

# Moteur de fusée à ergol solide

Antoine LE DEROFF SAINTILAN

4 Juillet 2023

## 1 Introduction

Le moteur de fusée à ergols solides est un système propulsif novateur développé dans le cadre de ce projet. Il utilise une combinaison spécifique d'ergols solides sélectionnés pour fournir la poussée nécessaire à la propulsion d'une fusée. Ce moteur offre plusieurs avantages en termes de simplicité de conception, de coût réduit et de facilité de manipulation, ce qui en fait une option attrayante pour certaines applications. C'est pourquoi on peut retrouver ce type de moteur encore aujourd'hui dans les fusées récentes comme Ariane V (ESA), Space Launch System(NASA).. Le but de ce document est de montrer les étapes de conception du projet dans sa globalité et non la partie calculatoire. Voici à quoi ressemble de manière générale un moteur de fusée à ergol solide :

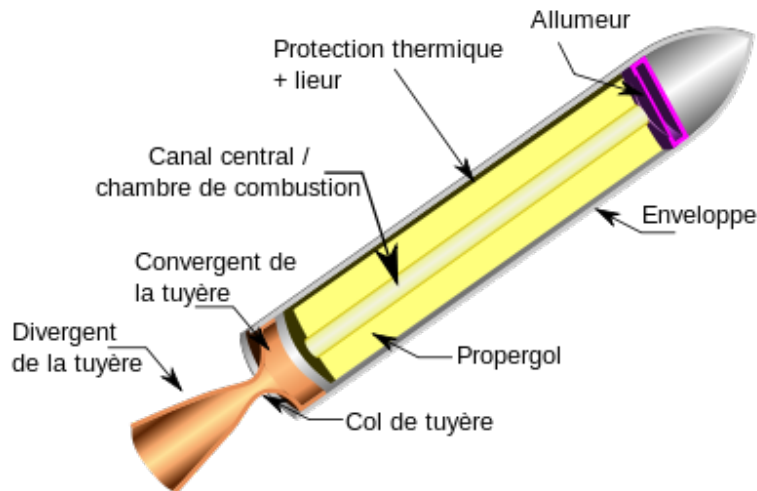


Figure 1: Schéma d'un moteur de fusée à ergol solide

## 2 Conception

### 2.1 Paramètres initiaux

Pour construire ce moteur, il faut premièrement établir le "cahier des charges" du moteur.

| Paramètre                                      | Valeur                       |
|--|------------------------------|
| Carburant                                      | Sorbitol $C_6H_{14}O_6$      |
| Comburant                                      | Nitrate de potassium $KNO_3$ |
| O/F ratio                                      | 2.14                         |
| Expansion Ratio                                | 7                            |
| Forme du grain                                 | BATES (cylindre perforé)     |
| Classe de moteur visée                         | J                            |
| Pression moyenne (bars)                        | 30                           |
| PortToThroat Ratio                             | >2                           |
| Flux massique maximal ( $kg/(sec \cdot m^2)$ ) | 1406                         |

Table 1: Design Parameters

### 2.2 Propriétés de la combustion

En considérant une pression moyenne de 30 bars, un O/F constant on peut utiliser le logiciel d'équilibre chimique NASA CEA. Voici un récapitulatif de propriétés thermodynamiques de la combustion du sorbitol et du nitrate de potassium.

| Paramètre   | Valeur |
|---|--------|
| Temperature de la chambre (K)                                 | 1966   |
| Masse molaire du gaz (g/mol)                                  | 37     |
| Capacité thermique à pression constante ( $kJ/(kg \cdot K)$ ) | 7.0410 |
| Gamma ( $C_p/C_v$ )   | 1.138  |
| CStar (m/sec)   | 1050   |
| Coefficient de poussée  | 1.5641 |

Table 2: Combustion Parameters

Comme vous pouvez le voir, la température de la chambre est supérieure à la température de fusion de l'aluminium ( $1966 > 933,45K$ ), il faut donc obligatoirement ajouter une protection thermique entre le corps en aluminium et le grain afin de réduire la température sur les parois. Cette protection thermique est simplement du carton dans notre cas.

### 2.3 Dimensionnement de la tuyère

Ensuite, l'utilisation d'un logiciel permettant de simuler le comportement du moteur avec les propriétés énumérées ci-dessous nommé openMotor a été utilisé,

permettant de dimensionner rigoureusement la tuyère du moteur. Voici les caractéristiques de la tuyère finale qui a été usinée:

| Paramètre                 | Valeur   |
|---------------------------|--|
| Materieau                 | Acier Inoxydable 316                             |
| Diamètre de sortie (mm)   | 38.58  |
| Diamètre de la gorge (mm) | 14.5   |
| Diamètre d'entrée (mm)    | 60   |
| Angle divergent (degrés)  | 45   |
| Angle convergent (degrés) | 15   |
| Etanchéité                | Utilisation de joints toriques + Bouchon en inox |

Table 3: Nozzle Design

### 3 Modélisation 3D

La modélisation 3D du moteur a été faite à l'aide du logiciel nommé Fusion 360 en prenant en compte les dimensions calculées précédemment par le logiciel de simulation. Voici quelques images du moteur en 3D.

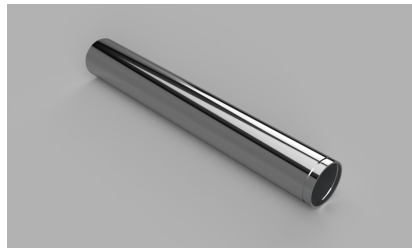


Figure 2: Corps en aluminium

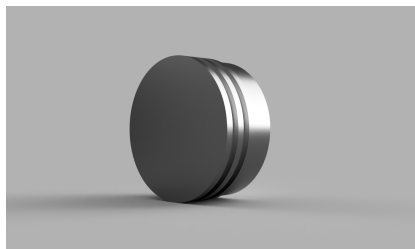


Figure 3: Bouchon en acier inoxydable

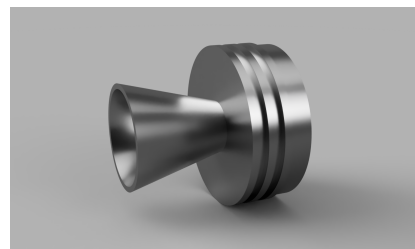


Figure 4: Tuyère en acier inoxydable

## 4 Fabrication et tests du moteur

### 4.1 Fabrication

Pour la fabrication du moteur, trois pièces ont été usinées dont le bouchon, la tuyère ainsi que le corps en aluminium. Ces pièces ont été créées à partir de plans d'ingénierie basés sur le modèle 3D. La protection thermique, les grains, les joints toriques, les allumeurs, le comburant et carburant ont été achetés ou fabriqués.

### 4.2 Banc de test

Un banc de test avec capteur de force, module carte SD, arduino et interface a été réalisé à la suite du test statique numéro 1, permettant ainsi de mesurer électroniquement la poussée du moteur. Sa structure est majoritairement composée de bois acheté dans les magasins de bricolage standard.

### 4.3 Tests statiques

Les tests statiques au format vidéo sont disponibles à l'adresse suivante: [youtube.com/@FreeeStorm](https://www.youtube.com/@FreeeStorm)

|                                    | Test1  | Test2  | Test3   |
|------------------------------------|--------|--------|---------|
| Poussée moyenne réelle (N)         | X      | 120    | 230     |
| Poussée moyenne prédite (N)        | 111    | 257    | 511     |
| Poussée totale réelle (N)          | X      | 370    | 950     |
| Poussée totale prédite (N)         | 170    | 563    | 982     |
| Temps de combustion réel           | X      | 2.9    | 4.2     |
| Temps de combustion prédit         | 1.53   | 2.58   | 1.89    |
| Masse de propergol (g)             | 250    | 510    | 860     |
| Nombre de grain                    | 1      | 2      | 1       |
| Diamètre externe du grain (Do, mm) | 50     | 50     | 50      |
| Configuration grain (Di,L, mm)     | 23, 95 | 23, 95 | 21, 340 |

Table 4: Récapitulatif des trois tests statiques

Durant les trois tests statiques réalisés sur la période d'avril-mai 2023, nous avons pu observer une poussée moyenne bien inférieure à ce que les simulations prédisaient. Par exemple, pour le dernier test, le logiciel de simulation prédisait une poussée moyenne de 511N tandis que le banc de test électronique a mesuré une poussée moyenne de 230N, soit un manque de 55% de poussée. Néanmoins, la poussée totale est sensiblement la même dû au fait que la durée de combustion soit nettement supérieure à celle prédite (1.89s contre 4.2s), ce qui classe le moteur du troisième test statique en classe J. Une baisse de poussée est causée par une baisse de pression. Cela signifie que la pression simulée a été différente de la pression réelle, qui peut être causée par plusieurs facteurs comme la précision du logiciel de simulation, la qualité de la combustion, l'allumage des charges pyrotechniques... Pour pallier à ce manque de pression, on peut réduire le

diamètre de la gorge de la tuyère, ou bien augmenter le "trou" au niveau du propergol afin d'augmenter plus rapidement la surface de combustion et donc augmenter la pression. Pour les points positifs, on peut observer sur les vidéos aucune fuite de gaz apparente, ce qui signifie que les joints toriques ainsi que le bouchon ont été correctement dimensionnés, mais également une température du corps relativement faible. Le moteur a résisté à la pression et le banc de test est également fonctionnel et pourra servir pour la mesure d'autres moteurs. Enfin, la tuyère, le bouchon et le corps en aluminium sont totalement fonctionnels pour de futurs tests.

## 5 Conclusion

Ce projet a été réalisé sur une période de 3 mois et m'a permis d'apprendre énormément de techniques sur les moteurs de fusée comme les mathématiques, la mécanique des fluides, la thermodynamique, l'électronique, la chimie. D'après le logiciel "EzAlt", si ce moteur était équipé d'une fusée à vide de masse 3kg (sachant que le moteur pèse 1.5 kg à vide), cette fusée irait dans les 1500 mètres d'altitude. Un nouveau logiciel de simulation pour moteur de fusée va être développé afin de simuler au mieux les caractéristiques des moteurs hybrides et solides comme la poussée, la pression, la combustion.