).

Une pile à combustible produit une tension électrique d'environ **0,7 à 0,8V** selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur.

Leur température de fonctionnement varie de **60 à 200°C** selon les modèles. L'eau est généralement

Évacuée sous forme de vapeur avec l'excédent de dioxygène.

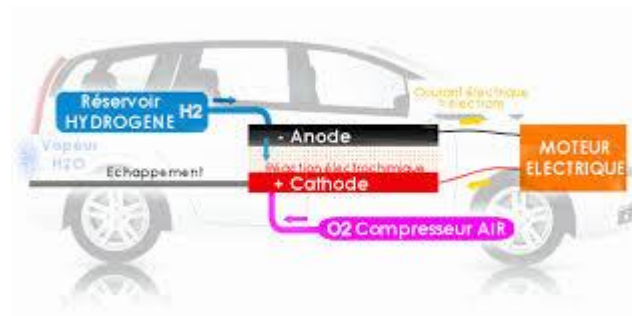


Figure 39: Principe de fonctionnement de la pile à combustible

### 2.2.1. Différentes types de pile à combustible : [11]

Il existe plusieurs types de piles à combustible dont les plus connues sont :

- La pile à membrane échangeuse de protons.
- La pile à oxyde solide.

#### 2.2.1.1. La pile à membrane échangeuse de protons :

Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons comporte :

- **Deux plaques bipolaires** : une pour distribuer l'hydrogène, une autre pour distribuer l'oxygène et évacuer l'eau.
- **Deux électrodes** : une anode et une cathode pour faire circuler le courant électrique (électrons).
- **Une membrane échangeuse de protons faisant fonction d'électrolyte** : elle bloque le passage des électrons et laisse passer les ions  $H^+$ .
- **Des catalyseurs (platine)** : qui accélèrent les réactions entre les gaz.

L'hydrogène (provenant d'une électrolyse ou d'un reformage d'hydrocarbures) entre par la plaque bipolaire à gauche. Arrivé à l'anode, le dihydrogène ( $H_2$ ) se dissocie (oxydation) en ions  $H^+$  et en électrons selon :



Les ions traversent alors la membrane, mais les électrons, bloqués, sont contraints d'emprunter un circuit extérieur, ce qui va générer un courant électrique.

A la cathode, les ions hydrogène, les électrons, et du dioxygène (pur ou provenant de l'air) se rencontrent pour former de l'eau selon la réaction :



L'eau et le dioxygène passent par la plaque bipolaire droite.

Cette réaction va produire également de la chaleur pouvant être récupérée.

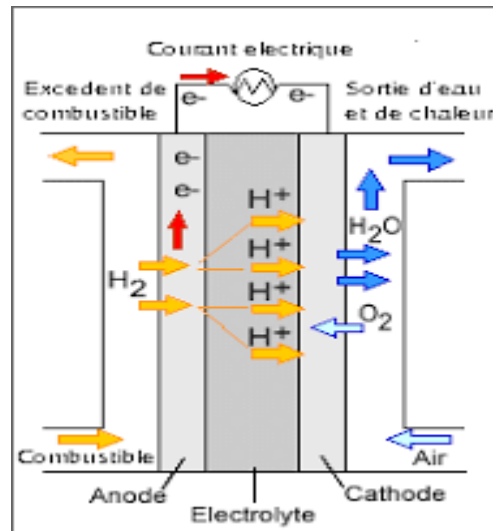


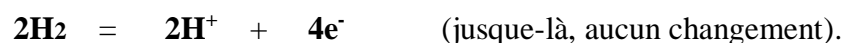
Figure 40: Pile à combustible à membrane d'échange de protons

### 2.2.1.2. Pile à oxyde solide:

Le principe est similaire. La seule différence est que la membrane échangeuse de protons est remplacée par une autre membrane appelée "membrane à oxyde solide". Les molécules dans la pile à combustible ne vont alors pas réagir de la même façon :

- Dans un premier temps, le dihydrogène entre par la plaque bipolaire à gauche, et arrive sur l'anode.

- Là, le dihydrogène se dissocie :



- Les électrons ( $\text{e}^-$ ) empruntent un circuit extérieur, mais les ions  $\text{H}^+$  (protons), au lieu de traverser la membrane, restent sur l'électrode.
- Après avoir traversé les dipôles, les électrons rejoignent la cathode chargée en dioxygène. Chaque molécule de dioxygène va fixer quatre électrons pour donner deux atomes doublement négatifs d'oxygène selon :



- Les ions  $\text{O}_2^-$  traversent la membrane et se combinent avec les protons  $\text{H}^+$  pour former de l'eau.

Mais ce type de pile n'est pas plus performant que la pile à membrane échangeuse de protons, elle ne fonctionne qu'à très haute température (autour de **600 à 800 °C**) et sa fabrication coûte plus cher pour des piles de faible puissance. Elles sont donc réservées à des applications spécifiques nécessitant une forte puissance.

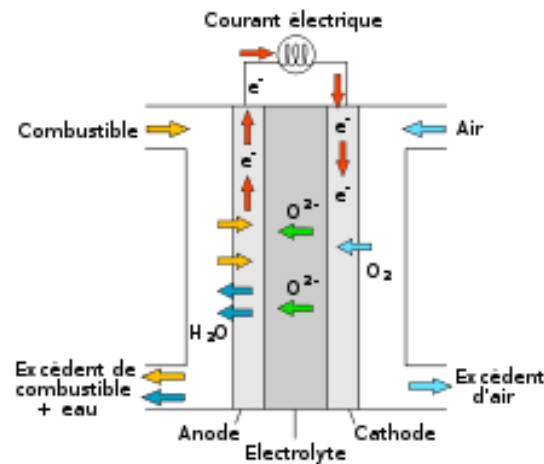


Figure 41: Pile à combustible à oxyde solide

### 3. Avantages et inconvénients de moteur à hydrogène : [9]

#### 3.1. Avantages:

- Lors de fonctionnement, les piles sont silencieuses : dans les systèmes **PAC (Pile à combustible)**, seuls certains organes comme les compresseurs, les pompes, le système de ventilation produisent un léger bruit.
- La combustion étant environ six fois plus rapide que celle de l'essence.
- Le moteur à hydrogène ne génère pas les gaz polluants (comme **CO<sub>2</sub>**), il génère juste la vapeur d'eau **H<sub>2</sub>O** et la chaleur. Les émissions d'un tel moteur à hydrogène mesurées dans un centre d'essais canadien sur un prototype de **4,9 L** de cylindrée tournant à **2200 tr/min** et développant une puissance de **80 kW** sont : [10]
  - en hydrocarbures (dus à l'huile de lubrification) : 2,6 ppm, soit 1,4g par heure de fonctionnement.
  - en oxyde de carbone : **0,0 ppm**.
  - en oxyde d'azote : **7,1 ppm** soit **5,3g/heure**.
  - en oxygène: **13,8%**.
- Le rendement du moteur à hydrogène est plus élevé(entre **40%** et **80%**).

#### 2.3. Inconvénients :

- Le coût est le plus gros problème actuellement dans la mesure où, pour les applications automobiles, le prix d'une **PAC (Pile à combustible)** est 100 fois supérieur à celui assurant la compétitivité. En effet, la pile elle-même est extrêmement chère, ceci étant dû à la fois aux



prix des catalyseurs de la fabrication des plaques bipolaires et de la membrane échangeuse de protons.

- Le poids de la pile est également une contrainte dans la mesure où il ne doit pas être trop important pour ne pas affecter les performances du véhicule.
- La pile à combustible doit être intégrée au reste du système. Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile, cela impose donc un système de refroidissement efficace.

### **Conclusion :**

On conclue que :

Les systèmes énergétiques basés sur l'hydrogène séduisent par leurs avantages, qui cadrent bien avec le souci public concernant les émissions polluants et les changements climatique. Le carburant hydrogène est efficace et il est perçu comme une énergie renouvelable et propre. On se réjouit de la vapeur d'eau inoffensive qui sort du pot d'échappement mais l'on oublie que l'hydrogène n'est pas une énergie primaire et qu'il doit donc d'abord être produit. La production de l'hydrogène pose beaucoup des problèmes:

- La voie de production via reformage du gaz naturel avec capture de **CO<sub>2</sub>** est intéressante et pourrait ouvrir le chemin. A long terme, elle ne résoudra cependant pas le problème de l'épuisement des réserves.
- La production idéale, via l'électricité renouvelable et l'électrolyse, restera encore longtemps hors de portée, tout d'abord à cause des coûts de cette forme d'énergie, mais également parce que celle-ci peut être encore largement absorbée par le réseau électrique.
- Reste la voie du nucléaire, qui pourrait bénéficier de l'introduction massive de taxes sur le **CO<sub>2</sub>**. Cette voie comporte cependant les importants problèmes de déchets que l'on connaît.

Le moteur à hydrogène est un moteur à combustion interne qui contient plusieurs avantages tel que :

- Le rendement du moteur à hydrogène est plus élevé(entre **40%** et **80%**).
- Le moteur à hydrogène ne génère pas les gaz polluants (comme **CO<sub>2</sub>**), juste **H<sub>2</sub>O** et **NO<sub>x</sub>**.
- La combustion étant environ six fois plus rapide que celle de l'essence.

Cependant, le développement des énergies propres est très urgent dans la mesure où la situation de notre planète est critique.

Enfin, face aux pénuries de pétrole énergie fossile en quantité limité, le moteur à hydrogène sera probablement la solution.

**REFERENCE:**

- [1] Lide DR (ed.). CRC handbook of chemistry and physics. Boca Raton, FL: CRC Press; 2005.
- [2] Züttel A, Materials for hydrogen storage, *Materials Today*; 2003.
- [3] Dunn S, History of hydrogen. *Encyclopaedia of Energy* 2004;3:241–252.
- [4] <https://fr.m.wikipedia/wiki/Production-d%27hydrogène>.
- [5] G. Bourbonneux, Production d'hydrogène, Le Raffinage du Pétrole, T3Procédés de transformation, (1998) 463-515.
- [6] Durbin DJ, Malardier-Jugroot C, Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 2013;38:15595– 14617.
- [7] C. Johnson, Association Français de l'hydrogène, [www.afh2.org](http://www.afh2.org).Fiches4.1-4.4(2003).
- [8] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_à\\_hydrogène](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_à_hydrogène).
- [9] [www.airproducts.fr](http://www.airproducts.fr)
- [10] PDF : Moteurs thermiques à hydrogène Fiche 5.1.1 Sept 2014
- [11] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile\\_à\\_combustible](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_à_combustible)

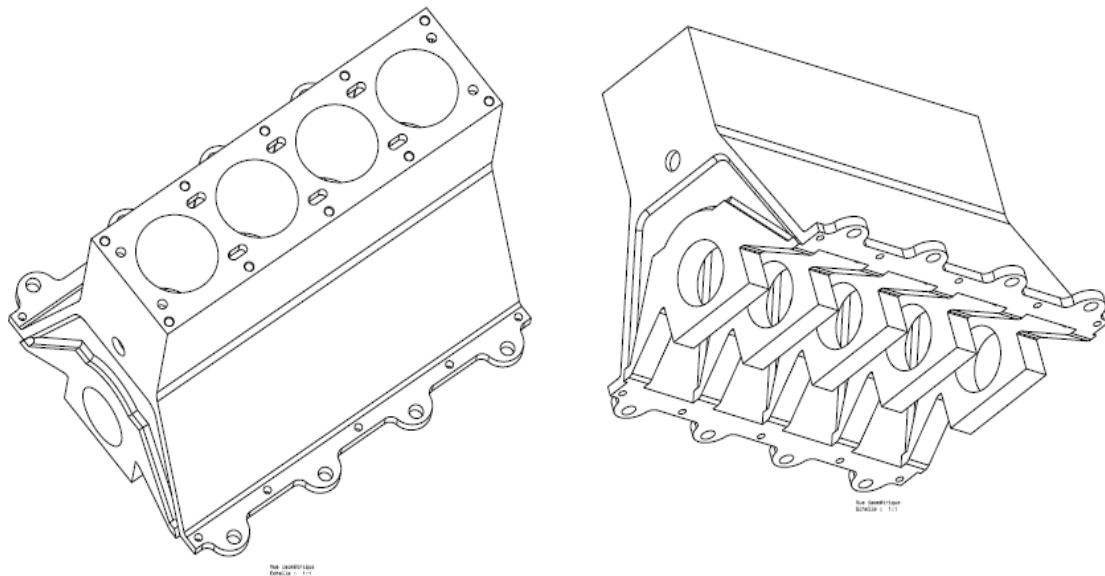
# **CHAPITRE III**

**Modélisation et simulation  
d'un bloc moteur**

**Introduction :**

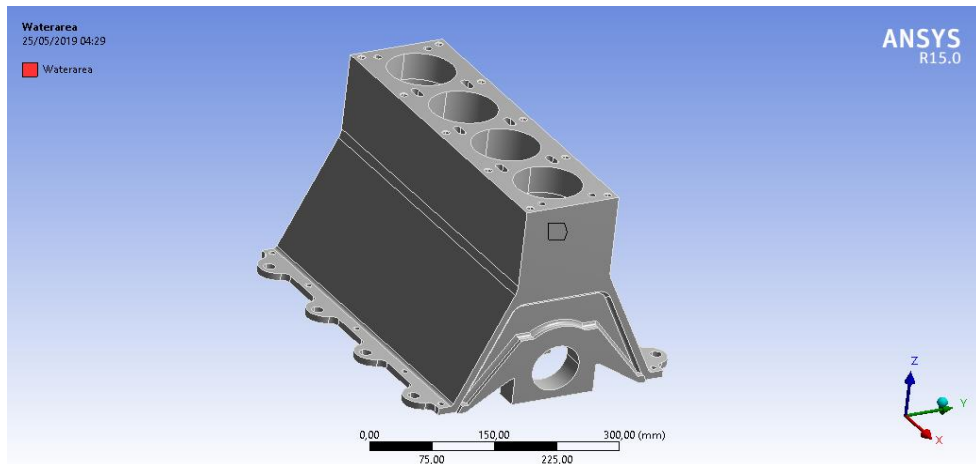
Ce chapitre présente la partie de modélisation et simulation de notre mémoire c'est la partie la plus importante de notre travail.

Donc, on commence par le dimensionnement et la conception du Bloc moteur à l'aide du logiciel CATIA, en suite nous allons entamer la partie de simulation numérique par (Workbench ANSYS 15.0), où on va faire le maillage fin avec l'application des conditions aux limites thermiques et mécaniques sur notre Bloc moteur.

**1. La conception du Bloc moteur :**

**Figure 42:** La conception du bloc moteur à 4 temps

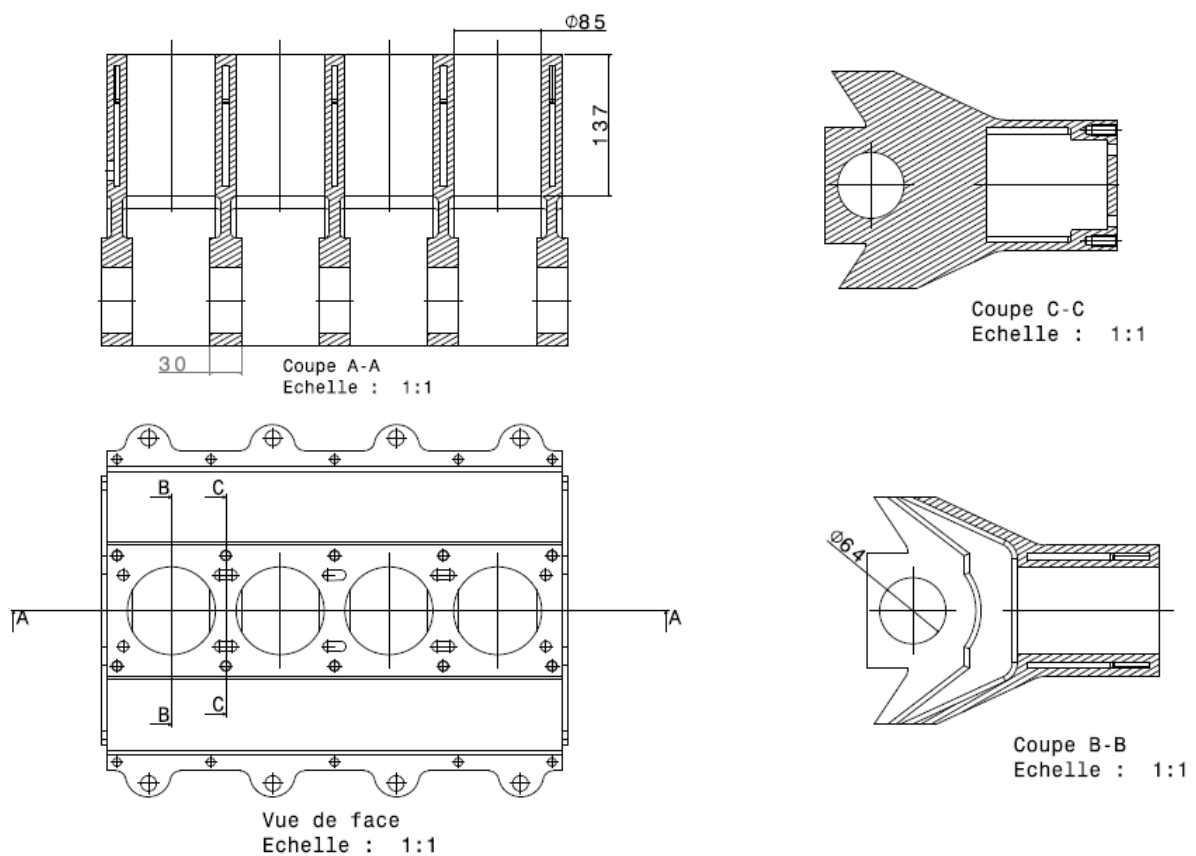
**2. Simulation du Bloc moteur en ANSYS 15.0 (workbench) :**



**Figure 43:** Simulation du Bloc moteur en ANSYS 15.0 (workbench)

**3. Dimensionnement et géométrie du Bloc moteur 2 litres :**

Dans cette étude, le modèle crée par **CATIA V5** représente un Bloc moteur simplifié avec des dimensions suivantes :



**Figure 44:** Les dimensions du Bloc moteur (en mm)

**4. Propriétés des matériaux :**

**4.1. Matériaux suggérer pour la simulation :**

Dans notre simulation on va utiliser 3 types de matériaux :

- **Acier standard**
- **Fonte grise**
- **Alliage d'aluminium 2024 (AlCuMg2)**

Caractéristiques Thermomécaniques	Température (°C)	Matériaux		
		Acier standard	Fonte grise	Alliage d'Aluminium Aluminium 2024 AlCuMg2
Module de Young (GPa)	20	200	110	71
	2000	128	56	11
Coefficient de Poisson	20	0,3	0,28	0,33
	2000	0,3	0,28	0,33
Masse volumique ρ (kg/m³)	20	7800	7200	2770
	2000	6500	7073 à 1200°C	1900
Coefficient de dilatation α (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	20	12	11	23
	2000	24,8	27	33 à 600°C
Conductivité thermique λ (W/mK)	20	60,5	52	147
	2000	30	32	175 à 200°C
Température de fusion Tr (°C)		1483	1200	500 à 638
Limite d'élasticité Re (MPa)		250	155	280

**Tableau 9 :** Les propriétés des matériaux suggérer pour la simulation [1]

**NB.** Nous avons pris en compte dans nos calculs la variation des différentes propriétés thermiques et mécaniques des matériaux en fonction de la température. Nous avons également pris dans nos calculs une loi élastique pour les trois matériaux testés :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{\text{élastique}}$$

**Avec :**

**σ :** La contrainte mécanique (MPa).

**E :** Le module de Young (MPa)

**ε :** La déformation mécanique.

**4.2. Les propriétés physiques pour l'étude de ce Bloc moteur :**

	<b>Acier standard</b>	<b>Fonte grise</b>	<b>Alliage d'aluminium</b>
<b>Longueur suivant X</b>	<b>450 mm</b>		
<b>Longueur suivant Y</b>	<b>360,44 mm</b>		
<b>Longueur suivant Z</b>	<b>282 mm</b>		
<b>Masse</b>	<b>51,309 kg</b>	<b>47,069 kg</b>	<b>18,103 kg</b>
<b>Volume</b>	<b>6,5373e+006 mm<sup>3</sup></b>		
<b>Coordonné X du centre de gravité</b>	<b>7,1527e-002 mm</b>		
<b>Coordonné Y du centre de gravité</b>	<b>-4,2744e-005 mm</b>		
<b>Coordonné Z du centre de gravité</b>	<b>-157,72 mm</b>		

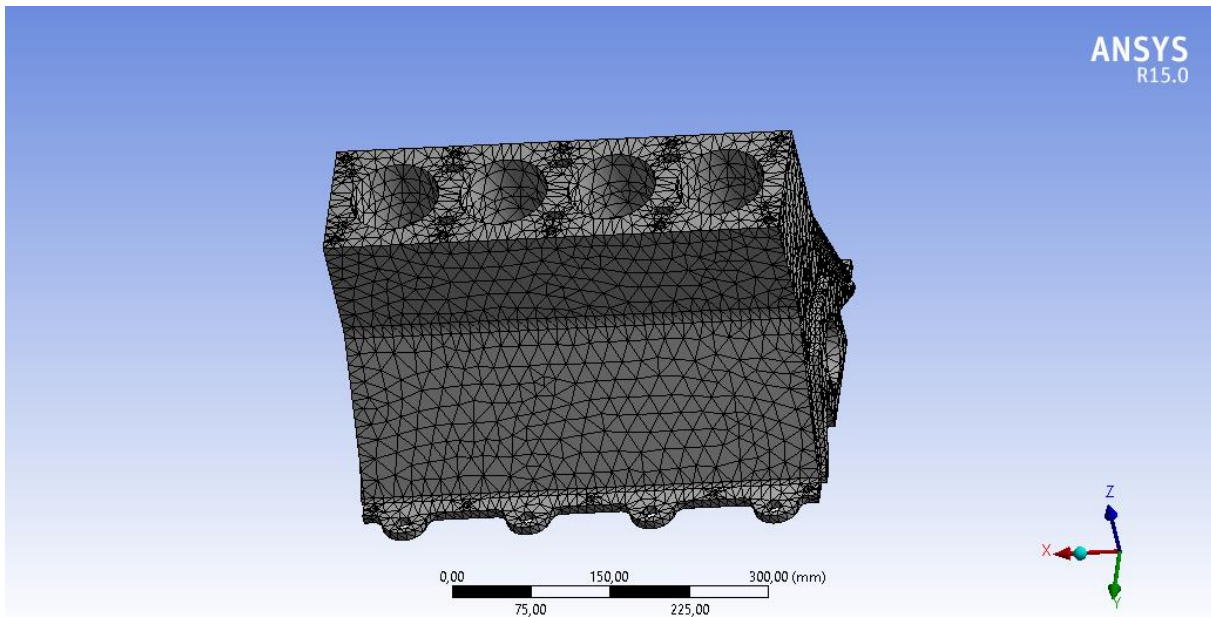
**Tableau 10 :** Les propriétés physiques pour l'étude de ce Bloc moteur**5. Maillage :**

La création de la géométrie ainsi que le maillage se font sous le logiciel "ANSYS". Ce dernier propose des solutions étendues pour les géométries les plus compliquées.

La qualité du maillage joue un rôle significatif dans la précision et la stabilité du calcul numérique. Ainsi, les attributs tels que la distribution des nœuds, la nature lisse et l'obliquité des éléments sont très importants.

Pour cette étude, l'élément tétra-hydrrique quadratique était convenable avec une qualité de maillage "Fin".





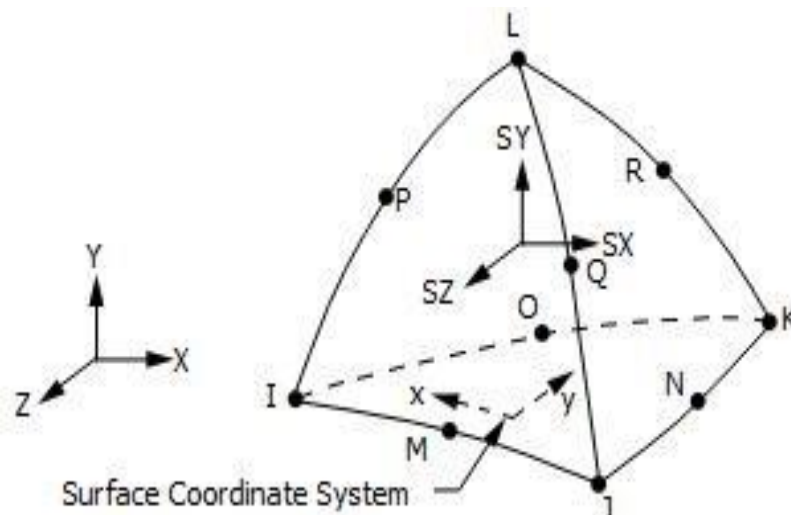
**Figure 45:** Maillage fin tétra-hydrique quadratique du Bloc moteur

Où:

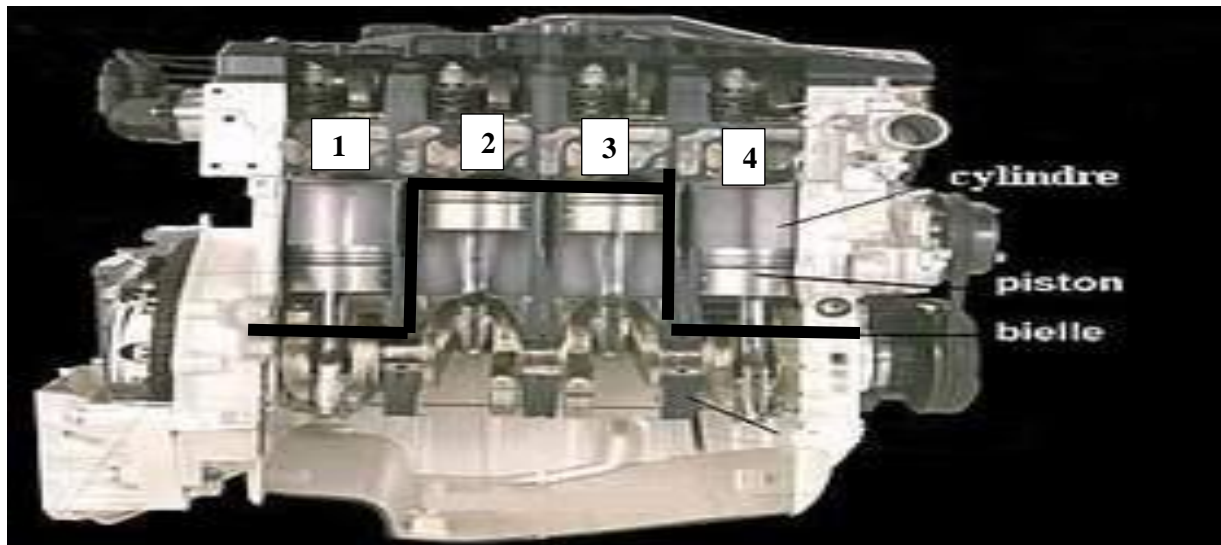
- Longueur d'arête minimale : 1,14 mm
- Nombres de Nœuds : 98731
- Nombres d'éléments : 54680

**5.1. Les éléments utilisés dans ce maillage :**

Dans ce maillage, nous avons utilisé l'élément tétra-hydrique quadratique à dix (10) nœuds, chaque nœud possède 6 degré de liberté (trois translations et trois rotations).



**Figure 46:** Élément volumique tétra-hydrique quadratique

**6. Moteur à 4 temps 1342 :**

**Figure 47:** Un moteur à 4 temps fonctionne selon le principe **1342**

Un moteur à 4 temps fonctionne selon le principe **1342** signifie que :

La **1<sup>ère</sup>** réaction se passe dans le premier cylindre.

Après, la **2<sup>ème</sup>** réaction se passe dans le troisième cylindre.

Ensuite, la **3<sup>ème</sup>** réaction se passe dans le quatrième cylindre.

Enfin, la **4<sup>ème</sup>** réaction se passe dans le deuxième cylindre.

**NB.** Les réactions (admission, compression, combustion et détente, échappement) se passent en ordre.

On a choisi un moteur à quatre temps qui fonctionne avec le principe **1342** à cause de son avantage :

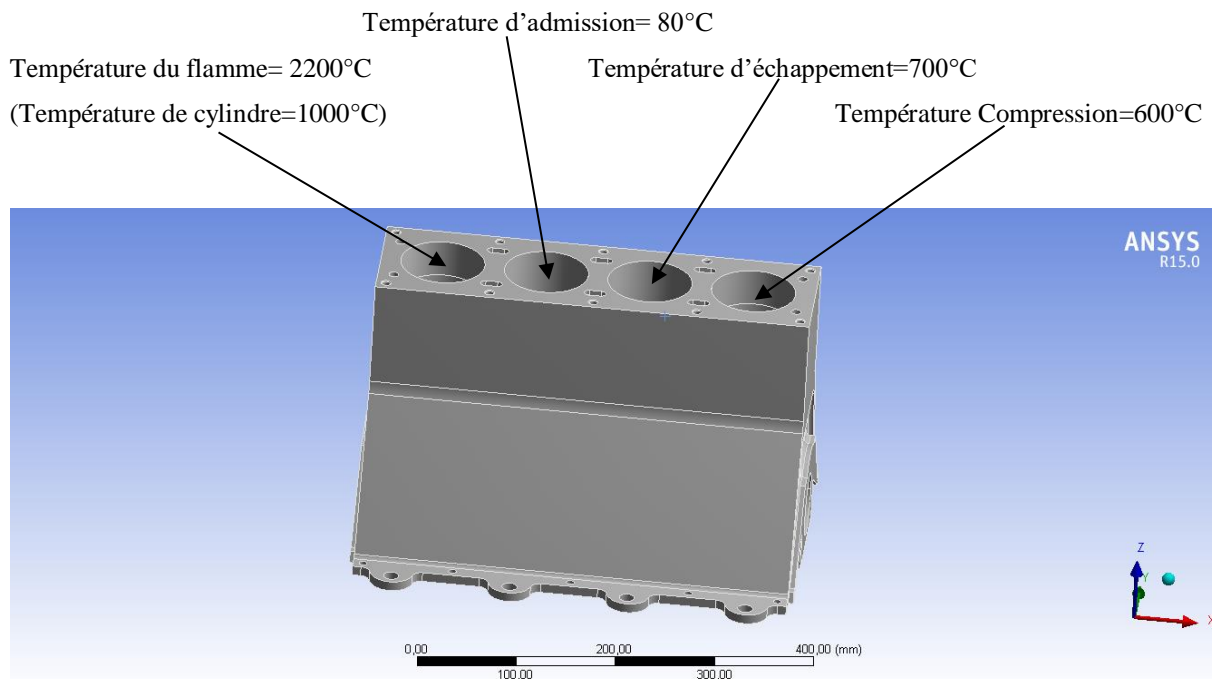
- Il permet d'augmenter la pression de compression.
- Il admet beaucoup d'air (admission maximale).

**7. Procédure de calcul thermomécanique :**

On a fait un calcul thermique stationnaire au début pour déterminer la distribution de température dans tout le bloc moteur, puis on a fait par la suite un calcul statique structural dans lequel on a importé les résultats de la température (calculés précédemment sur le model thermique) pour pouvoir faire un calcul thermomécanique.

**7.1. Les conditions aux limites thermiques :**

- La température initiale est de 22°C

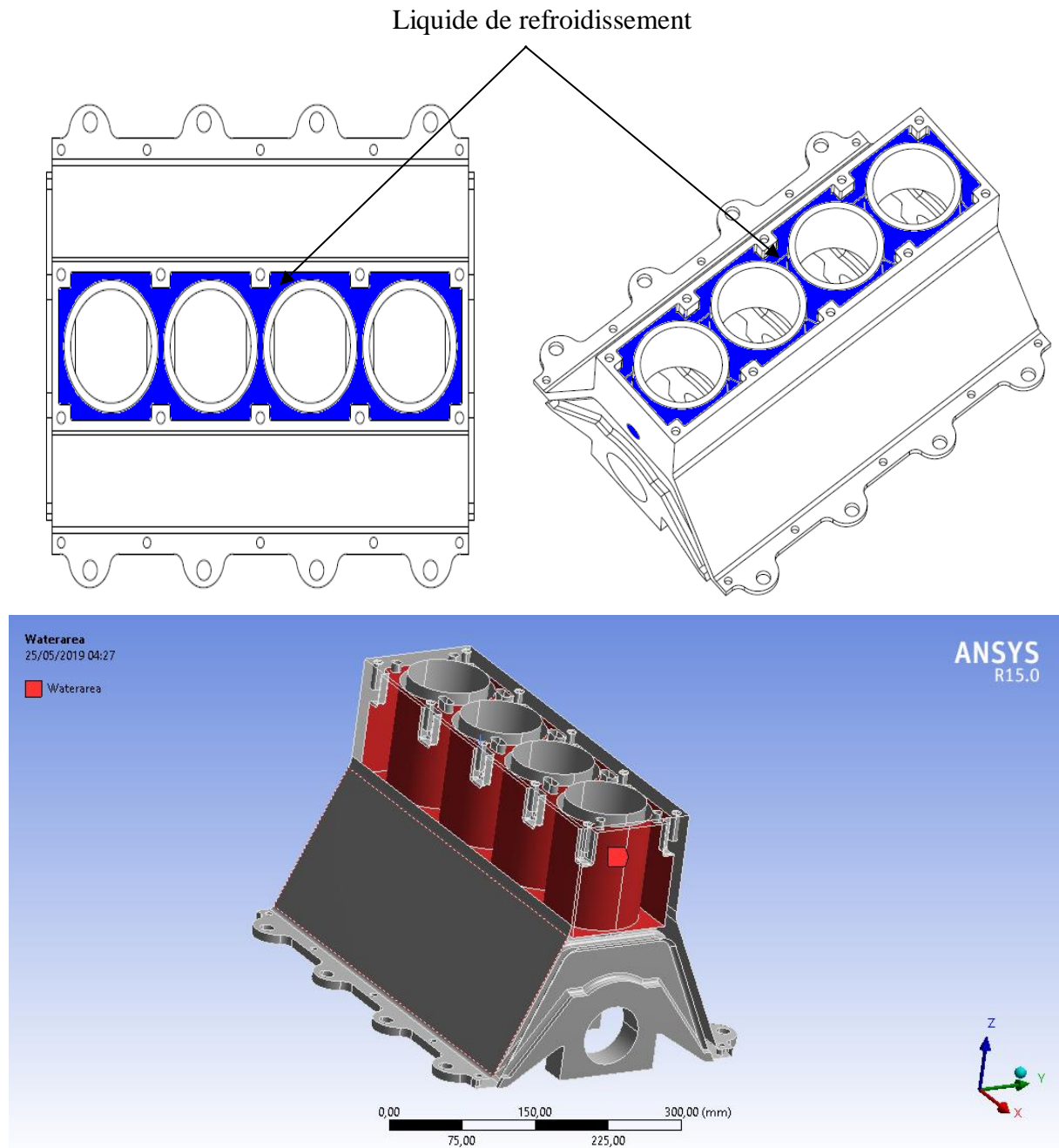


*Figure 48:* Les températures appliquées sur notre Bloc moteur

**7.1.1. La zone de refroidissement par le liquide de refroidissement :**

Ce Bloc moteur contient une zone de circulation de liquide de refroidissement, son rôle est de refroidir le bloc moteur.

La température de liquide de refroidissement est de 80°C.



**Figure 49:** Représentation des surfaces exposées à la température de liquide de refroidissement

**NB.** La pression de liquide de refroidissement a été négligée.

CARBURANT	DIESEL OU (GAS-OIL, GASOILE) GAZOLE	ESSENCE OU GASOLINE ISO-OCTANE	HYDROGENE
<b>Température des 4 temps</b>			
TEMPERATURE D'ADMISSION (°C)	80-120	80-120	80-120
TEMPERATURE DE COMPRESSION (°C)	500-700	300-380	500-700
TEMPERATURE D'EXPLOSION (ESSENCE POUR ESSENCE) OU (COMBUSTION POUR DIESEL) (°C)	1500-1900	2000	2200
TEMPERATURE D'ÉCHAPPEMENT (°C)	500-800	600-800	700-1000

**Tableau 11 :** Comparaison des conditions thermiques des trois moteurs à CI [2-7]

**NB.** On applique dans notre cas les conditions thermiques pour le moteur Hydrogène.

**Equation de la chaleur :**

Dans le cas stationnaire l'équation de la chaleur s'écrit comme suit :

$$\Phi = \lambda * \Delta T$$

Dans le cas transitoire l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + q$$

**Avec :**

$\Phi$  : flux de chaleur (W/m).

$C_p$  : est la capacité thermique massique à pression constante (J/kg.K).

$\rho$  : est la masse volumique du matériau considéré (kg/m<sup>3</sup>).

$\lambda$  : est la conductivité thermique du matériau (W/mK).

$q$  : est le rapport de chaleur interne W/m<sup>3</sup>.

**La dilatation thermique :**

La dilatation thermique est utilisée pour calculer la déformation thermique pour une éprouvette d'une longueur L selon la formule suivante :

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

Implique que :  $(\Delta L_{\text{ther}} / L) = \varepsilon_{\text{thermique}} = \alpha \cdot \Delta T = \alpha \cdot (T_f - T_i)$

**Avec :**

$\Delta L$  (mm): Dilatation due à une variation de température.

$\alpha$  (1/K): Coefficient de dilatation thermique.

L (mm) : Longueur caractéristique.

$\Delta T$  (K ou °C): Différence de température entre la température initiale et la température du matériau finale.

**La déformation totale est donnée par :**

$\varepsilon_{\text{totale}} = \varepsilon_{\text{élastique}} + \varepsilon_{\text{thermique}}$

$\Delta L_{\text{total}} = \Delta L_{\text{méc}} + \Delta L_{\text{ther}}$

**Formulation élément finis de l'équation de la chaleur :**

$[K_{\text{ther}}] \{T\} = \{Q\}$

$[K_{\text{ther}}]$  : La matrice de rigidité elle dépend de la géométrie et les propriétés thermiques du matériau.

$\{T\}$  : Le vecteur de la température.

$\{Q\}$  : Le vecteur du flux de chaleur.

7.2. Les conditions aux limites mécaniques :

a) Gravité terrestre :

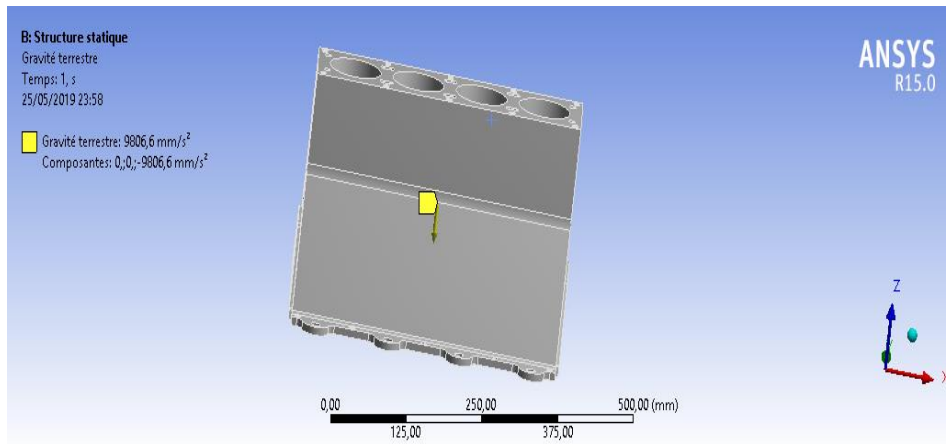


Figure 50: La gravité appliquée sur le Bloc moteur

b) Support fixe :

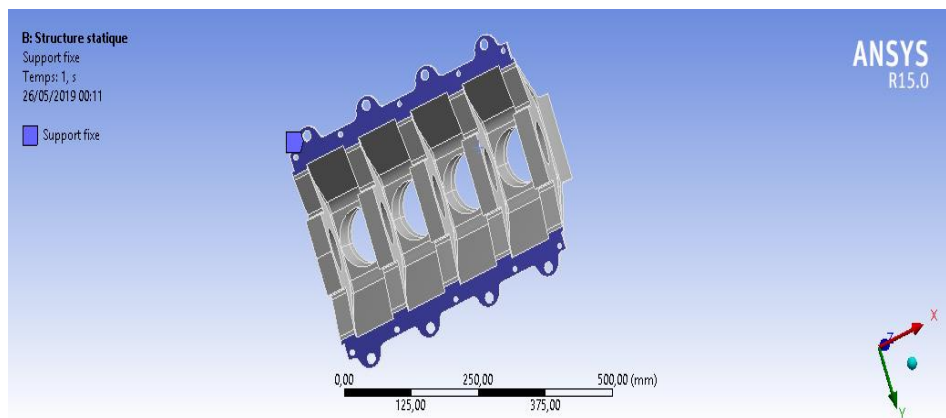


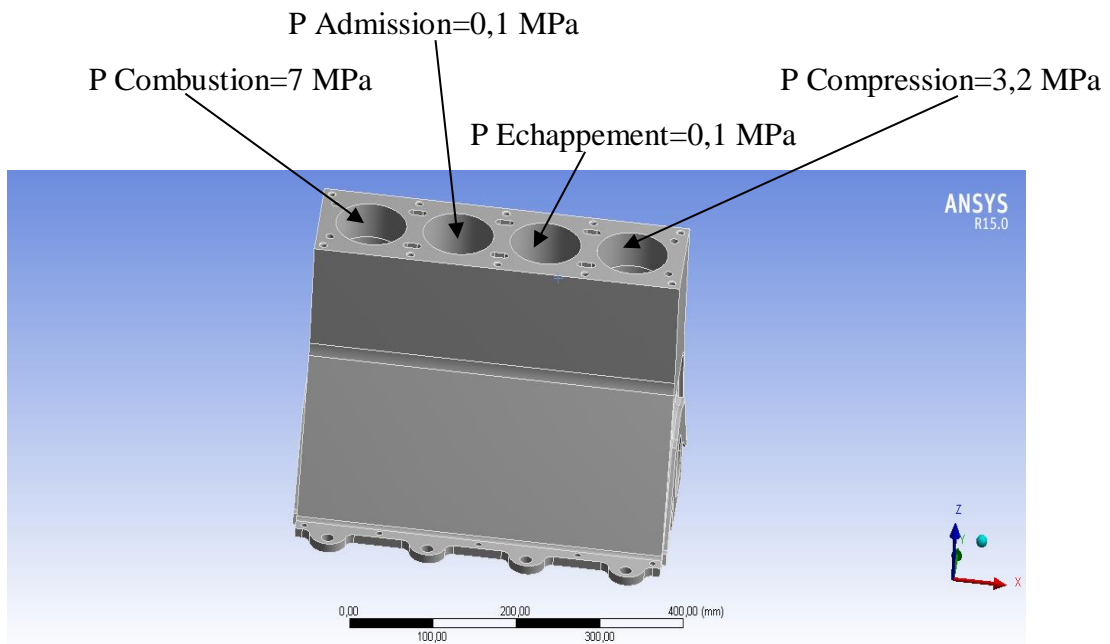
Figure 51: Support fixe

CARBURANT	DIESEL OU (GAS-OIL, GASOILE) GAZOLE	ESSENCE OU GASOLINE ISO-OCTANE	HYDROGENE
<b>Pression des 4 temps</b>			
PRESSION D'ADMISSION (MPA) 1 bar	0,1	0,1	0,1
PRESSION DE COMPRESSION (MPA)	3,5-4,5	0,8-1,2	2,4-3,2
PRESSION D'EXPLOSION (ESSENCE POUR ESSENCE) OU (COMBUSTION POUR DIESEL) (MPA)	5 à 15	3,5	7
PRESSION D'ÉCHAPPEMENT (MPA)	0,1	0,4	0,1

Tableau 12 : Comparaison des conditions mécaniques des trois moteurs à CI [2-7]

NB. On applique dans notre cas les conditions mécaniques pour le moteur Hydrogène.

c) La pression appliquée dans chaque cylindre :



*Figure 52:* La pression appliquée dans chaque cylindre

d) La pression appliquée sur les 5 paliers :

**Calcul de la pression appliquée sur les 5 paliers :**

**Avec :**

Diamètre cylindre  $D_c = 85 \text{ mm}$

Pression d'explosion =  $7 \text{ MPa}$

Diamètre palier  $D = 64 \text{ mm}$

Epaisseur palier  $e = 30 \text{ mm}$

$P_{\text{explosion}} = (F_{\text{explosion}} / S_{\text{cylindre}})$

$F_{\text{explosion}} = P_{\text{explosion}} * S_{\text{cylindre}}$

$S_{\text{cylindre}} = \Pi * R^2 = \Pi * (D_c/4)^2$

$S_{\text{cylindre}} = \Pi * (85/2)^2$

**$S_{\text{cylindre}} = 5671,625 \text{ mm}^2$**

$F_{\text{explosion}} = 7 * 5671,625$

**$F_{\text{explosion}} = 39701,375 \text{ N}$**

$F_{\text{palier}} = (4 * F_{\text{explosion}}) / 5$

**$F_{\text{palier}} = 31761,1 \text{ N}$**

Demi Surface palier =  $\Pi * R * e$

Demi Surface palier =  $3,14 * 32 * 30$

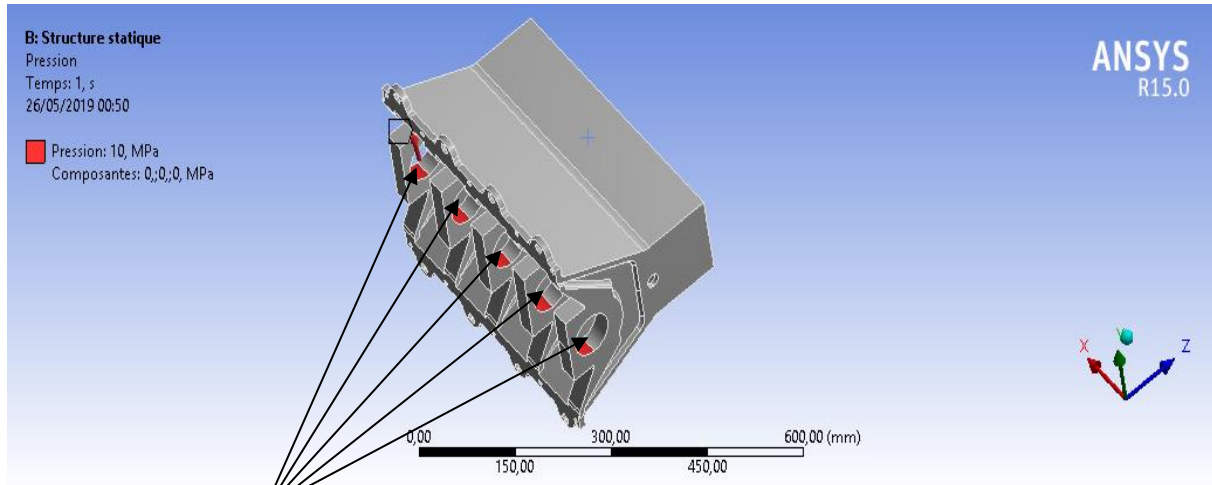
**Demi Surface palier =  $3014,4 \text{ mm}^2$**



$$P_{\text{palier}} = (F_{\text{palier}} / \text{Demi surface palier})$$

$$P_{\text{palier}} = 31761,1 / 3014,4$$

$$P_{\text{palier}} = 10,53 \text{ MPa}$$



Pression Paliers=10MPa

**Figure 53:** La pression appliquée sur les 5 paliers

**Formulation élément finis de l'équation de la chaleur :**

$$[K_{\text{méc}}] \{U\} = \{F\}$$

$[K_{\text{méc}}]$  : La matrice de rigidité elle dépend de la géométrie et les propriétés mécanique du matériau

$\{U\}$  : Le vecteur de déplacement.

$\{F\}$  : Le vecteur de la force (dédit à partir des pressions).

**REFERENCE :**

[1] Technique d'ingénieur (M3635, COR325, M438, M4675, etc)

[2] J.Chagette, Technique d'automobile, le moteur, Ed Dunod, 1977.

[3] Module 3: Hydrogen use in internal combustion engines, College of the desert, (NASA), USA, 2001.

[4] PhD Thesis, Simon Ellgas, Simulation of a Hydrogen Internal Combustion Engine with Cryogenic Mixture Formation, Germany, 2008.

[5] Report on hydrogen as an alternative fuel, <http://www.pediain.com/>

[6] K. Amol Gulabrao, Course on Hydrogen fuelled internal combustion engine, University of India.

[7] Erol Kahramana, S. Cihangir Ozcanlıb and Baris Ozerdemb, An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine, International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) pp. 2066– 2072.

# **CHAPITRE IV**

**Résultat de l'analyse**

### Introduction :

L'analyse structurelle du bloc moteur a été effectuée dans une analyse thermomécanique.

On va essayer trois types de matériaux pour voir quel est le matériau convenable pour notre bloc moteur qui peut résister contre les grandes températures et les pressions.

Au début l'analyse thermique a été réalisée pour obtenir la répartition de la température dans le bloc moteur.

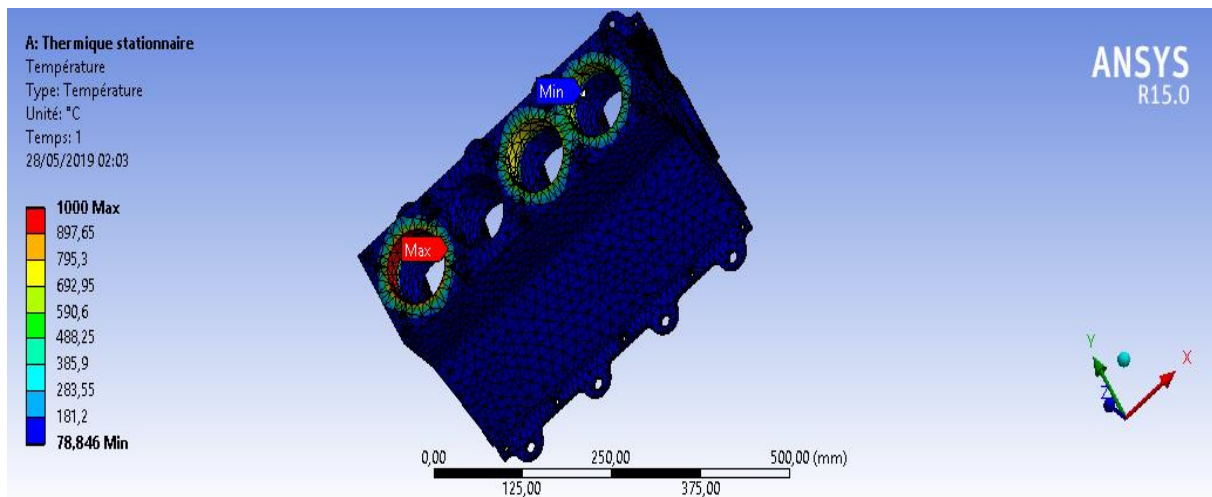
### I/Acier standard :

On va utiliser deux cas pour l'acier standard :

- Cas normal : Le liquide de refroidissement est présent dans le bloc moteur avec une température de 80°C.
- Cas accidentel : Il y'a pas du liquide de refroidissement dans le bloc moteur.

### A. Cas normal :

#### A.1. Température:



*Figure 54:* Distribution de la température dans le bloc moteur

On remarque que :

La température maximale= **1000°C** (se trouve dans la zone de combustion).

La température minimale= **78,84°C**.

Le liquide de refroidissement est efficace pour notre bloc moteur, parce qu'il empêche les températures (combustion, compression, échappement) de se propager dans tout le corps du bloc moteur.

A.2. Flux de chaleur total :

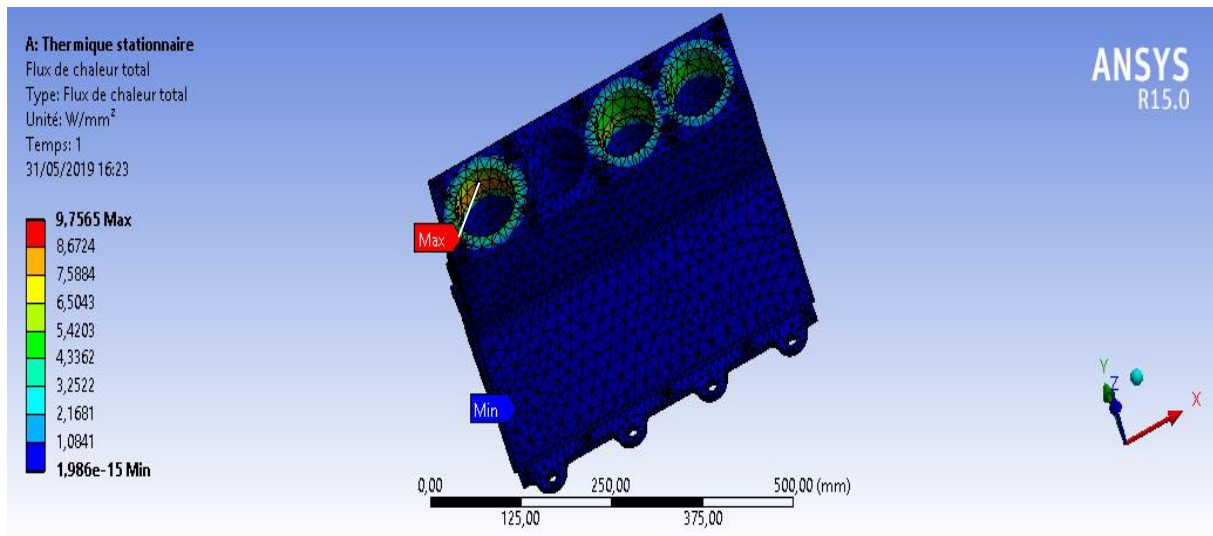


Figure 55: Flux de chaleur total

A.3. Déformation thermique :

- Valeur maximale : 0,018554 mm/mm=1,8%

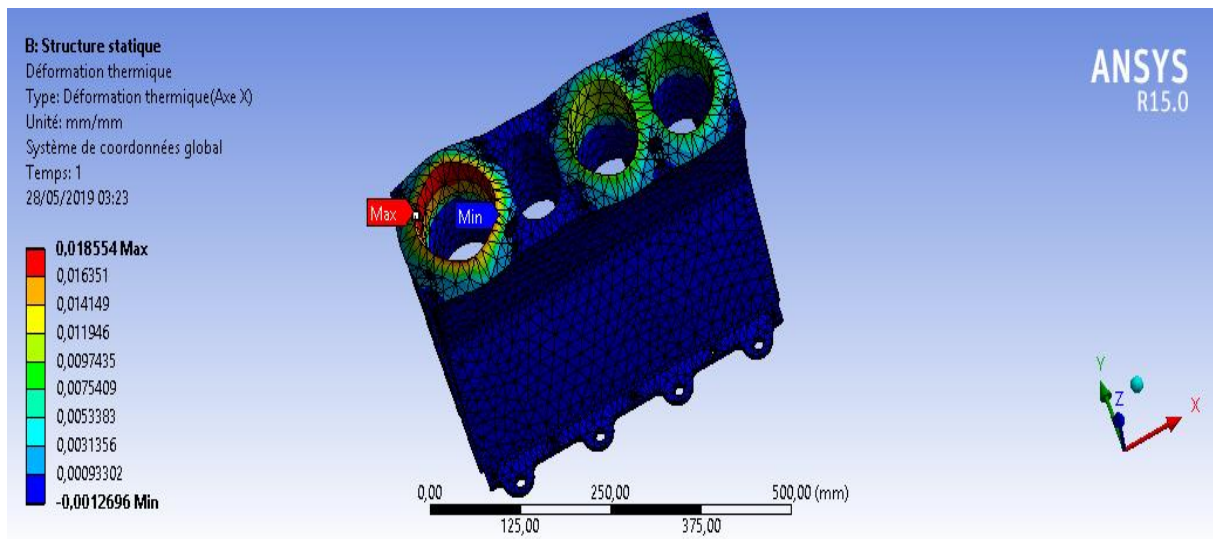


Figure 56: La déformation thermique

#### A.4. Déformation totale équivalente :

Les résultats de l'analyse présentée montrent que les contraintes et les déformations maximales sont produites au niveau de la zone de combustion (température de combustion est égale 1000°C).

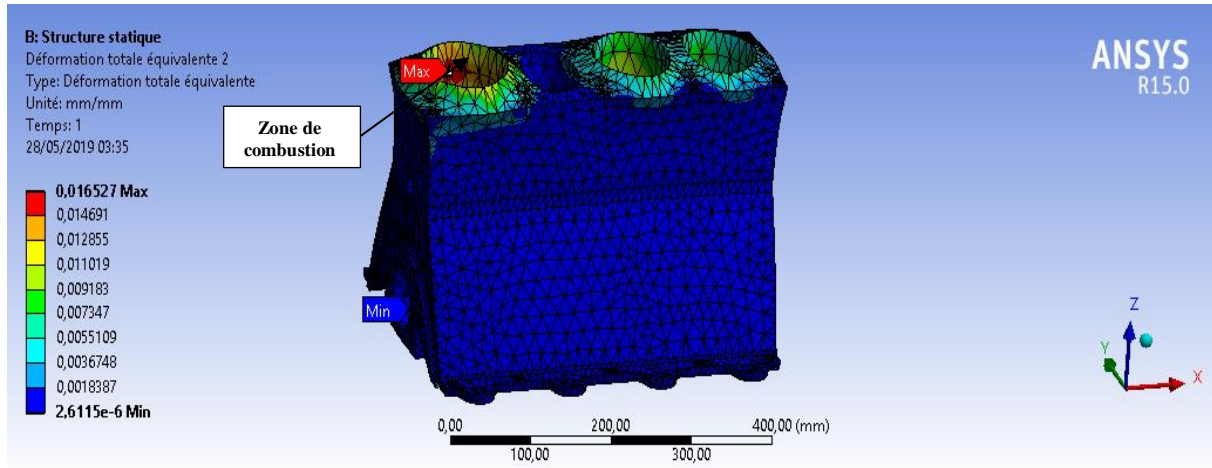


Figure 57: La déformation totale équivalente

#### A.5. Contrainte équivalente (Von-Mises) :

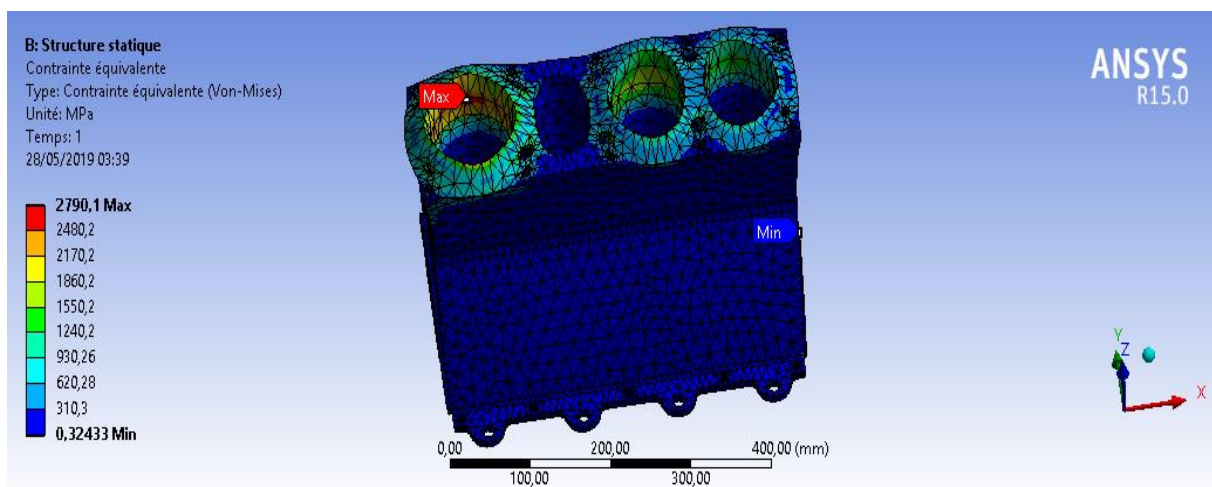


Figure 58: La contrainte équivalente (Von-Mises)

La contrainte maximale se situe au niveau de la zone de combustion (là où la température est la plus élevée), la valeur maximale obtenue est très élevée (**2790,1 MPa**). Ceci nous oblige soit d'utiliser un matériau avec une limite d'élasticité supérieur à 2790,1 MPa (ce qui est rare de trouver un tel matériau), nous nous sommes penchés sur une autre solution alternative pour diminuer cette contrainte, celle-ci sera présentée par la suite.

A.6. Déplacement total:

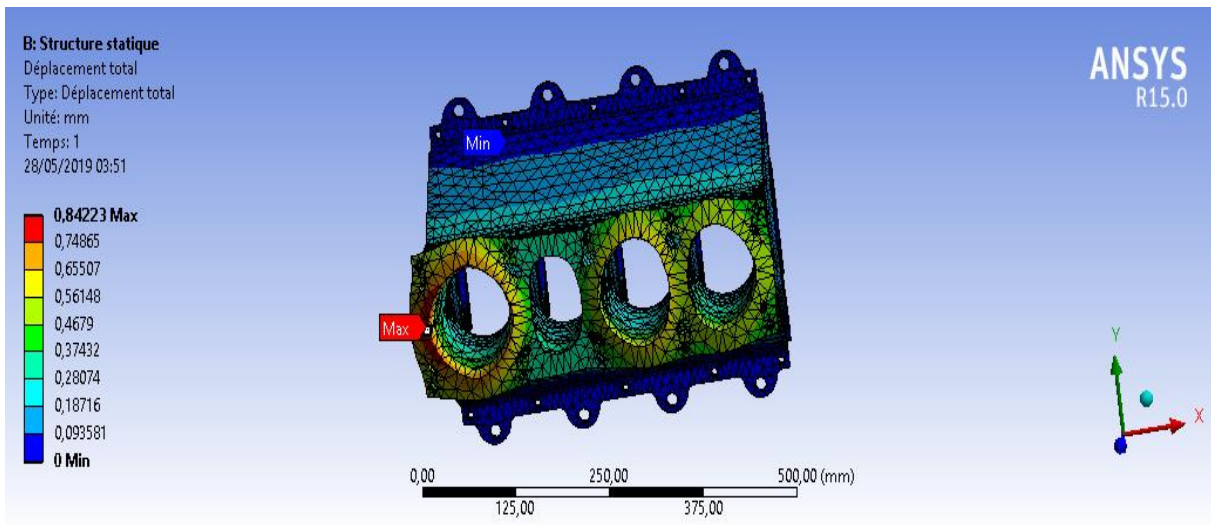


Figure 59: Déplacement total

Le déplacement maximal (**0,8mm**) se trouve dans la zone de combustion, à cause de la température maximale qui déforme la zone.

Le déplacement minimal se trouve en dessous du bloc moteur là où se situe le support fixe.

2. La trajectoire :

Pour tracer nos courbes on a besoin d'une trajectoire.

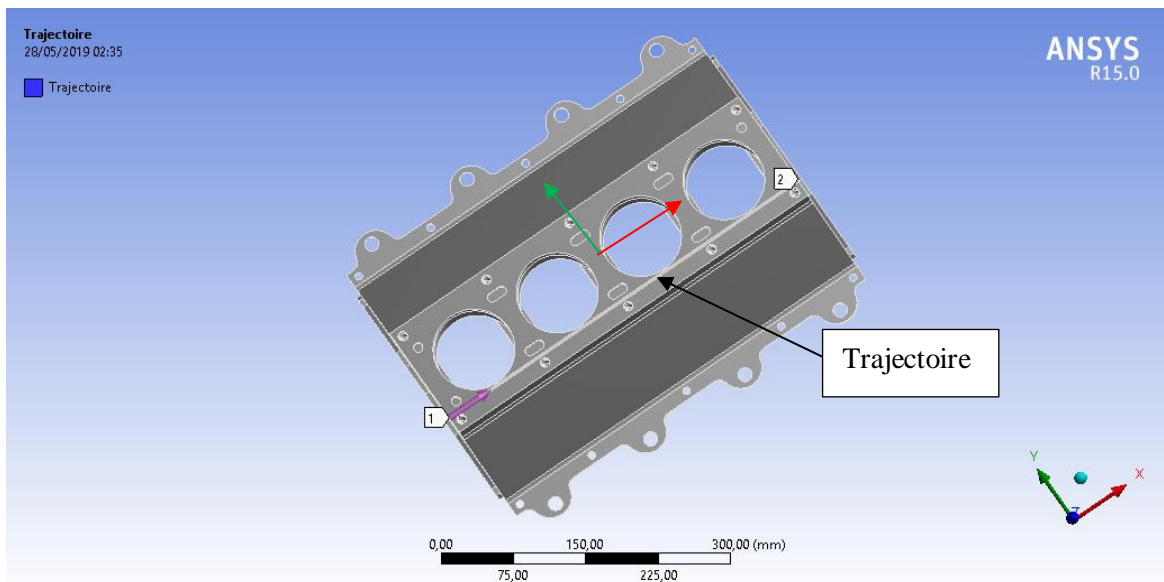


Figure60: La trajectoire

Avec:

Les coordonnées	Début (1)	Fin (2)
Coordonnée de X (mm)	-220	220
Coordonnée de Y (mm)	-45	-45
Coordonnée de Z (mm)	0	0

Tableau 13 : Les coordonnées de la trajectoire (mm)

Les figures suivantes représentent les courbes de la trajectoire :

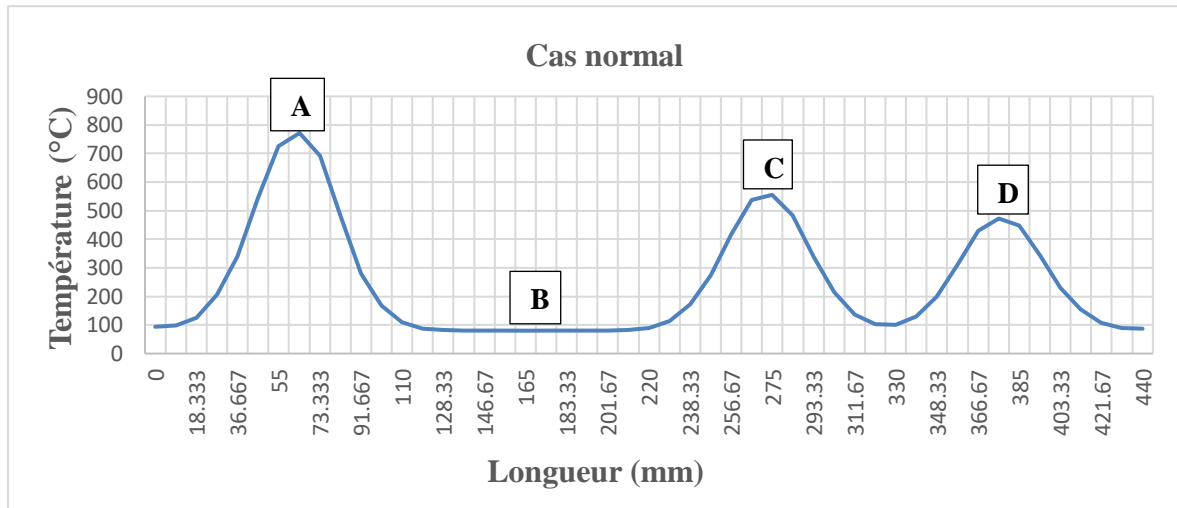


Figure 61: Température en fonction de la longueur de la trajectoire

**Point A :** Température maximale égale **771,8°C**, c'est la température de combustion.

**Point B :** Température minimale égale **80°C**, c'est la température d'admission (c'est la même température du liquide de refroidissement).

**Point C :** Température égale **550°C**, c'est la température d'échappement.

**Point D :** Température égale **450°C**, c'est la température de compression.

A cause du refroidissement du bloc moteur, on remarque que :

Température du point A < température de combustion (**1000°C**).

Température du point B = température de d'admission (**80°C**).

Température du point C < température de d'échappement (**700°C**).

Température du point D < température de compression (**600°C**).

**Donc**, le liquide de refroidissement est très efficace pour refroidir le bloc moteur.



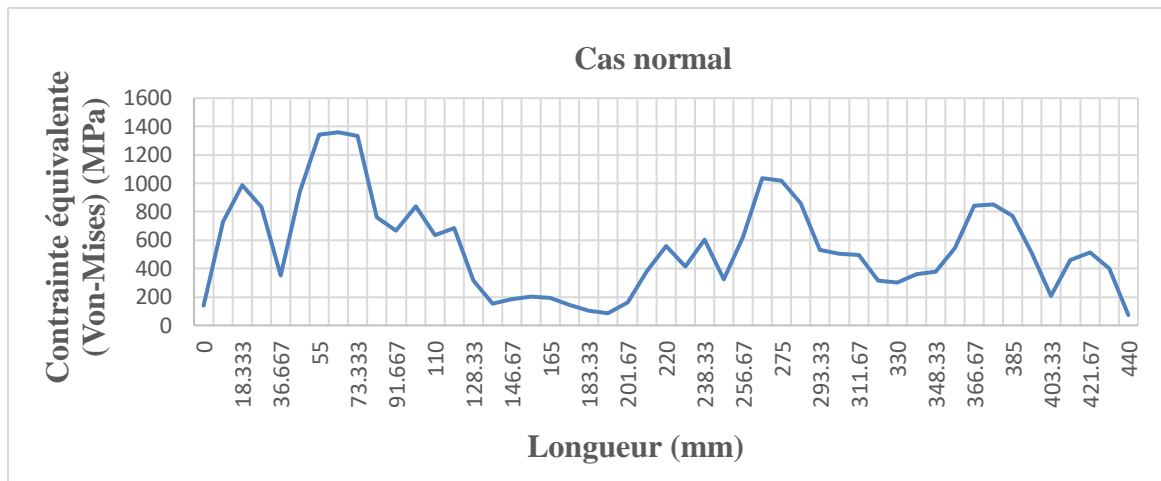


Figure 62: La contrainte équivalente (Von-Mises) en fonction de la longueur

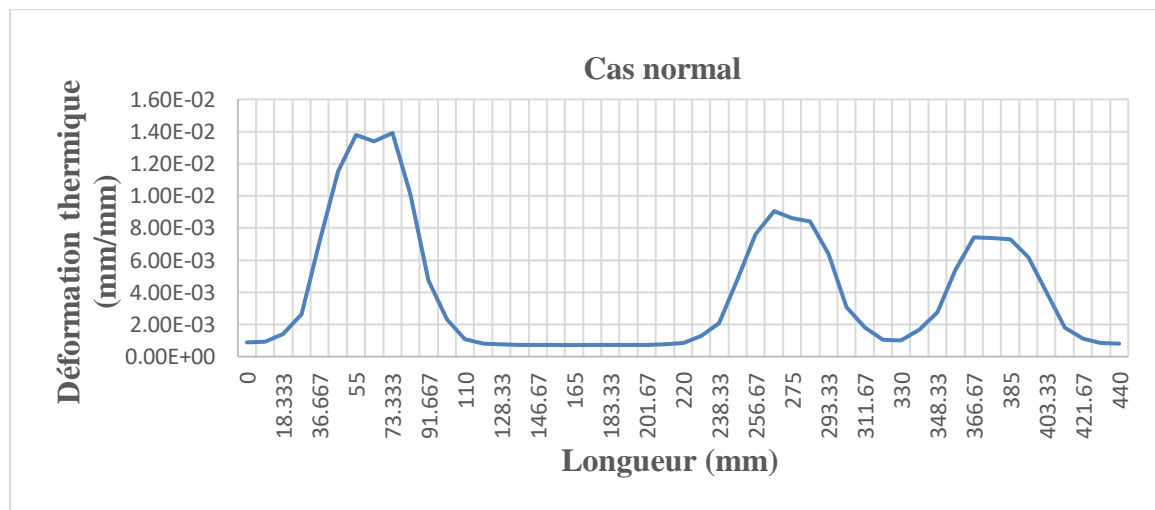


Figure 63: La déformation thermique en fonction de la longueur

La déformation thermique maximale se situe dans la zone de combustion à cause de la grande température qui déforme la zone de combustion. En plus, le coefficient de dilatation de l'acier augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température (voir Tableau 9).

La déformation thermique minimale se situe dans la zone d'admission parce que la température d'admission est faible.

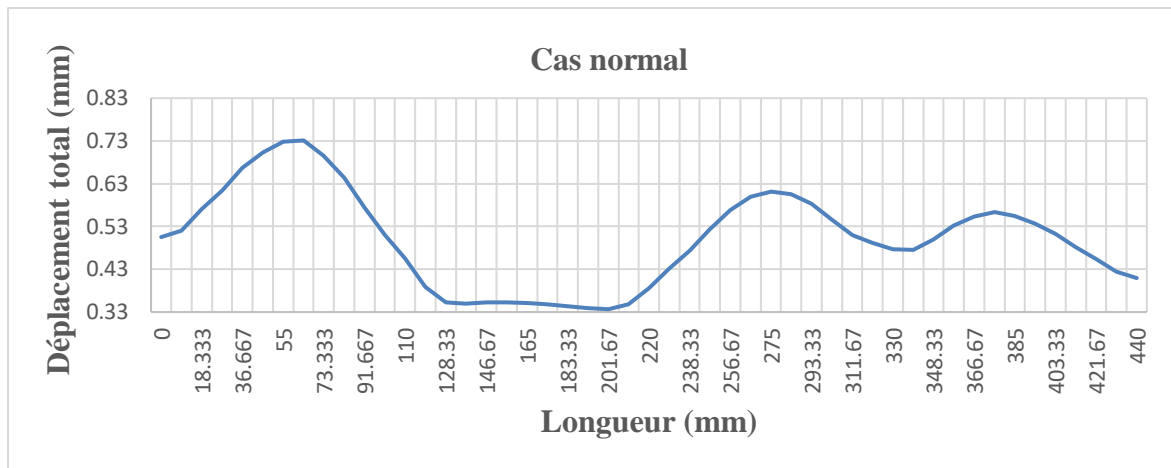


Figure 64: Le déplacement total en fonction de la longueur

**B. Cas accidentel :**

**B.1. Température:**

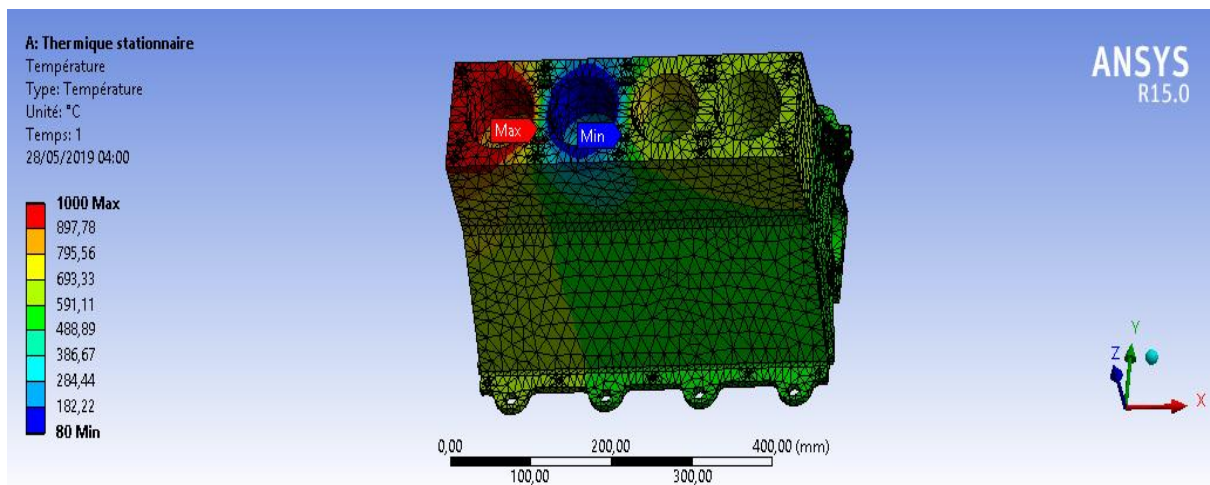


Figure 65: Distribution de la température dans le bloc moteur

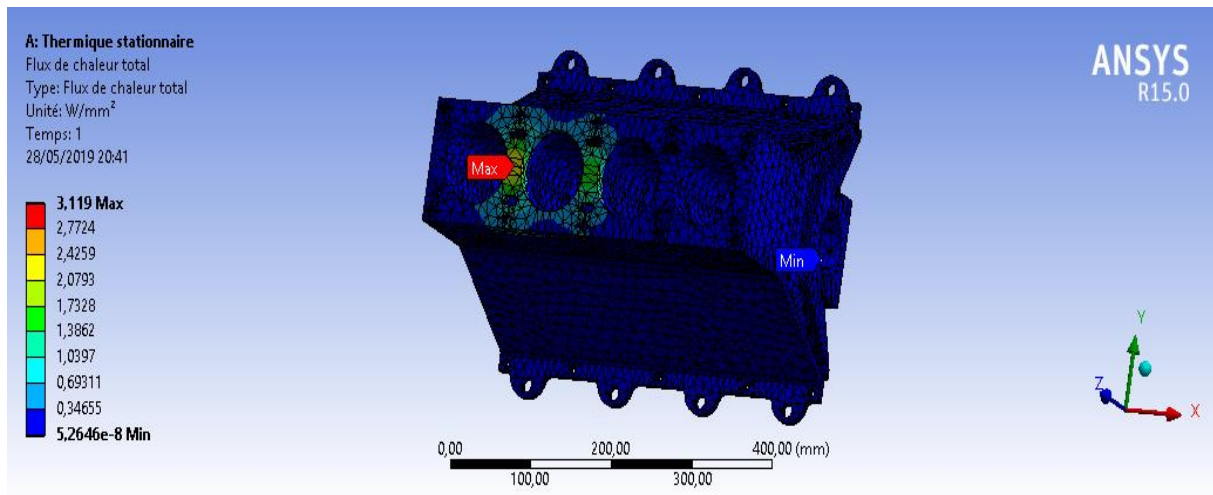
On remarque que la température maximale est égale **1000°C** qui se situe dans la zone de combustion par contre la température minimale égale **80°C**.

Les températures de combustion, échappement, compression sont propagées dans tout le corps du bloc moteur à cause de l'absence du liquide de refroidissement.

**B.2. Flux de chaleur total :**

Valeur maximale : 3,119 W/mm<sup>2</sup>

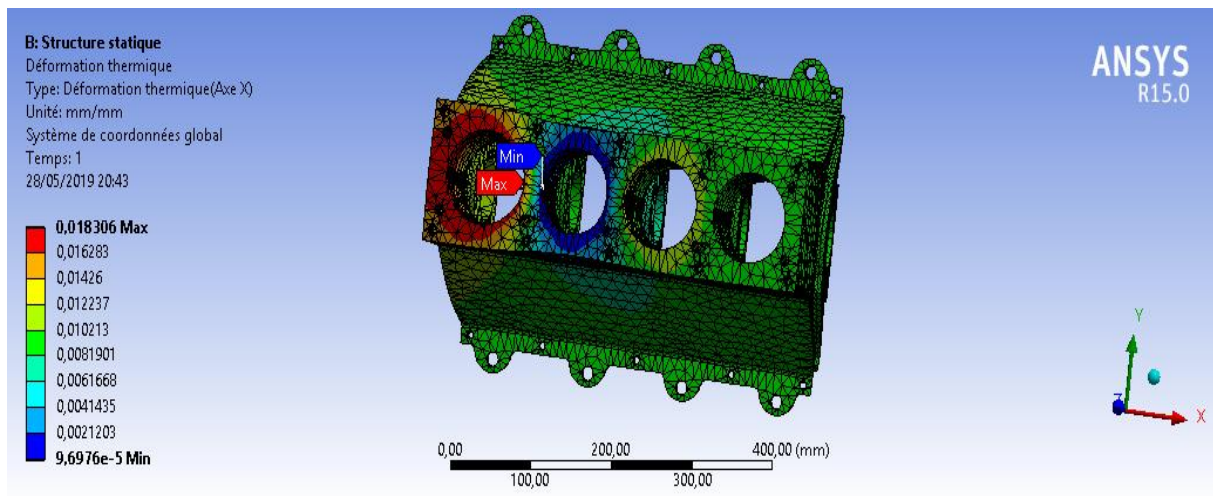
Valeur minimale : 5,2646e-8 W/mm<sup>2</sup>



*Figure 66:* Flux de chaleur total

**B.3. Déformation thermique :**

Valeur maximale = 0,0183 mm/mm= 1,8%



*Figure 67:* La déformation thermique

**B.4. Déformation totale équivalente :**

Les résultats de l'analyse présentée montrent que les contraintes et les déformations maximales se produisent au niveau de la zone de support fixe.

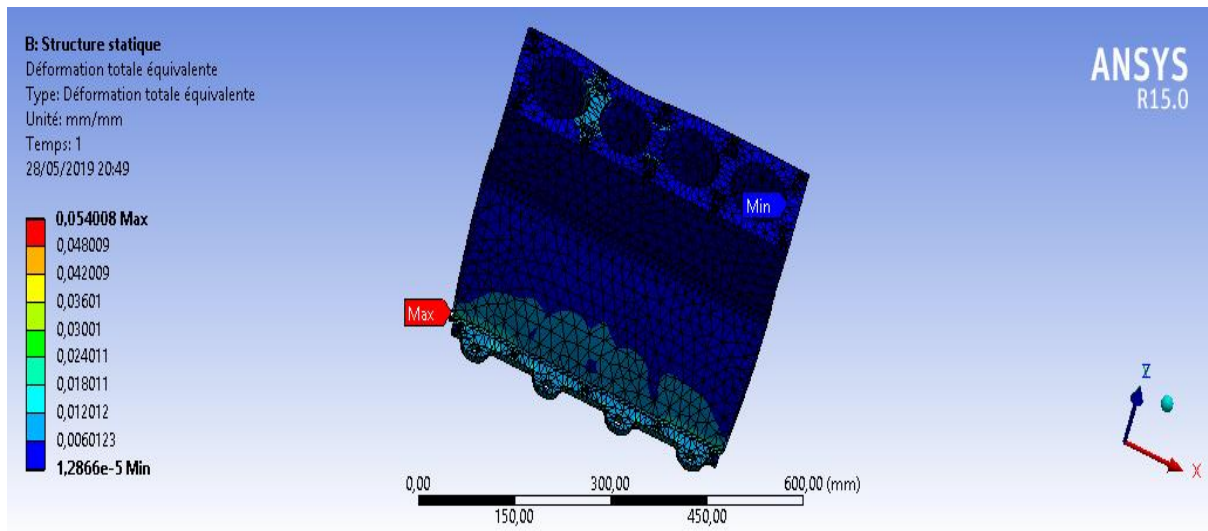


Figure 68: La déformation totale équivalente

**B.5. Contrainte équivalente (Von-Mises) :**

La contrainte maximale atteint **8576,1 MPa**, elle est trois fois plus grande que la contrainte obtenue dans le cas normal.

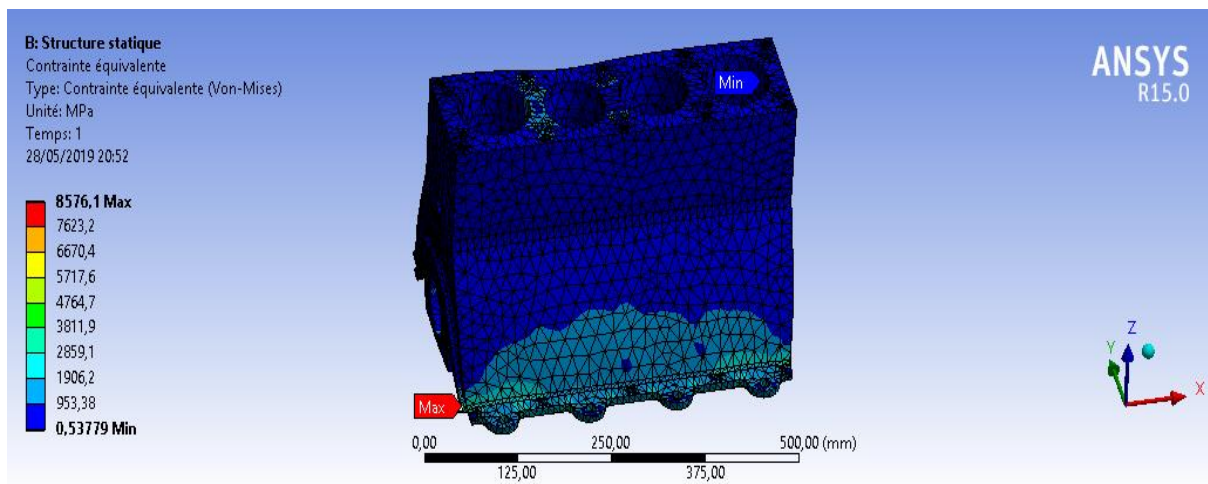


Figure 69: La contrainte équivalente (Von-Mises)

B.6. Déplacement total:

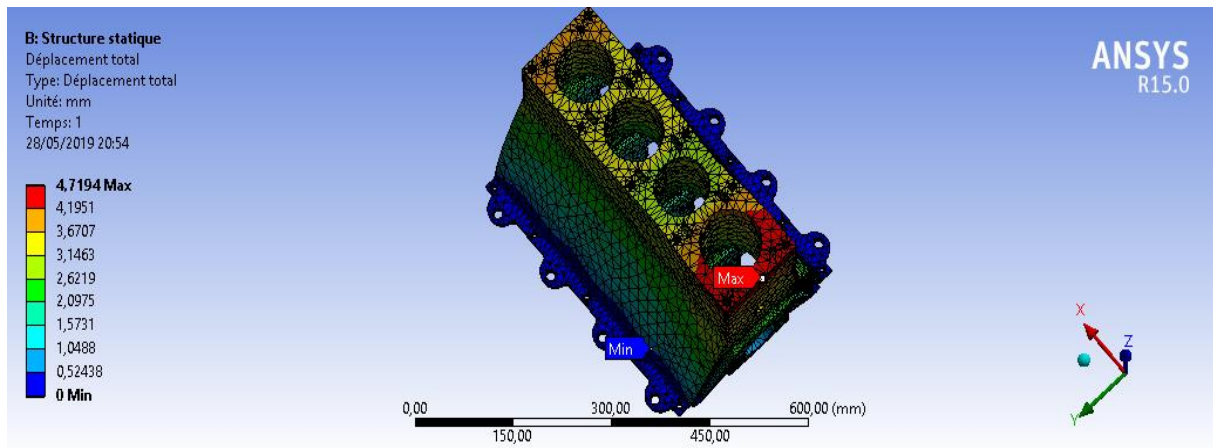


Figure 70: Le déplacement total

Le déplacement maximal se trouve dans la zone de combustion avec une valeur de **4,71mm**, à cause de la température maximale qui déforme la zone (cette grande température dilate la zone de combustion si pour ça on a obtenu une valeur maximale de déplacement).

Le déplacement minimal se trouve dans la zone de support fixe.

La figure représente l'évolution de la température (°C) en fonction la longueur (mm) du bloc moteur :

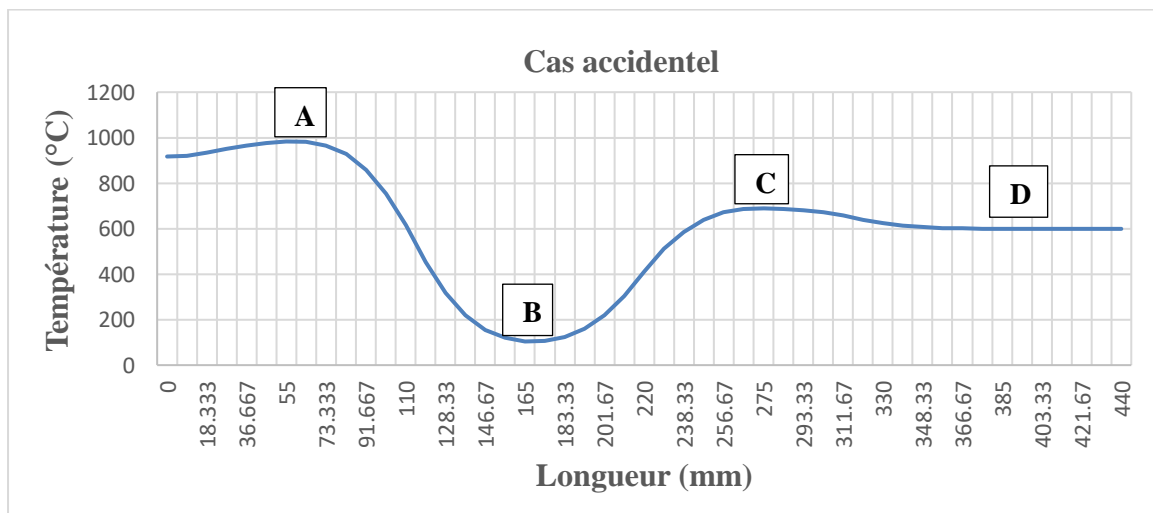


Figure 71: La température en fonction de la longueur

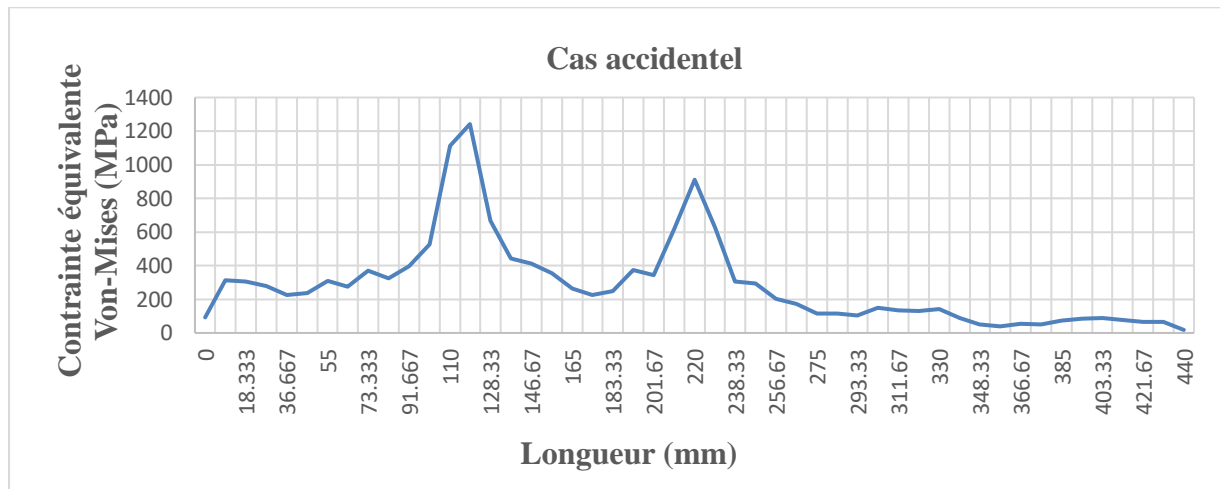
La température maximale = **983,22°C**

La température minimale = **103,88°C**

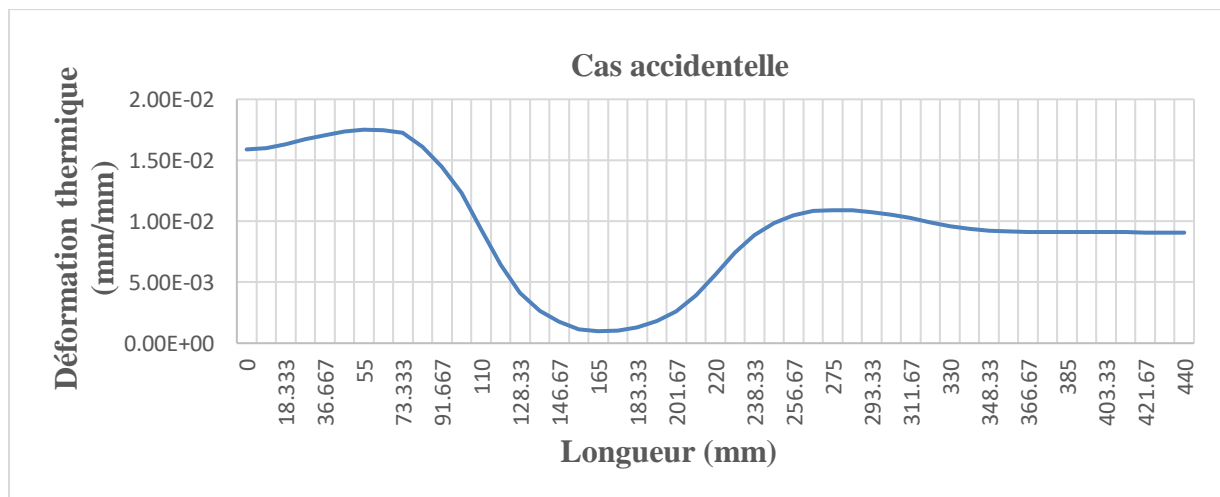
On remarque que :

La courbe augmente jusqu'à le point A (Température maximale), et descendre au point B (Température minimale d'admission), puis on voit une autre augmentation vers le point C (c'est la température d'échappement=700°C), et le point D (c'est la température de compression=600°C).

La cause de l'augmentation des températures c'est l'absence de liquide de refroidissement.



**Figure 72:** La contrainte équivalente (Von-Mises) en fonction de la longueur



**Figure 73:** La déformation thermique en fonction de la longueur

La déformation thermique a une relation avec la température (chaleur), cela veut dire que la déformation thermique augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température. On remarque que la distribution de la déformation thermique le long de la trajectoire choisie pour le cas accidentel est différente à celle obtenue dans le cas normal. Par contre sa valeur maximale reste identique pour les deux cas (Voir **Figure 56** et **Figure 67**).

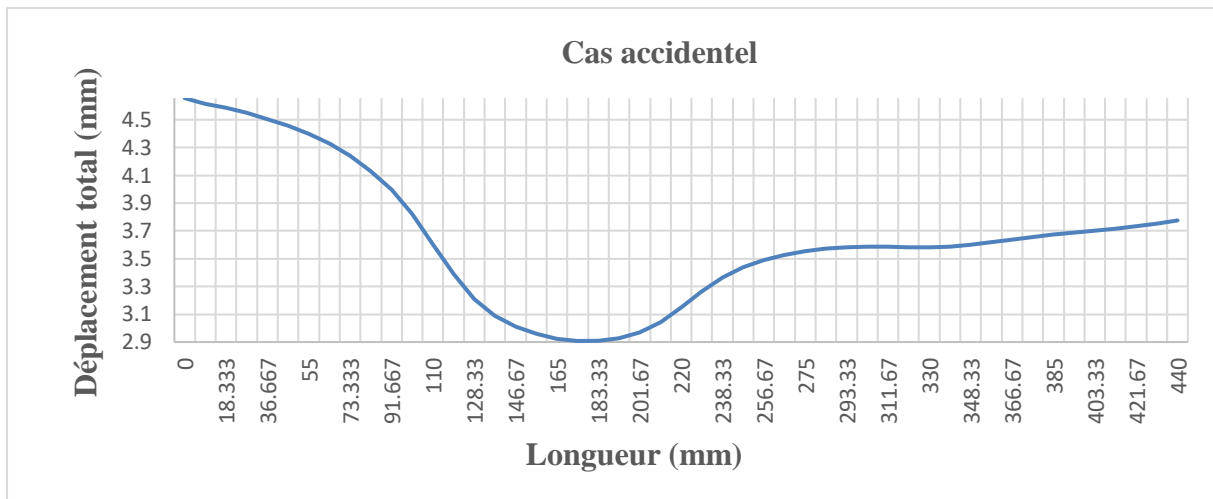


Figure 74: Le déplacement total en fonction de la longueur

**I.3. Comparaison entre le cas normal et le cas accidentel :**

On va faire une comparaison entre les deux cas au niveau de la température :

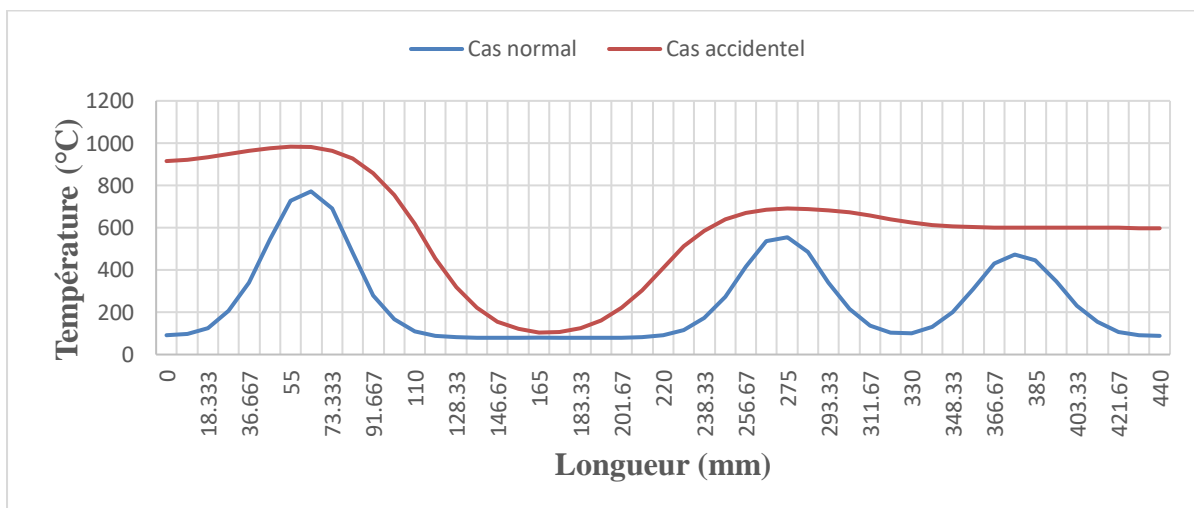


Figure 75: Comparaison entre le cas normal et le cas accidentel

Nous remarquons que dans le bloc moteur que :

La température du cas accidentel est supérieure à la température du cas normal car l'absence du liquide de refroidissement accélère la propagation de la température au sein du bloc moteur.

II/ Alliage d'aluminium 2024 (AlCuMg2):

1. Température :

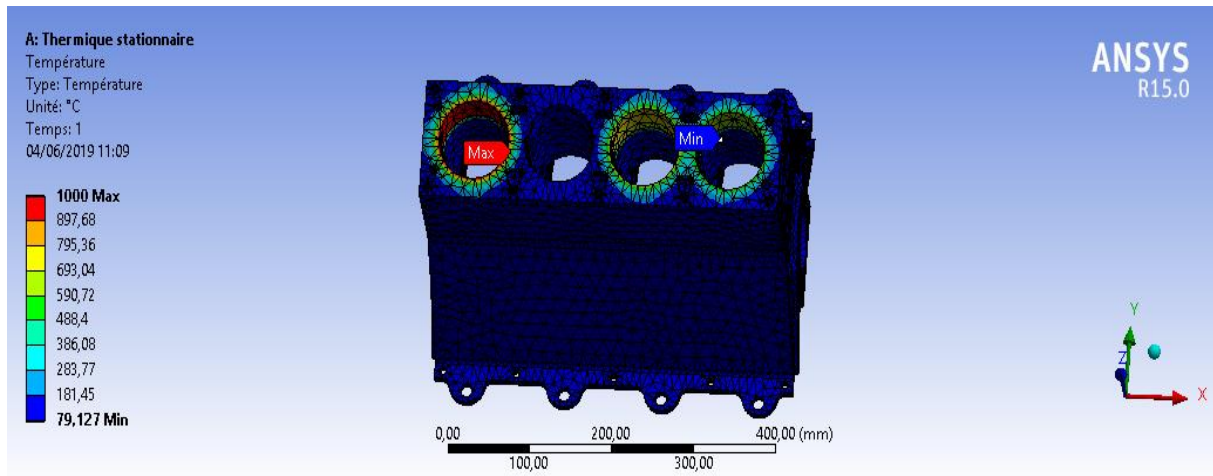


Figure 76: Distribution de la température dans le bloc moteur

La température maximale= 1000°C (c'est la température de combustion).

La température minimale= 79,12°C

La température de combustion (maximale) reste dans la zone de combustion grâce à le liquide de refroidissement qui freine cette température à distribuer dans tout le bloc moteur.

2. Flux de chaleur total :

Flux de chaleur maximal égale 31,015 W/mm<sup>2</sup>.

Flux de chaleur minimal égale 6,258e-15 W/mm<sup>2</sup>

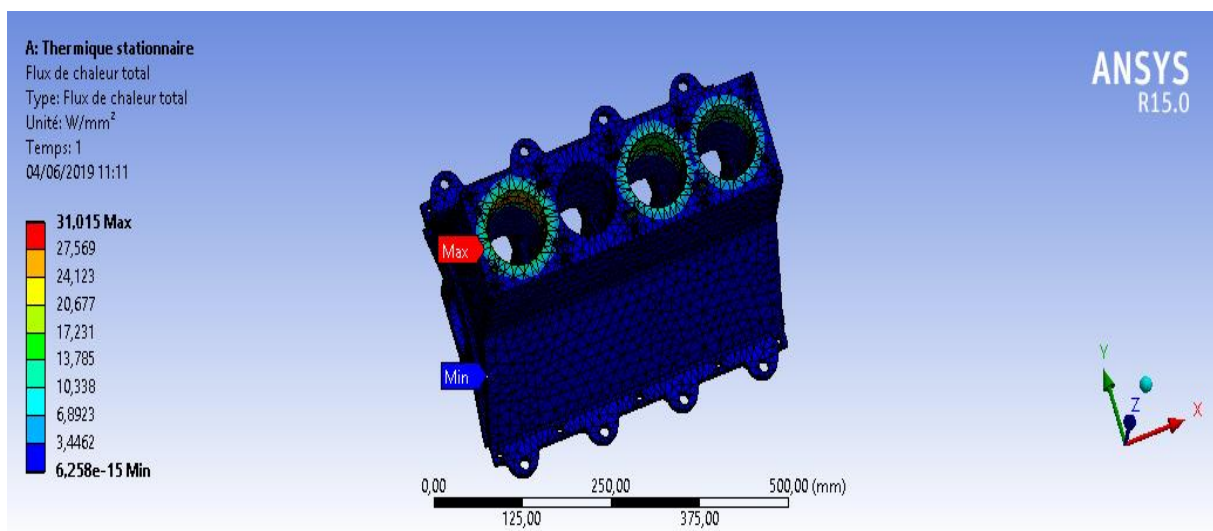


Figure 77: Le flux de chaleur total



3. Déformation thermique :

Valeur maximale : 0,034 mm/mm=3,4%

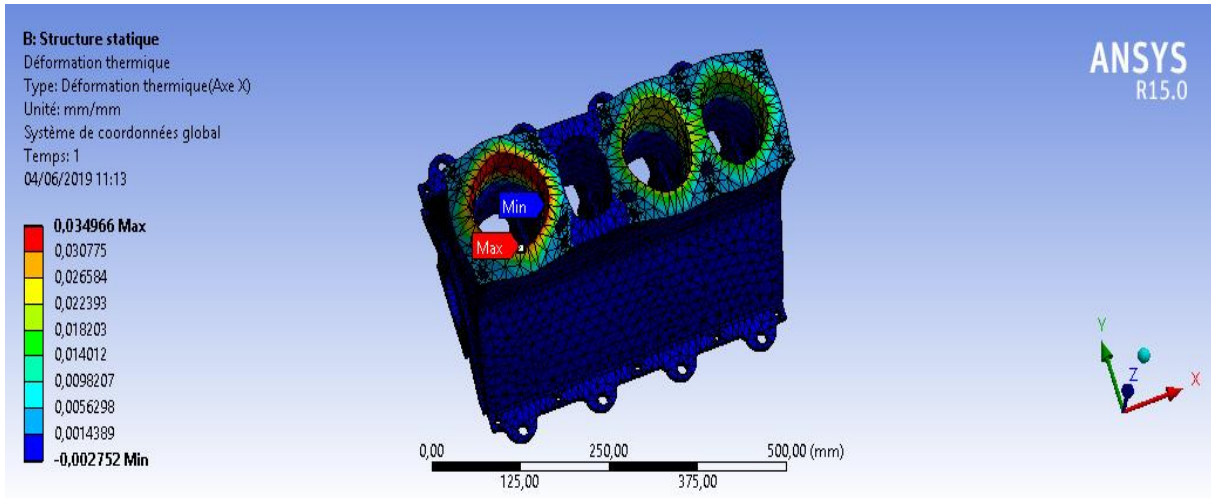


Figure 78: La déformation thermique

Le coefficient de dilatation est plus élevé si pour ça la déformation maximale est plus élevée (3,4%), et parce que la température de combustion (1000°C) est supérieure que la température de fusion (500 à 638°C).

4. Déformation totale équivalente :

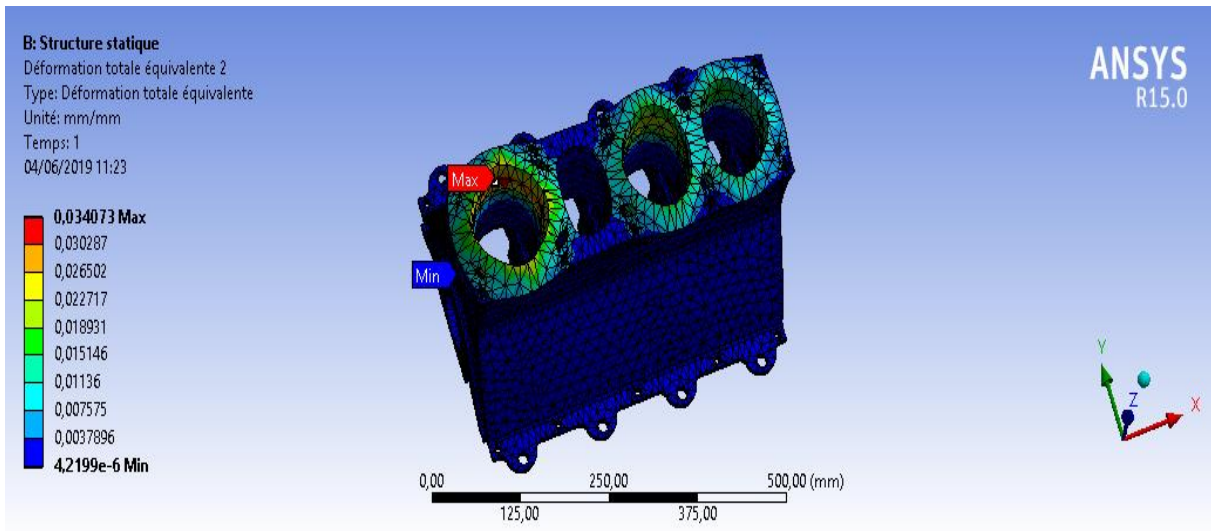


Figure 79: La déformation totale équivalente

5. Contrainte équivalente (Von-Mises) :

La contrainte équivalente maximale est égale 1589,1 MPa

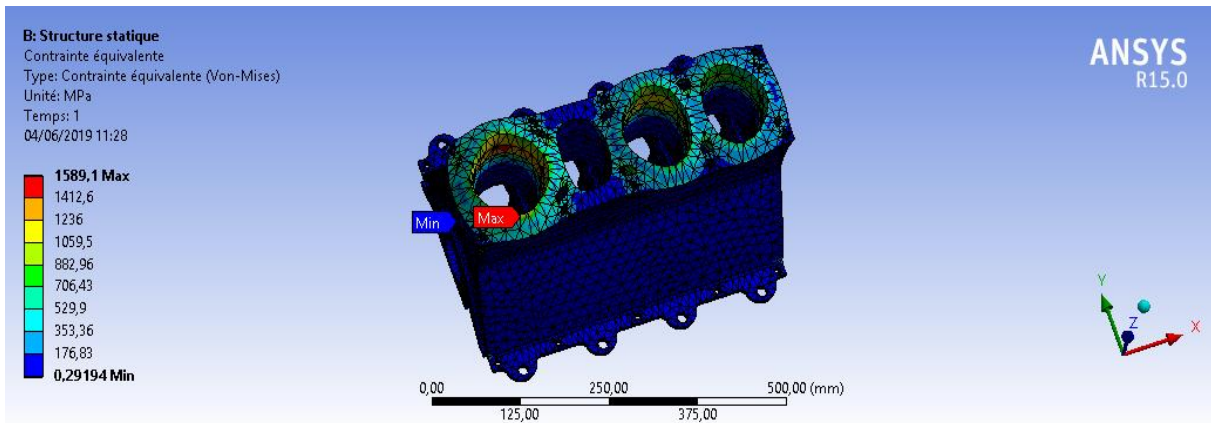


Figure 80: La contrainte équivalente (Von-Mises)

6. Déplacement total : Déplacement maximal = 1,6 mm

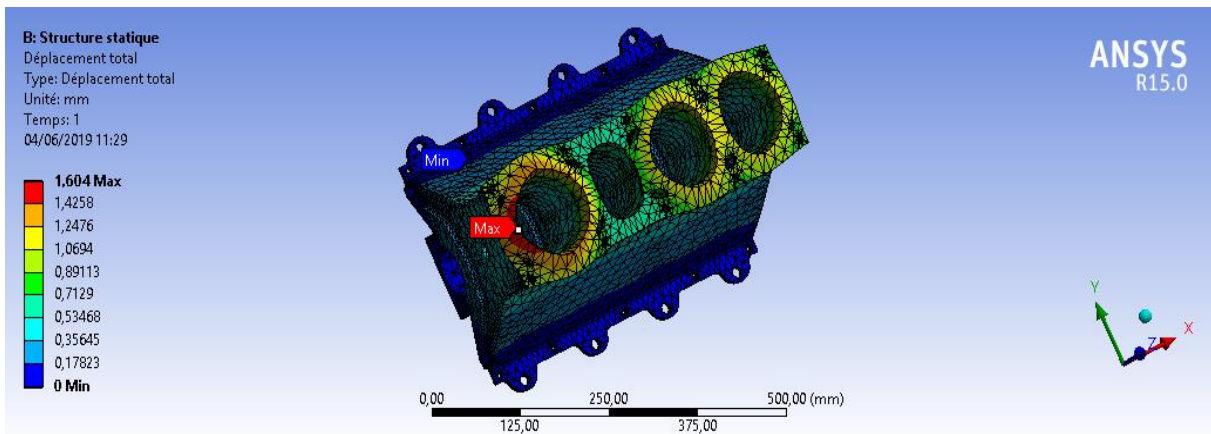


Figure 81: Le déplacement total

Les figures suivantes représentent les résultats obtenus sur la trajectoire :

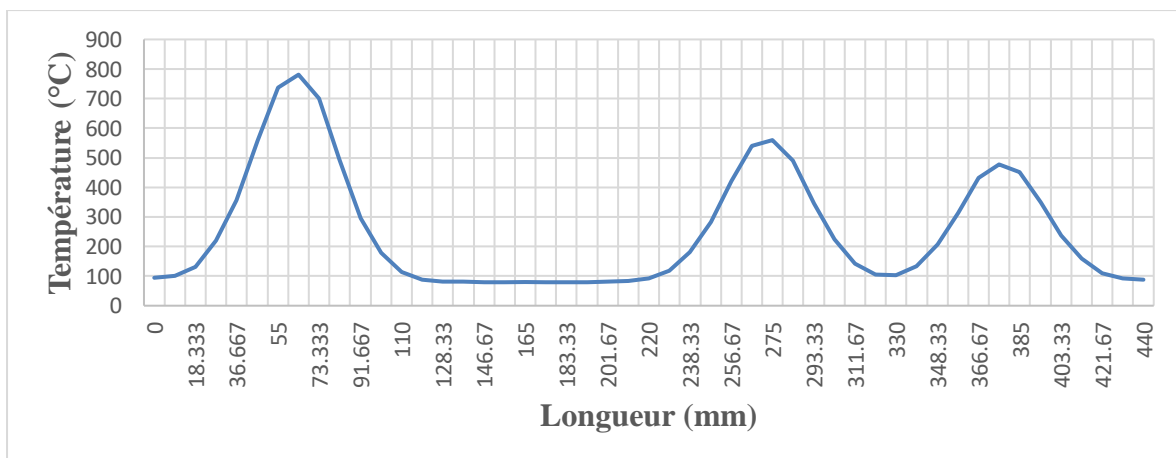


Figure 82: La température en fonction de la longueur de la trajectoire

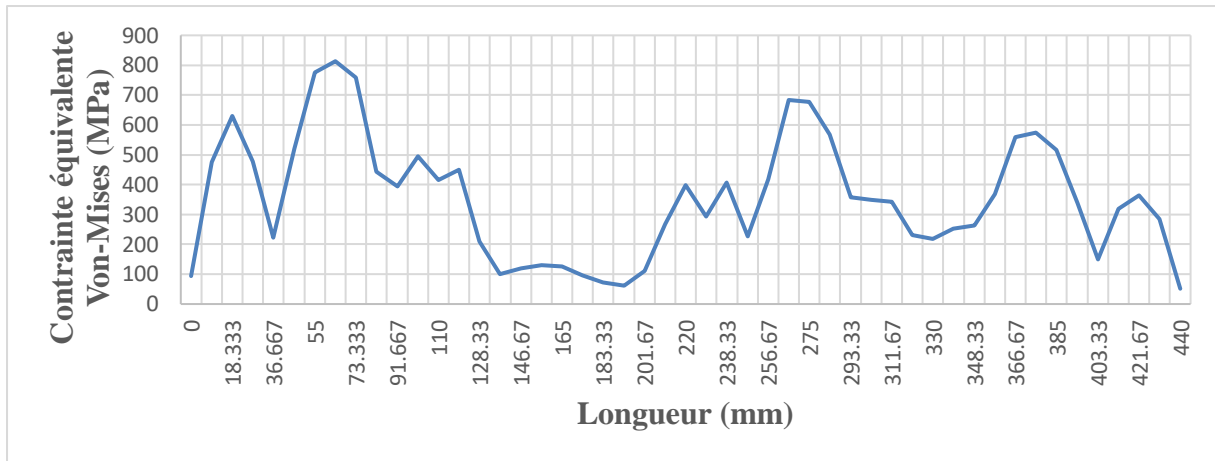


Figure 83: La contrainte équivalente (Von-Mises) en fonction de la longueur

La contrainte équivalente (Von-Mises) maximale est égale **813,3 MPa** à cause de :

La température de combustion et de l'échappement et de compression > la température de fusion (**500 à 638°C**).

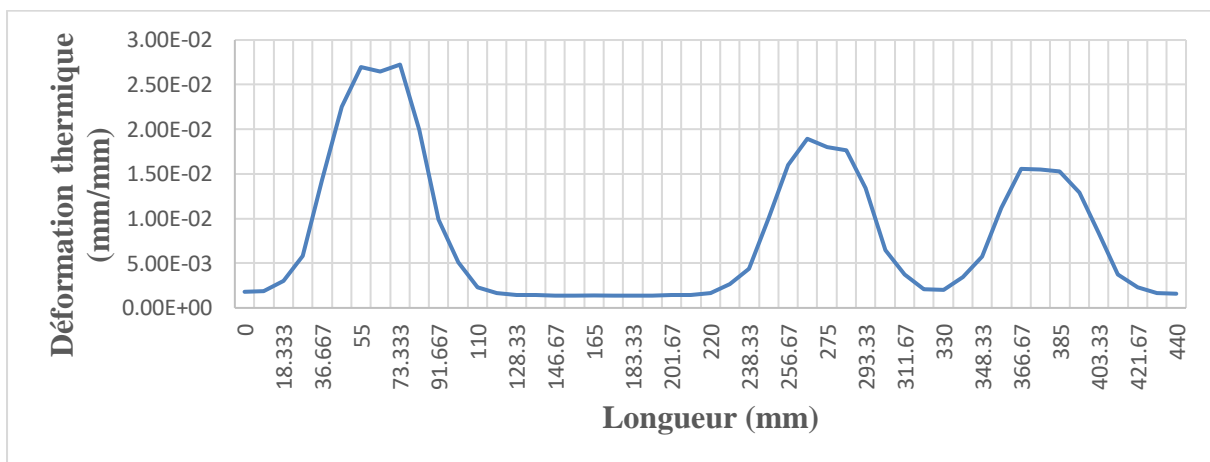


Figure 84: La déformation thermique en fonction de La longueur

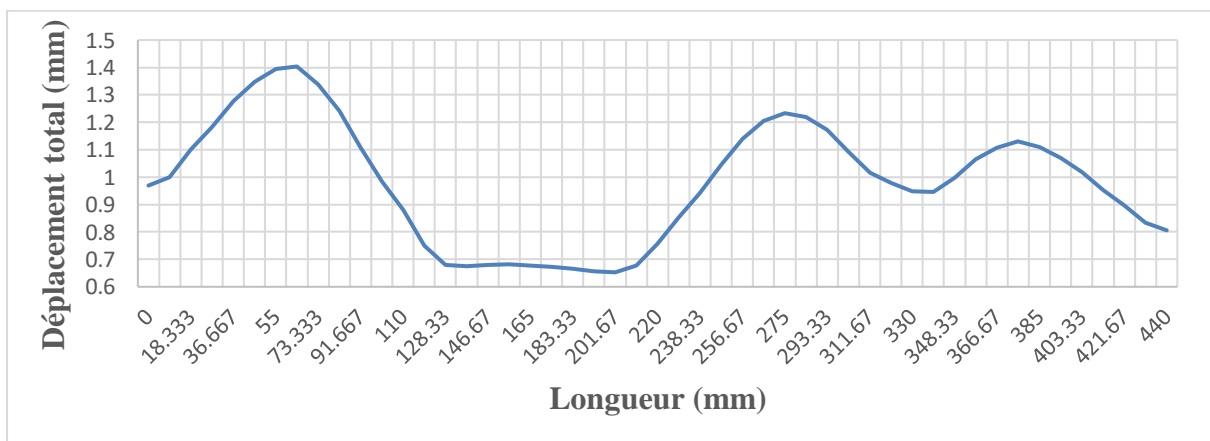


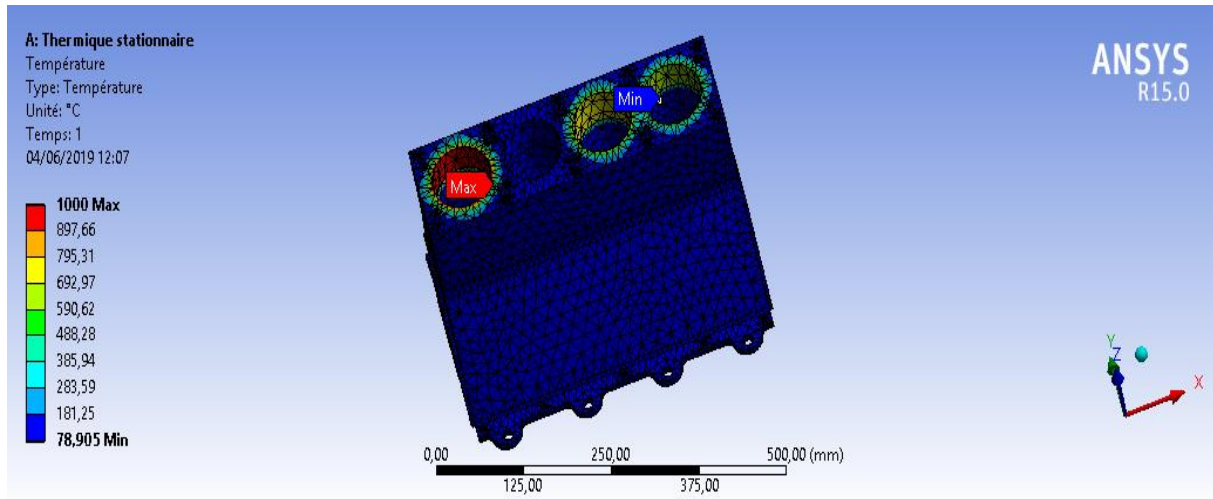
Figure 85: Le déplacement en fonction de longueur

**III/ Fonte grise:**

**1. Température :**

Température maximale : 1000°C

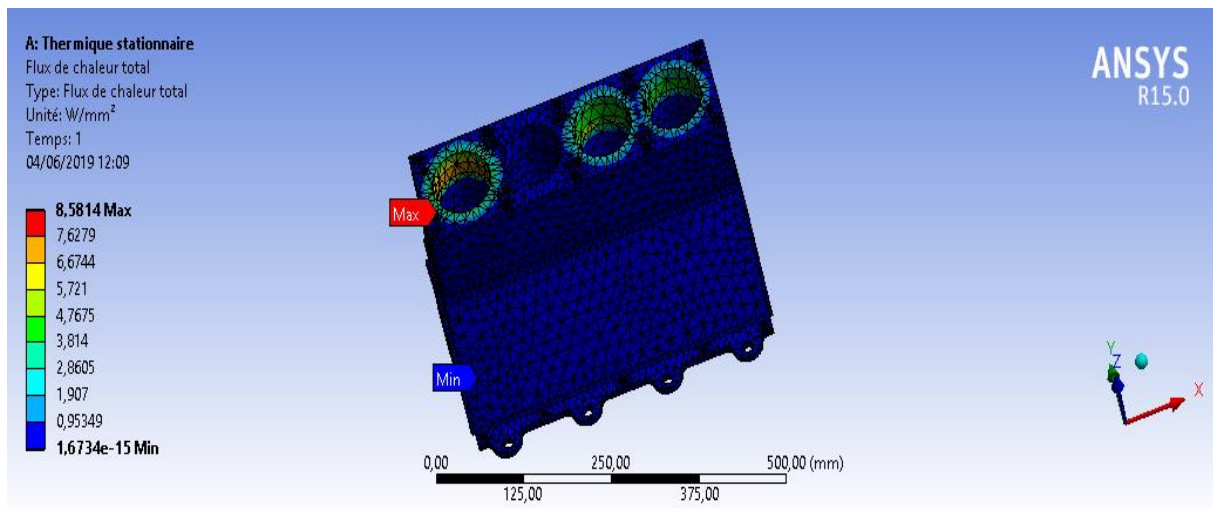
Température minimale : 78,9°C



*Figure 86:* Distribution de la température dans le bloc moteur

**2. Flux de chaleur total :**

Flux de chaleur maximal : 8,58W/mm<sup>2</sup>



*Figure 87:* Le flux de la chaleur total

3. Déformation thermique :

- Déformation thermique Maximale : 1,9%

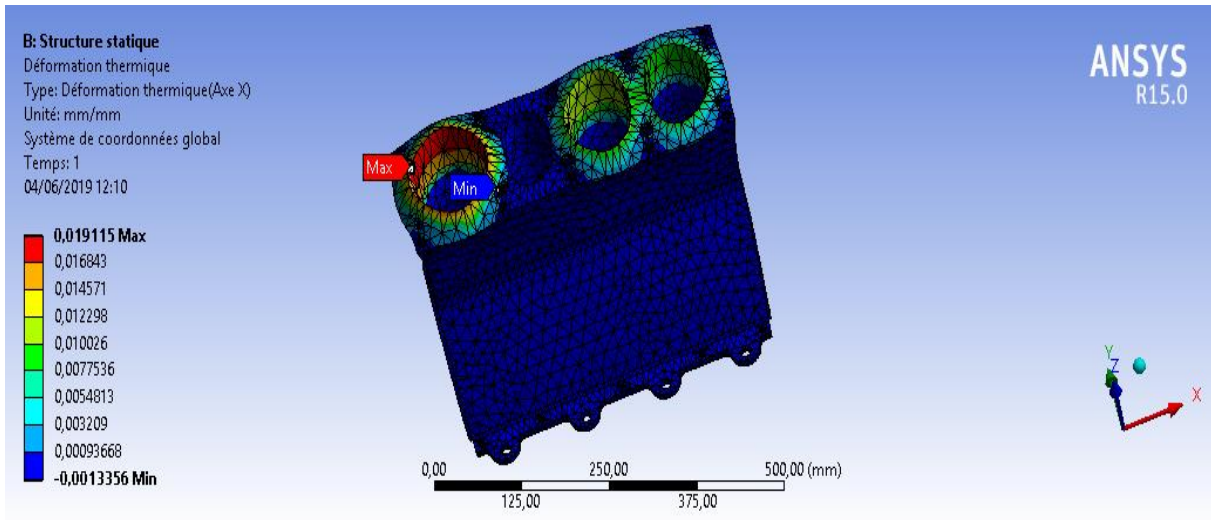


Figure 88: La déformation thermique

4. Déformation totale équivalente :

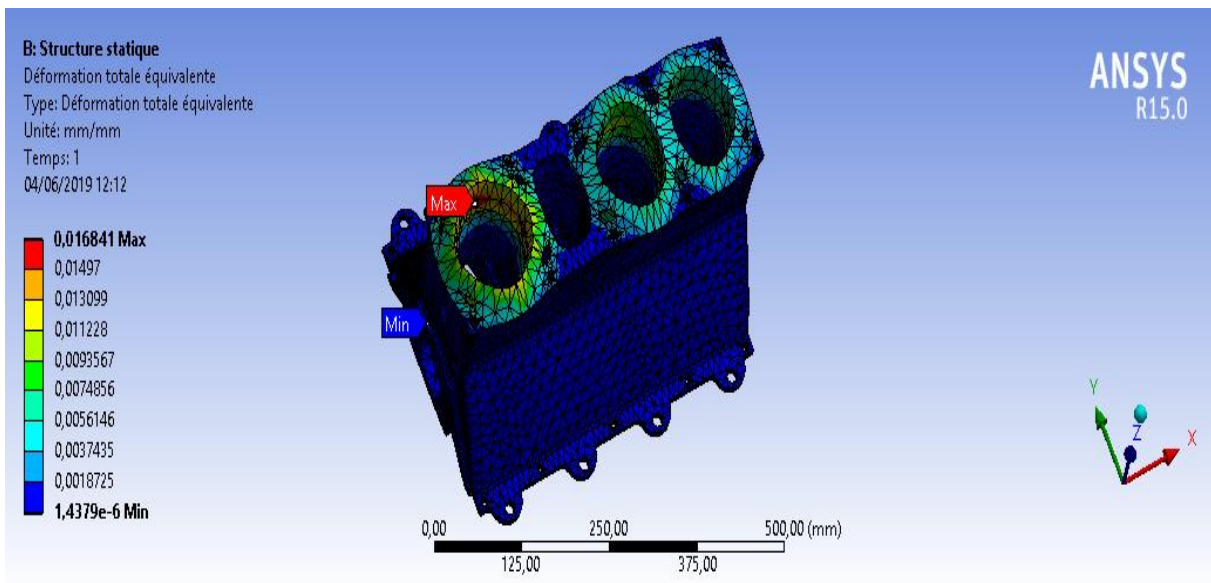


Figure 89: La déformation totale équivalente

5. Contrainte équivalente (Von-Mises) :

- Valeur maximale : 1469,5 MPa > limite d'élasticité 155 MPa (ce n'est pas bon, il faut revoir la température exacte de combustion ou choisir un autre matériau avec une limite d'élasticité supérieure à 1500 MPa.

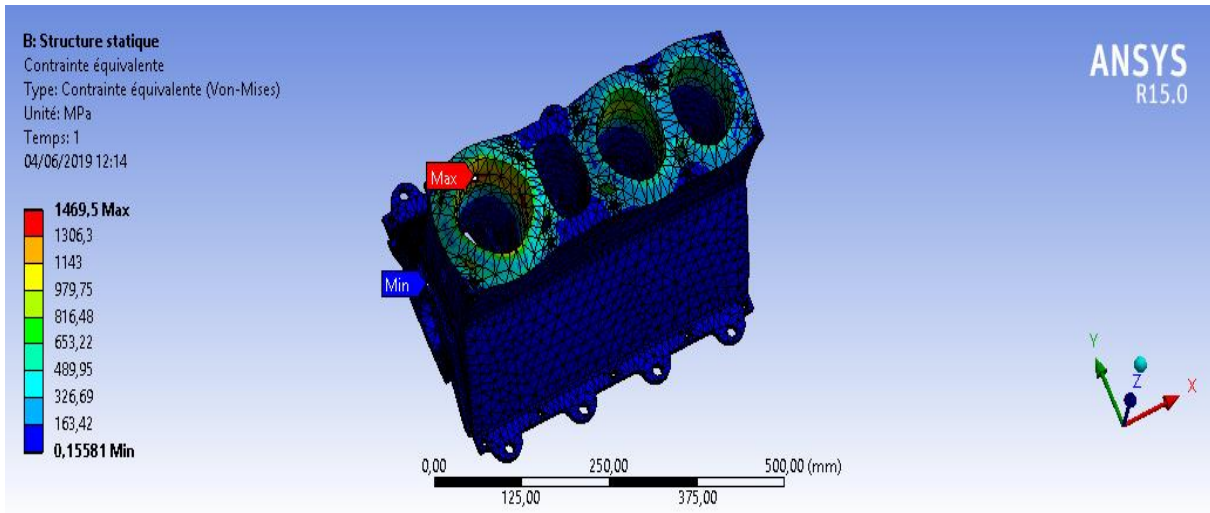


Figure 90: La contrainte équivalente (Von-Mises)

6. Déplacement total :

- Déplacement maximal : 0,8 mm

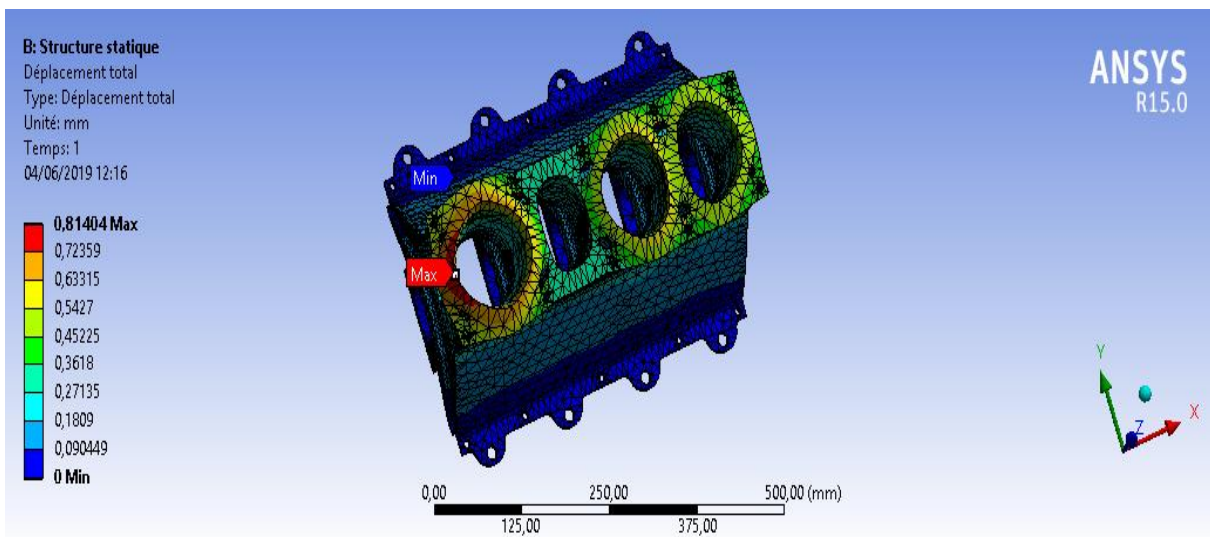


Figure 91: Le déplacement total

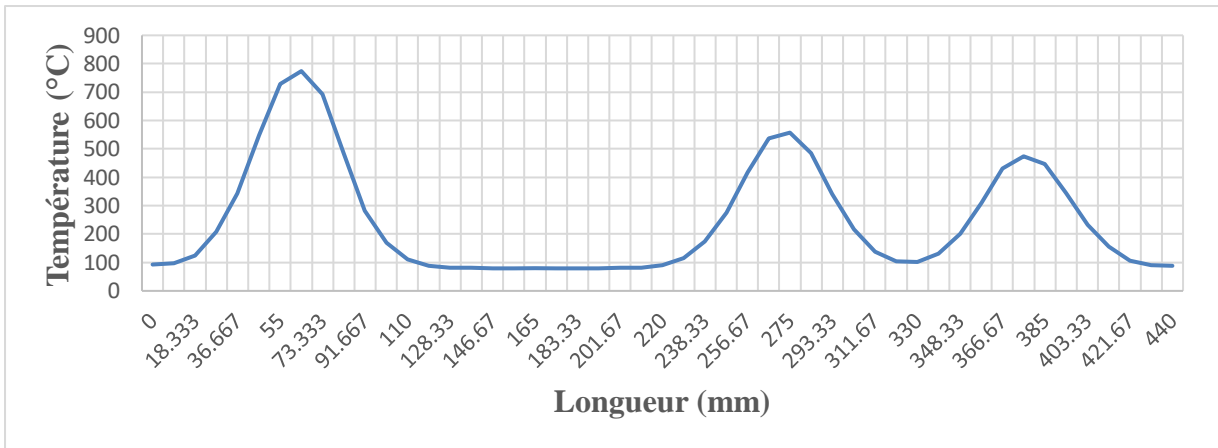


Figure 92: La température en fonction de la longueur de la trajectoire

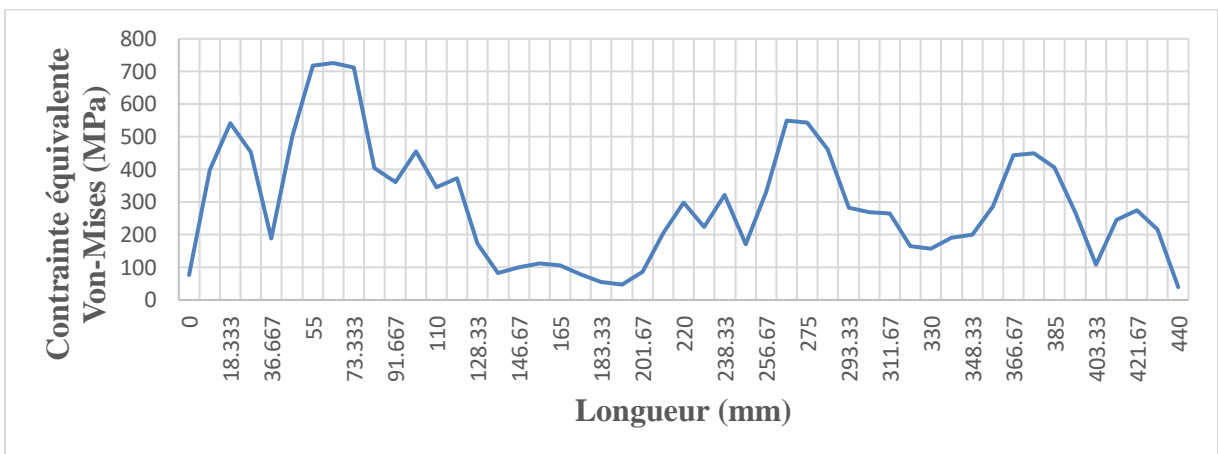


Figure 93:  $\sigma$  (Von-Mises) en fonction de la longueur

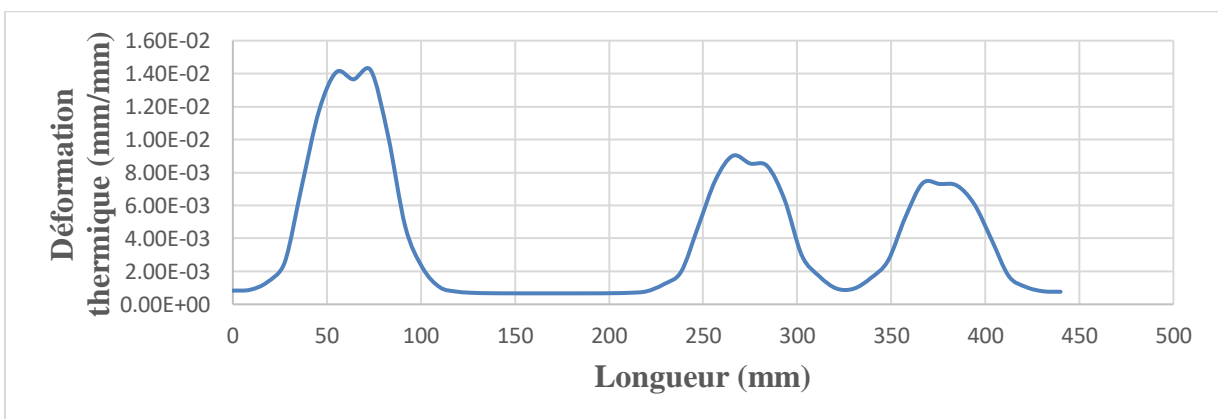


Figure 94: La déformation thermique en fonction de la longueur

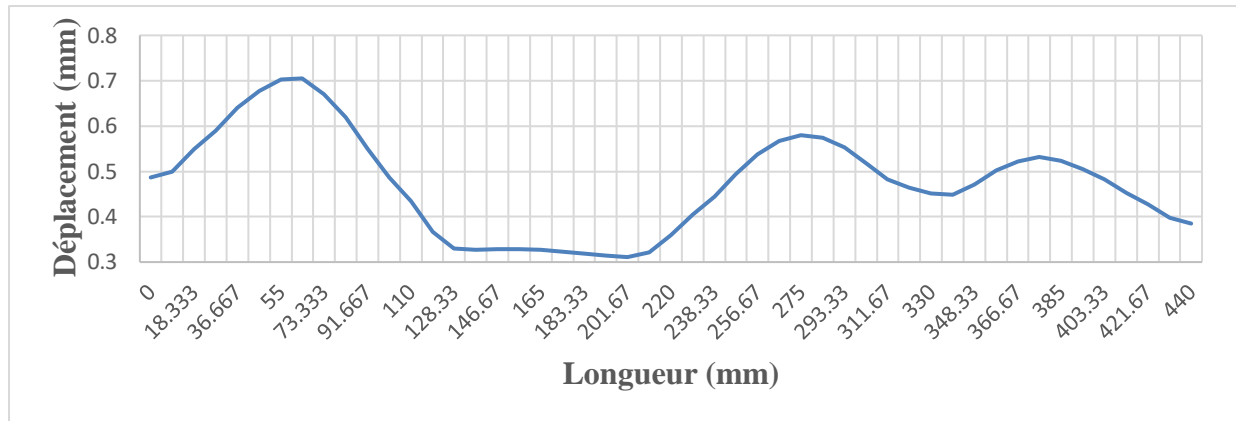


Figure 95: Le déplacement total en fonction de la longueur

Nous remarquons que le déplacement maximal est très faible (**0,7mm**) au niveau de la zone de combustion.

Le système de refroidissement est très actif parce qu'il a diminué les températures, les déformations thermiques et donc les déplacements, les contraintes équivalentes.

### Comparaison entre les 3 types de matériaux :

#### 1. Contrainte équivalente (Von-Mises) :

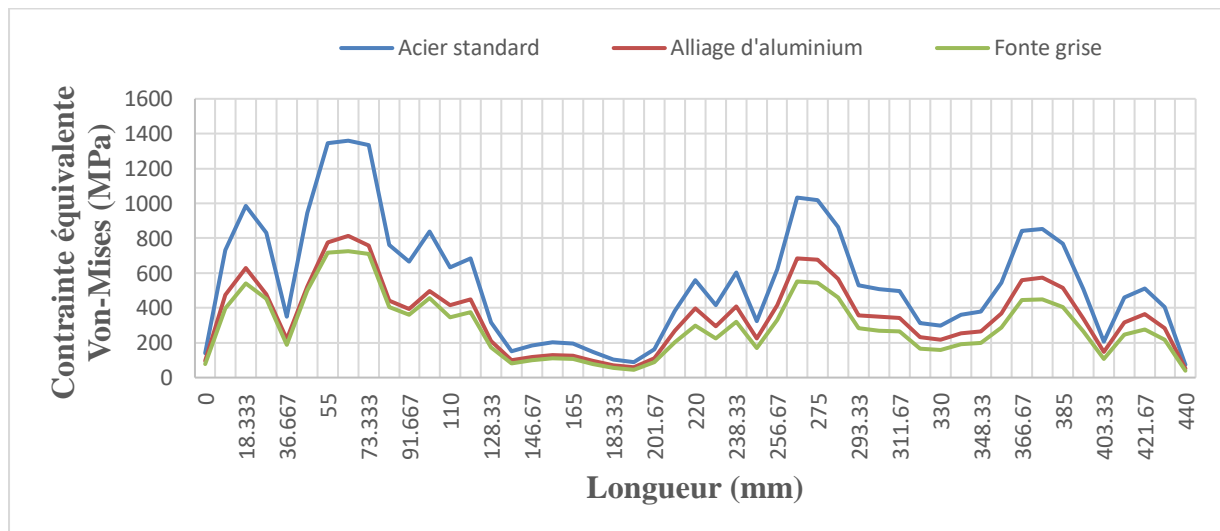


Figure 96: La contrainte équivalente (Von-Mises) en fonction de la longueur

On remarque que la contrainte équivalente (Von-Mises) de l'acier standard est plus supérieure que la contrainte équivalente (Von-Mises) de l'alliage d'aluminium et de la fonte grise.

La fonte grise contient une contrainte équivalente inférieure aux autres matériaux, car la fonte présente des meilleurs compromis entre les propriétés thermiques et mécaniques. On remarque que l'allure des trois courbes est la même car nous avons appliqué les mêmes



conditions aux limites.

**2. Déformation totale équivalente :**

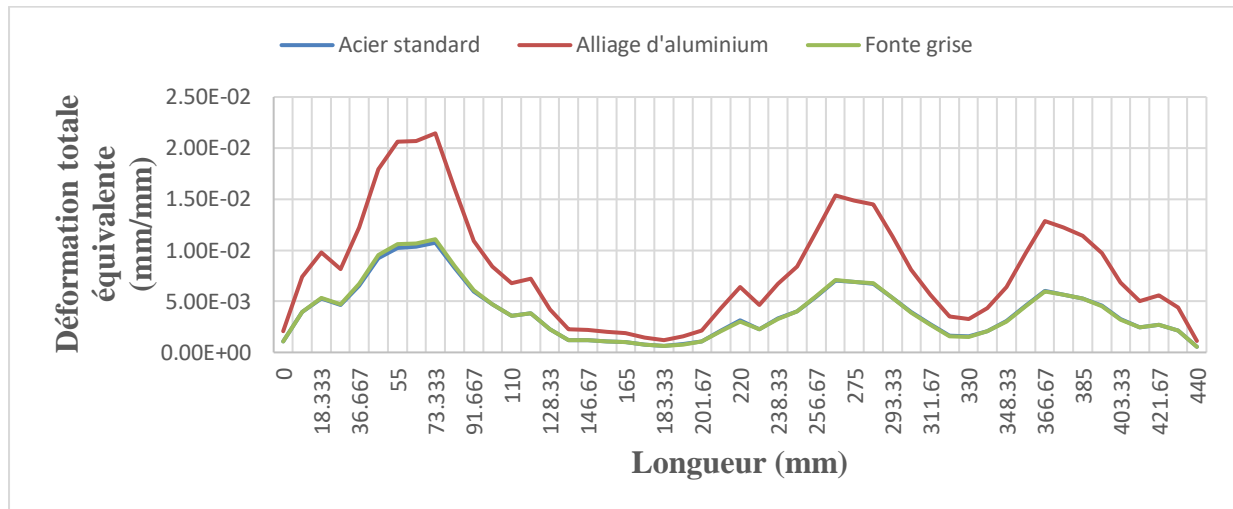


Figure 97: La déformation équivalente totale en fonction de la longueur

On remarque qu'il n'y pas une grande différence entre les déformations totales équivalentes pour l'acier et la fonte.

**3. Déplacement total :**

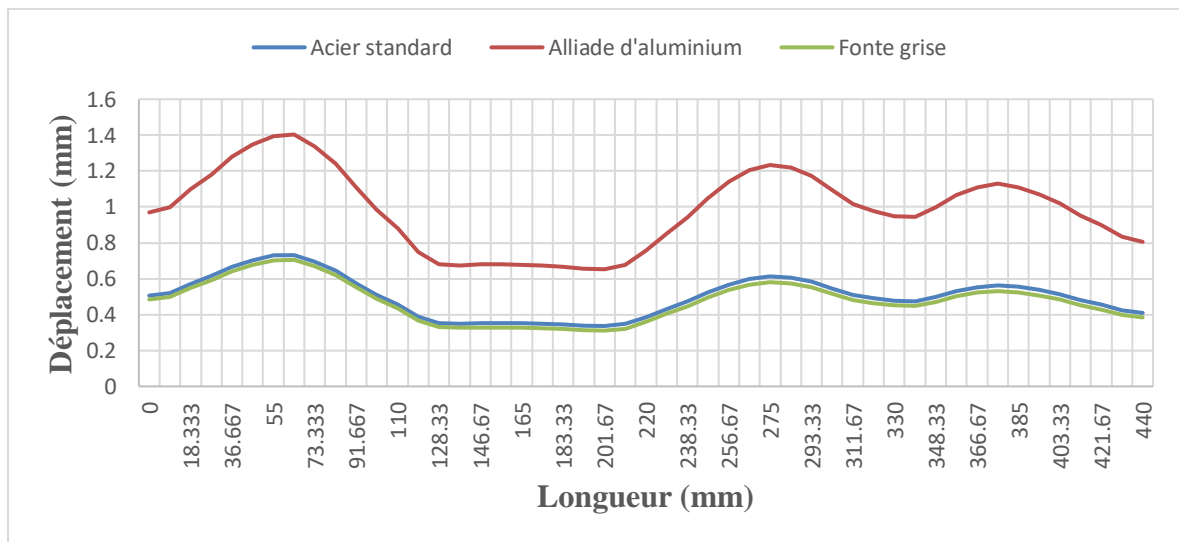


Figure 98: Déplacement total en fonction de la longueur

Nous remarquons que :

Le déplacement total maximale se trouve dans la courbe de l'alliage d'aluminium à cause de :  
 Le coefficient de dilatation de ce matériau est supérieur que le coefficient de dilatation de l'acier standard et la fonte grise et par conséquent la déformation thermique pour l'aluminium est supérieure à celle obtenue pour les autres matériaux. En plus, l'aluminium est

moins rigide et thermiquement plus conducteur que les autres matériaux.

Le tableau suivant présente les valeurs maximales ( $\sigma$  Von-Mises, la déformation thermique, le déplacement total) de trois types de matériau :

	<b>Acier standard</b>	<b>Alliage d'aluminium</b>	<b>Fonte grise</b>
La contrainte équivalente (Von-Mises) maximale	<b>2790,1 MPa</b>	<b>1589,1 MPa</b>	<b>1469,5 MPa</b>
La déformation thermique maximale	<b>1,8%</b>	<b>3,4%</b>	<b>1,9%</b>
Le déplacement total maximal	<b>0,84 mm</b>	<b>1,6 mm</b>	<b>0,81 mm</b>

**Tableau 14** : Comparaison des Max entre les trois types de matériau

***CONCLUSION***

***GENERALE***

# CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est de faire une analyse thermomécanique par la méthode des éléments finis d'un bloc moteur, et de proposer une solution pour diminuer la propagation des températures dans le bloc moteur, ainsi que les contraintes thermomécaniques et les déformations et les déplacements.

Pour cela, on a utilisé trois types de matériau (acier standard, alliage d'aluminium, fonte grise) dans le but de déterminer le matériau convenable pour notre bloc moteur.

Au début, deux calculs ont été faits : un calcul thermomécanique sur un modèle normal en acier et un calcul accidentel avec un manque totale du liquide de refroidissement. Les résultats ont montré que la température de combustion cause un grave dégât dans le cas accidentel car la température se propage très vite dans le bloc moteur, la contrainte équivalente (**Von-Mises**) maximale est trois fois plus grande dans ce cas que la contrainte obtenue dans le cas normal. On conclue que le liquide de refroidissement joue un rôle très important dans la distribution de la température dans le bloc moteur et le bon fonctionnement de celui-ci.

Dans la deuxième partie on a utilisé d'autres matériaux comme l'alliage d'aluminium 2024 et la fonte grise afin de sélectionner le meilleur matériau qui présente la contrainte équivalente la plus faible au sein du bloc moteur. A partir nos résultats, on conclut que la fonte grise est le matériau qui présente la plus faible contrainte thermomécanique.

En perspective, on conseil de tester d'autres matériaux qui possèdent des limites d'élasticité encore plus élevées que les matériaux testés.

# ANNEXE

CARBURANT	DIESEL OU (GAS-OIL, GASOILE) GAZOLE	ESSENCE OU GASOLINE ISO-OCTANE	HYDROGENE
FORMULE OU MOLECULE CHIMIQUE	C12H26 C21H44	C8H18 C7H16	H2
POIDS MOLECULAIRE (g/mol)	170-296	100-114	2,016
MASSE VOLUMIQUE (kg/m <sup>3</sup> )	848	720-780	0,089
CONDUCTIVITE THERMIQUE DU MELANGE (AIR+CARBURANT) (W/mK)		2,4	5
GAMMA=CP/CV DU MELANGE (AIR) : Coefficient isentropique ou exposant adiabatique	1,4	1,4	1,4
RAPPORT AIR/CARBURANT DANS LE CYLINDRE (kg/kg)	14,5	14,7	34,3 à 180
RAPPORT AIR/CARBURANT (kmol/kmol)			2,387
POUVOIR CALORIFIQUE (MJ/kg)	42-45	44-47	120-142
TEMPERATURE D'AUTO- INFLAMMATION (°C) AUTO-IGNITION TEMPERATURE	256	227-477 (380)	585
NOMBRE OU INDICE D'OCTANE	30	92-98 (87)	130
LIMITE DE LA FLAMABILITE DANS L'AIR (% VOLUME DU CARBURANT DANS 100% MELANGE AIR+CARBURANT)	0,6-5,5	1-7,6	4-75 (30)
TEMPERATURE DE LA FLAME (°C)	2327	2000-2307	2120-2207
PRESSION D'INJECTION (MPA)	10 à 30	----	0,5-25
RENDEMENT	0,4	0,20-0,25	0,5
TAUX DE COMPRESSION	15-22	07-10	12-16

