

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdel Hafid Boussouf Mila

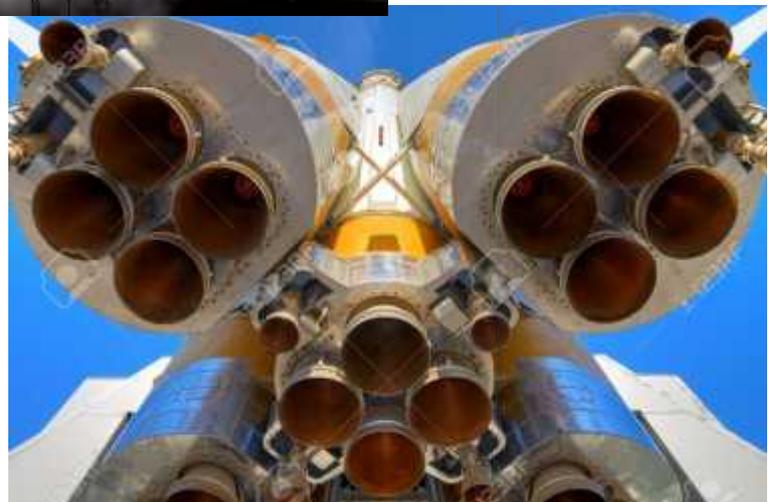
Support de Cours

Mécanique de Propulsion

Destiné aux Etudiants de la 2^{ème} Année master Mécanique Energétique

Chapitre V : Moteur Fusée

Elaboré par : **Dr. Ilhem ZEGHBID**



Année universitaire 2023-2024

V.1 Introduction

Le moteur fusée est un type de moteur à réaction, c'est-à-dire un engin qui projette un fluide (gaz ou fluide) vers l'arrière, ce qui transmet par réaction une poussée, de force égale et de direction opposée, vers l'avant. Le moteur fusée présente la particularité d'expulser une matière qui est entièrement stockée dans le corps du moteur. Ce type de moteur est en particulier utilisé par les fusées car il peut fonctionner dans un milieu dépourvu (pauvre) d'atmosphère mais également par les missiles car il permet d'atteindre des vitesses très importantes.

Généralement un moteur fusée fonctionne en expulsant des gaz qui sont produits par une réaction chimique exothermique dans une chambre de combustion et qui sont accélérés par une tuyère de l'aval. Les capacités d'un moteur fusée sont principalement caractérisées par sa poussée, c'est-à-dire la force qu'il peut exercer et son impulsion spécifique qui est la mesure de son rendement. Il existe de nombreuses catégories de moteurs fusées : les principales sont les moteurs fusées à ergols solides et les moteurs fusées à ergols liquide.

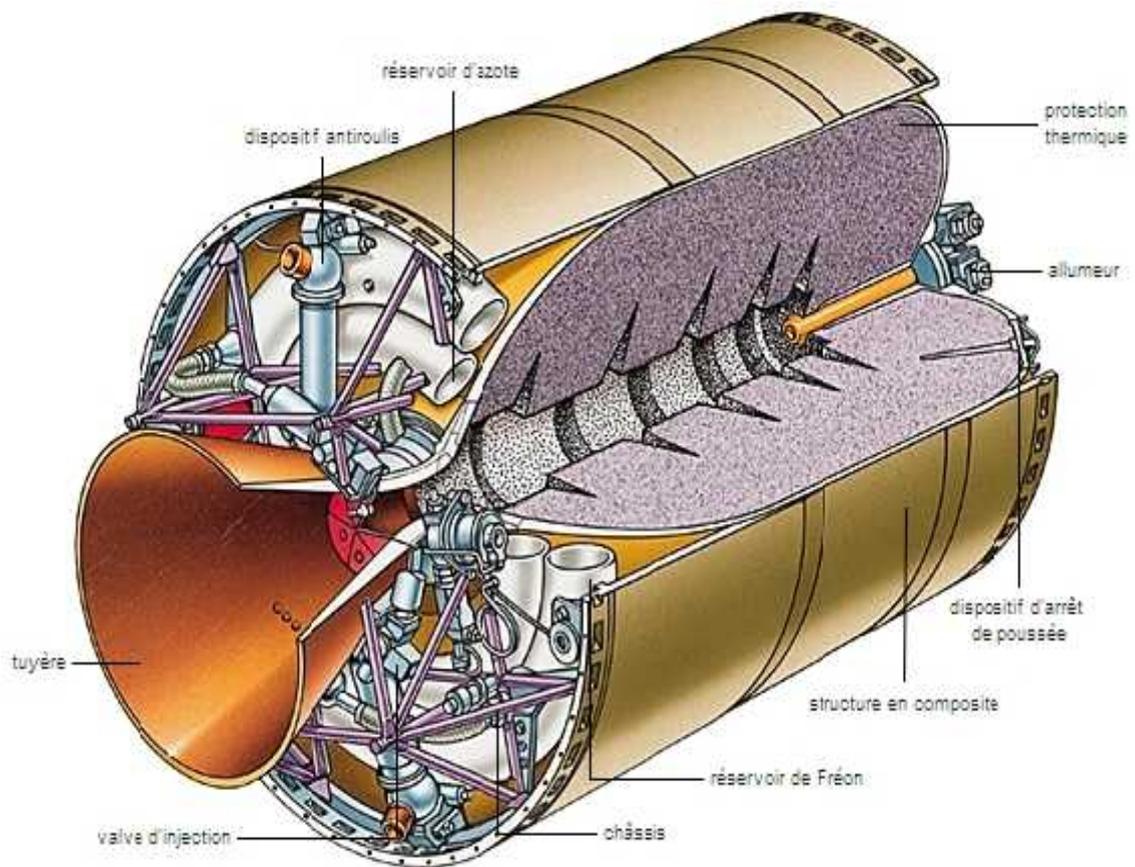


Figure 1 : Schéma descriptif moteur-fusée .

V.2 Classification des moteurs fusés

Les moteurs fusés sont classés comme suit :

1. Moteurs fusés chimiques
2. Moteurs fusés nucléaires
3. Moteurs fusés électriques
4. Moteurs fusés solaires

Les moteurs fusés chimiques peuvent être classés comme suit :

1. Moteurs fusés à propergol liquide.
2. Moteurs fusés à propergol solide.
3. Moteurs fusés à propergol hybride.

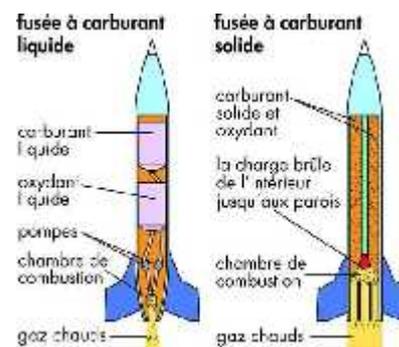


Figure 2 : Moteur fusée chimiques.

Les moteurs fusés peuvent être classés comme suit :

- **En fonction de l'application**
 - a. Fusés spatiales
 - b. Fusés militaires
 - c. Fusés des prévisions météorologiques
 - d. Fusés propulsives
- **En fonction du nombre d'étages**
 - a. Fusés à un étage
 - b. Fusés à plusieurs étages

V.2.1 Moteurs fusés à propergol liquide :

Construction

- La construction du moteur-fusée à propergol liquide est illustrée à la figure 3,
- Ce moteur utilise du carburant liquide (essence raffinée, hydrogène liquide, hydrazine, etc.) et de l'oxygène liquide.
- Le carburant liquide et l'oxygène liquide sont stockés séparément dans deux réservoirs différents, comme le montre la figure 3.
- Le préchauffeur est utilisé pour chauffer le carburant et l'oxydant.
- la tuyère est utilisée pour augmenter la vitesse et diminuer la pression des gaz.

Fonctionnement :

- Le combustible et l'oxygène liquides sont pompés séparément dans une chambre de combustion par l'intermédiaire de vannes de contrôle.
- Le combustible et l'oxygène liquides étant stockés à très basse température, ils sont préchauffés dans le préchauffeur à une température appropriée.

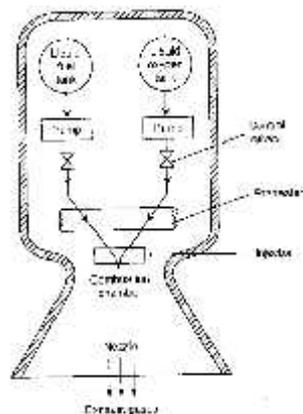


Figure 3 : Moteur fusée à propergol liquide.

- le mélange combustible-oxydant préchauffé est injecté dans la chambre de combustion par l'intermédiaire d'un injecteur approprié et la combustion à lieu.

- Lorsque la combustion a lieu dans la chambre de combustion, des gaz à très haute pression et à très haute température sont produits.
- Les produits de combustion hautement chauffés peuvent ensuite se dilater dans la section de la tuyère.
- Dans la tuyère, l'énergie de pression du gaz est convertie en énergie cinétique, de sorte que les gaz sortent de l'unité à très grande vitesse.
- En raison de la vitesse élevée des gaz sortant de l'unité, une force ou une poussée est produite dans la direction opposée. Cette poussée propulse la fusée.

V.2.2 Moteurs fusés à propergol solide :

Construction:

- La construction d'un moteur-fusée à propergol solide est illustrée à la figure 4.
- Le propergol solide est la combinaison d'un combustible solide (plastique ou résine) et d'un oxydant (nitrates, perchlorates, etc.).
- le combustible solide et l'oxydant sont mélangés de manière homogène et emballés à l'intérieur de la coquille.
- un revêtement linéaire est prévu entre l'enveloppe et le propergol. Le but du revêtement est de protéger l'enveloppe en raison de la température élevée générée pendant le processus de combustion.

Fonctionnement :

- L'allumeur se trouve au sommet et allume l'étincelle pour que la combustion ait lieu.
- Lorsque la combustion a lieu dans la chambre de combustion, des gaz à très haute pression et à très haute température sont produits.
- Les produits hautement chauffés des gaz de combustion se dilatent ensuite dans la section de la buse.

- Dans la tuyère, l'énergie de pression du gaz est convertie en énergie cinétique, de sorte que les gaz sortent de l'appareil à très grande vitesse.

- En raison de la vitesse élevée des gaz sortant de l'unité, une force ou une poussée est produite dans la direction opposée. Cette poussée propulse la fusée.

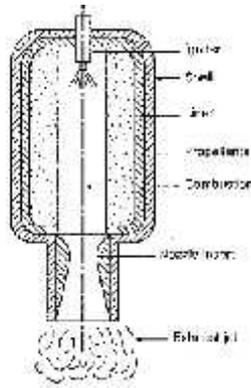


Figure 4 : Moteur fusée à propergol solide.

V.3 Principe de fonctionnement :

Le moteur fusée est le type de moteur au principe de fonctionnement le plus simple : deux ergols brûlent dans une chambre de combustion, sont accélérés par une tuyère de l'aval et sont injectés à grande vitesse par une tuyère.

Plusieurs caractéristiques s'appliquent aux moteurs fusées :

- L'impulsion spécifique, exprimée en seconde, mesure combien de secondes un kilogramme d'ergols fourni une poussée de un kilogramme-force, soit 9.80665 N, plus elle est élevée plus le rendement massique du système est meilleur ; cependant, c'est la quantité de mouvement transmises au engin qui importe, de sorte que l'optimum énergétique ne s'obtient pas en maximisant l'impulsion spécifique.
- Le débit massique, correspondant à la masse d'ergols consommé par unité de temps.
- La vitesse d'éjection des gaz, dont dépend indirectement la vitesse atteinte par l'engin.

$$C_e = \sqrt{\frac{T.R}{M} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad \dots\dots(V.1)$$

Où : C_e : vitesse de sortie du flux, (m/s)

T : température absolue du flux, (K)

M : masse moléculaire des ergols, (kg/kmole)

P_s : pression de sortie, (Pa)

P : pression interne du flux, (Pa)

$\gamma = c_p/c_v$: indice polytropique.

- Le rapport poids/poussée, qui représente le poids du moteur sur sa poussée. Plus le moteur est léger et plus sa poussée est importante, plus le rapport est avantageux.

V.4 Théorie de la propulsion des fusées :

V.4.1 Calcul de la poussée

La force qui propulse la fusée vers l'avant à une vitesse donnée est appelée poussée ou force propulsive. Cette poussée dépend principalement de la variation du flux de quantité de mouvement des gaz sortants et de la différence de pression entre la pression de sortie de la tuyère et la pression ambiante.

$$\begin{aligned} \text{poussée } F &= F_{d_j} + F_{dét} \quad \dots(V.2) \\ F_{d_j} &= \dot{m}_p \times C_e \\ F_p &= P_e A_e - P_a A_e \\ &= (P_e - P_a) A_e \end{aligned}$$

Où :

\dot{m}_p : Débit massique du gaz propulseur

A_e : Surface de sortie de la tuyère

P_e : Pression de sortie de la tuyère

P_a : Pression ambiante

C_e : Vitesse des gaz de sortie

En substituant les valeurs de F_{d_j} et F_p dans l'équation (V.2) :

$$F = \dot{m}_p \times C_e + (P_e - P_a) A_e \quad \dots(V.3)$$

Quand : $P_e = P_a$

→

$$F = \dot{m}_p \times C_e$$

Ou $F = \dot{m}_p \times C_j$

C_j : Vitesse effective du jet des gaz.

V.4.2 Poussée Spécifique

La poussée développée par unité de masse est appelée poussée spécifique :

$$F_s = \frac{F}{\dot{m}_p} \quad \text{.....(V.4)}$$

V.4.3 Impulsion Spécifique

La poussée développée par unité de poids du propergol est appelée impulsion spécifique :

$$I_s = \frac{F}{W_p} \quad \text{.....(V.5)}$$

$$= \frac{\dot{m}_p \times C_j}{\dot{m}_p \times g}$$

$$I_s = \frac{C_j}{g} \quad \text{.....(V.6)}$$

V.4.4 Consommation spécifique de propergol

Le taux de consommation de propergol par unité de poussée est appelé consommation spécifique de propergol.

$$SPC = \frac{w_p}{F} \left(\frac{k}{N} \right) = 3600 \cdot \frac{w_p}{F} \left(\frac{k}{N} \right) \quad \text{.....(V.7)}$$

$$= \frac{\dot{m}_p \times g}{F}$$

$$= \frac{\dot{m}_p \times g}{\dot{m}_p \times C_j}$$

$$SPC = \frac{g}{C_j} = \frac{1}{I_s} \quad \text{.....(V.8)}$$

V.4.5 Puissance de propulsion

C'est le travail effectué par la force F.

$$P_p = \dot{W} = n \times F \times u \quad \text{.....(V.9)}$$

Avec n le nombre de propulseur du moteur fusée, et u la vitesse du vol.

V.4.6 Puissance dynamique

C'est la puissance communiquée au fluide traversant le propulseur.

$$P_d = \Delta E_c = \frac{1}{2} (\dot{m}_p + \dot{m}_0) C_j^2 - \frac{1}{2} \dot{m}_0 u^2 \quad \text{.....(V.10)}$$

\dot{m}_0 : débit d'air, u: vitesse du vol, C_j : vitesse de sortie

V.4.7 Puissance thermique (calorifique)

C'est la puissance produite par la combustion d'un propergol de pouvoir calorifique inférieur P_c^i .

$$P_U = \dot{Q} = \dot{m}_p \times P_c^i \quad \text{.....(V.11)}$$

V.4.8 Coefficient massique d'écoulement du propergol (C_w)

Il s'agit du rapport entre la masse (poids) du propergol et la force de pression au col de la tuyère.

$$C_w = \frac{W_p}{F^*}$$

$$C_w = \frac{W_p}{P_0 \cdot A^*} \quad \text{.....(V.12)}$$

V.4.9 Coefficient de poussée (C_F)

C'est le rapport entre la poussée et la force de pression appliquée au col de la tuyère.

$$C_F = \frac{F}{F^*}$$

$$C_F = \frac{F}{P_0 \cdot A^*} \quad \text{.....(V.13)}$$

$$\rightarrow F = C_F \times P_0 \cdot A^*$$

de l'équation (V.9),

$$W_p = C_w \times P_0 \cdot A^*$$

Sachant que

$$\begin{aligned} \text{Impulsion spécifique, } I_S &= \frac{F}{W_p} \\ &= \frac{C_F \times P_0 \cdot A^*}{C_w \times P_0 \cdot A^*} \end{aligned}$$

$$\rightarrow I_S = \frac{C_F}{C_w} \quad \text{.....(V.14)}$$

de l'équation (V.8), on sait que

$$\begin{aligned} \text{SPC} &= \frac{1}{I_S} \\ &= \frac{1}{\frac{C_F}{C_w}} \end{aligned}$$

$$\text{SPC} = \frac{C_w}{C_F} \quad \text{.....(V.15)}$$

V.4.10 Rapport impulsion/poids (IWR)

Il s'agit de l'impulsion totale de la fusée par rapport au poids total de la fusée.

$$IWR = \frac{I_{ti}}{W_{ti}} \quad \text{.....(V.16)}$$

Où $I_{ti} = I_s \times W_p$

V.4.11 Vitesse caractéristique (C*)

Le rapport entre la vitesse effective du jet et le coefficient de poussée est appelé vitesse caractéristique.

$$C^* = \frac{\text{vitesse du jet effective}}{\text{coefficient de poussée}}$$

$$C^* = \frac{C_j}{C_F} \quad \text{.....(V.17)}$$

V.5 Pertes dans les moteurs fusées

L'utilisation de l'énergie et les différentes pertes qui se produisent dans un moteur-fusée sont illustrées à la figure 5.

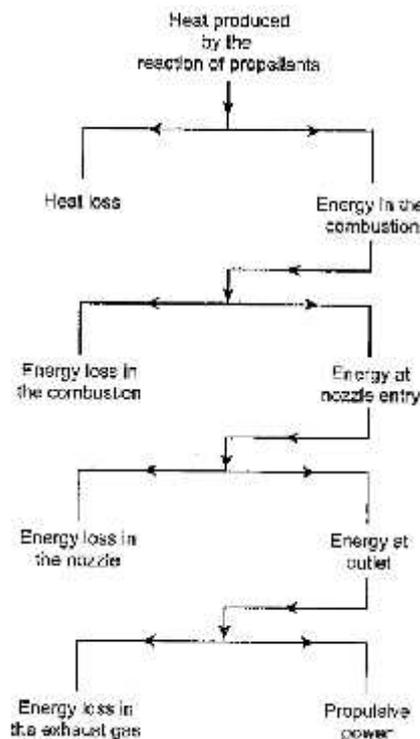


Figure 5 : Utilisation de l'énergie et les pertes dans les moteurs fusée.

V.6 Efficacité

V.6.1 Efficacité propulsive

Elle est définie comme le rapport entre la puissance propulsive (ou la puissance de poussée) et la puissance de sortie du propulseur.

$$\eta_p = \frac{\text{puissance propulsive (ou) puissance de poussée}}{\text{puissance de sortie du moteur}}$$

Sachant,

$$\text{puissance de poussée} = \text{poussée (F)} \times \text{vitesse de vol (u)}$$

$$\text{puissance de poussée} = \dot{m}_p \times C_j \times u \quad [\because F = \dot{m}_p \times C_j]$$

$$\text{puissance de sortie du moteur} = \frac{1}{2} \dot{m}_p (C_j^2 + u^2)$$

$$\rightarrow \eta_p = \frac{\dot{m}_p C_j \times u}{\frac{1}{2} \dot{m}_p (C_j^2 + u^2)}$$

$$\eta_p = \frac{2 C_j \times u}{(C_j^2 + u^2)} \quad \dots (V.18)$$

Diviser le numérateur et le dénominateur par C_j^2 .

$$\rightarrow \eta_p = \frac{\frac{2u}{C_j}}{1 + \frac{u^2}{C_j^2}}$$

$$\eta_p = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2} \quad \dots (V.19)$$

Où σ : rapport de vitesse effectif = $\frac{u}{C_j}$

V.6.2 Efficacité thermique

Elle est définie comme le rapport entre la puissance produite par le moteur et la puissance absorbée par le moteur grâce au carburant.

$$\eta_t = \frac{\text{puissance de sortie du moteur}}{\text{puissance absorbée dans le moteur par le biais du carburant}}$$

La puissance est donnée comme l'apport de la combustion du propergol.

Donc, la puissance absorbée = $\dot{m}_p \times C \cdot V$

Nous le savons,

$$\text{la puissance de sortie du moteur} = \frac{1}{2} \dot{m}_p (C_j^2 + u^2)$$

$$\rightarrow \eta_t = \frac{\frac{1}{2} \dot{m}_p (C_j^2 + u^2)}{\dot{m}_p \times C.V}$$

$$\eta_t = \frac{(C_j^2 + u^2)}{2 \times C.V} \quad \text{.....(V.20)}$$

où u: vitesse de fusée

C_j : Vitesse effective du jet (ou) Vitesse des gaz d'échappement

C.V: pouvoir calorifique du propergol

V.6.3 Efficacité globale

Elle est définie comme le rapport entre la puissance de propulsion et la puissance absorbée par le moteur.

$$\eta_o = \frac{\text{Puissance propulsive (ou) Puissance de poussée}}{\text{Puissance absorbée par le moteur}}$$

Nous le savons,

$$\text{Puissance de poussée} = \dot{m}_p \times C_j \times u$$

$$\text{Puissance absorbée} = \dot{m}_p \times C.V$$

$$\rightarrow \eta_o = \frac{\dot{m}_p \times C_j \times u}{\dot{m}_p \times C.V}$$

$$\rightarrow \eta_o = \frac{C_j \times u}{C.V} = \eta_p \times \eta_t \quad \text{.....(V.21)}$$