

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

## PROPULSION

# La propulsion par fusée

Technologie des fusées  
Du moteur à l'architecture

Pascal BAUER

Adam BRUCKNER

*Handwritten-style text in a cursive script, likely bleed-through from the reverse side of the page.*

ellipses

# CHAPITRE I

## ASPECTS FONDAMENTAUX DE LA PROPULSION ANAÉROBIE

### 1. Classification des propulseurs

Les systèmes propulsifs anaérobies sont caractérisés par une propulsion qui se déroule par réaction directe, c'est-à-dire par poussée des gaz éjectés à travers la tuyère. On classera dans cette catégorie le moteur fusée (à propergol solide, à combustible liquide, ou hybride), comme il est schématisé sur la Figure I.1.

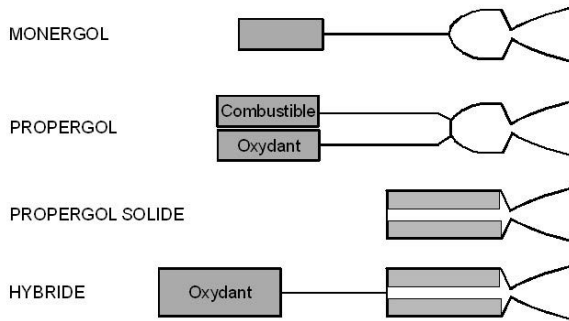


Figure I.1- Différentes formes de génération de propulsion

Typiquement les étages supérieurs des fusées sont propulsés par monergol ou propergols et les étages qui assurent la propulsion initiale depuis le pas de tir sont, quelquefois, des accélérateurs à poudre. Ces différentes configurations seront étudiées plus avant en détail.

### 2. Poussée d'un propulseur

#### 2.1 Bilan de quantité de mouvement

On considérera un système de masse  $m$  (Figure I.2), à l'instant  $t$ , qui, à l'instant  $t+\Delta t$ , éjecte un flux de gaz brûlés de masse  $\Delta m_{ej}$ . On adoptera

comme convention  $\Delta m_{ej} < 0$  (masse éjectée). Le système subit un accroissement  $\Delta V$  de sa vitesse durant l'intervalle  $\Delta t$  (très court qui correspond au temps de réaction chimique).

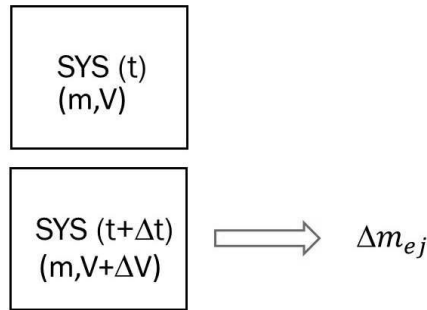


Figure I.2- Echange de masse et évolution de la vitesse dans un système anaérobie

On représentera un profil tel que celui de la Figure I.3 placé dans un environnement à la pression  $p_a$ . Il s'agit d'un ensemble constitué d'une chambre (dont on ne précisera ici ni la forme ni les dimensions) débouchant sur une tuyère ayant un col et un orifice d'éjection de sections respectives  $A_c$  et  $A_{ej}$ .

Dans ces conditions, la variation de la quantité de mouvement, notée  $QM$  s'écrit :

$$\Delta QM \Big|_t^{t+\Delta t} = \sum F \Delta t \quad \text{I.1}$$

avec :

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_e + \vec{F}_i + \vec{F}_{pes} \quad \text{I.2}$$

où  $\vec{F}_p, \vec{F}_e, \vec{F}_i, \vec{F}_{pes}$  désignent respectivement les forces de pression hydrostatique (agissant sur la sortie du système), externe, ou trainée (action du fluide sur le véhicule), interne (action du fluide sur les parois internes du propulseur), et de pesanteur (Figure I.3). On considèrera cette dernière comme négligeable lorsque le véhicule est en orbite ou à proximité<sup>1</sup>. Pour la simplicité des calculs, on se placera ici dans cette hypothèse.

<sup>1</sup> Cette hypothèse n'est pas valide lors de l'ascension de la fusée

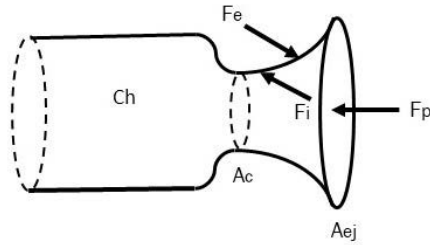


Figure 1.3- Schéma des forces s'exerçant sur un propulseur anaérobie

La variation de quantité de mouvement entre les instants  $t$  et  $t+\Delta t$  s'écrira :

$$\Delta QM \Big|_t^{t+\Delta t} = QM_{t+\Delta t} - QM_t = m(V + \Delta V) + \Delta m V_{ej} - mV \quad 1.3$$

Soit :

$$\frac{\Delta QM \Big|_t^{t+\Delta t}}{\Delta t} = m \frac{\Delta V}{\Delta t} + V_{ej} \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad 1.4$$

Ce qui, pour un intervalle de temps extrêmement court peut s'écrire :

$$\frac{dQM \Big|_t^{t+\Delta t}}{dt} = m \frac{dV}{dt} + V_{ej} \frac{dm}{dt} \quad 1.5$$

On peut ainsi identifier une accélération et un débit.

Le membre de droite représente donc les forces agissantes, telles qu'elles ont été définies dans la relation 1.2 ci-dessus. On aura donc:

$$\sum F = m \frac{dV}{dt} + V_{ej} \frac{dm}{dt} \quad 1.6$$

On désigne par force réactive ce deuxième terme :

$$F_R = V_{ej} \frac{dm}{dt} \quad 1.7$$

On exprimera la poussée  $F_i$  (*thrust*), résultante des forces internes :

$$F_i = m \frac{dV}{dt} + V_{ej} \frac{dm}{dt} - F_p - F_e \quad 1.8$$

## 2.2 Calcul de la poussée nette

On va maintenant formuler plus précisément la représentation physique des termes de cette dernière équation et, pour ce faire, il conviendra d'identifier l'action des forces en présence. Reprenant le schéma de la Figure I.3, on exprime la force hydrostatique qui s'exerce à l'éjection sur la section  $A_{ej}$  à la pression  $p_a$ . Tenant compte du sens d'application des forces, on écrit alors:

$$F_p = -(p_{ej} - p_a) A_{ej} \quad \text{I.9}$$

La poussée, décrite par l'équation I.8 s'écrira donc, plus précisément :

$$F_i = (p_{ej} - p_a) A_{ej} + V_{ej} \frac{dm_{ej}}{dt} + m \frac{dV}{dt} - F_e \quad \text{I.10}$$

On désignera par *poussée brute* la somme des deux premiers termes, caractéristiques de la poussée anaérobie, que l'on notera désormais  $F$  :

$$F = (p_{ej} - p_a) A_{ej} + \dot{m}_{ej} V_{ej} \quad \text{I.11}$$

Cette poussée peut donc se mettre sous la forme générale :

$$F = \dot{m}_{ej} V_{ej} + p_{ej} A_{ej} \left( 1 - \frac{p_a}{p_{ej}} \right) \quad \text{I.12}$$

On note donc que la poussée maximale est assurée pour  $p_{ej} = p_a$ . Si  $p_{ej} > p_a$  analytiquement, le deuxième terme se trouve augmenté, mais, en fait, la vitesse d'éjection sera plus faible de sorte que la poussée en sera diminuée. Dans les conditions optimales de fonctionnement, c'est-à-dire  $p_{ej} = p_a$  (qui correspond à une tuyère dite adaptée, point qui sera examiné ultérieurement, et en l'absence de forces annexes, on écrira :

$$F = \dot{m}_{ej} V_{ej} \quad \text{I.13}$$

Dans le cas d'un écoulement dans une tuyère conique ayant un demi-angle au sommet  $\alpha$  (Figure I.4), le flux est divergent et une ligne de courant d'angle  $\alpha$  avec l'horizontale aura donc une vitesse  $V_x = V_{ej} \cos \theta$ . La surface d'éjection, de forme sphérique, de rayon R, a une section  $A_{ej}$  et il y règne une pression  $p_{ej}$ . La vitesse  $y$  est notée  $V_{ej}$ . Ces valeurs sont supposées constantes. La tuyère est placée dans un environnement où règne une pression  $p_a$ .

Un élément de la section d'éjection a une surface :

$$dA_{ej} = 2\pi r \times R d\theta = 2\pi R \sin \theta \times R d\theta = 2\pi R^2 \sin \theta d\theta \quad \text{I.14}$$

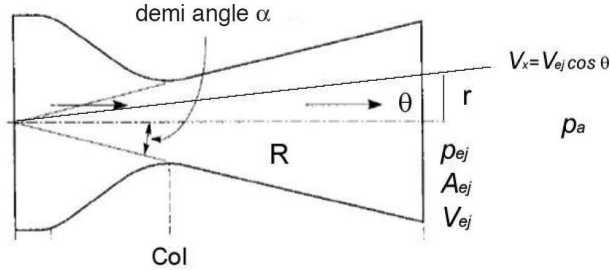


Figure I.4 - Schéma d'écoulement dans une tuyère conique

On détermine la surface totale de cette section sphérique en intégrant:

$$A_e = 2\pi R^2 (1 - \cos \alpha) \quad \text{I.15}$$

Le débit massique correspondant est :  $\dot{m}_{ej} = \rho_e V_{ej} (2\pi R^2 \sin \theta d\theta)$

On peut donc calculer la composante de poussée sur un élément de surface:

$$dF = \rho_e V_{ej} (2\pi R^2 \sin \theta d\theta) V_{ej} \cos \theta + (p_{ej} - p_a) (2\pi R^2 \sin \theta d\theta) \cos \theta \quad \text{I.16}$$

On peut alors intégrer cette expression de  $\theta = 0$  à  $\theta = \alpha$ :

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) [\dot{m}_{ej} V_{ej} + (p_{ej} - p_a) A_e] \\ &= \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) \dot{m}_{ej} V_{ej} + (p_{ej} - p_a) A_{ej} \end{aligned} \quad \text{I.17}$$

On désigne par :  $\lambda = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha)$  le facteur de correction dû à la conicité de la tuyère.

### 2.3 Evolution de la vitesse

On écrira la relation générale de la physique liant en tout point la force exercée par le fluide à son accélération ( $F = m dV/dt$ ) et, en supposant que la vitesse d'éjection est constante en valeur et en direction, reprenant la relation I.13, on pourra écrire, dans le cas d'une tuyère adaptée :

$$F = m \frac{dV}{dt} = V_{ej} \frac{dm}{dt} \quad \text{I.18}$$

Soit :

$$\int_{V_0}^V dV = V_{ej} \int_{m_0}^m \frac{dm}{m} \quad \text{I.19}$$

Où  $V_0, V, m_0, m$  désignent respectivement la vitesse initiale de la fusée, sa vitesse à un instant  $t$  quelconque, sa masse initiale et sa masse à l'instant  $t$ . On a donc un incrément de vitesse<sup>1</sup> :

$$\Delta V = V - V_0 = V_{ej} \ln \left( \frac{m}{m_0} \right) \quad \text{I.20}$$

Mais  $m < m_0$  car la fusée perd continuellement de la masse, par conséquent,  $\ln \left( \frac{m}{m_0} \right) < 0$ , ce qui signifie que  $\Delta V$  et  $V_{ej}$  sont colinéaires mais de direction opposée. En valeur absolue, la variation de vitesses s'écrit donc :

$$\Delta V = V_{ej} \ln \left( \frac{m_0}{m} \right) \quad \text{I.21}$$

On désigne par rapport de masse (ou *mass ratio*), le rapport  $m_0/m$ . En fin d'accélération, lorsque la totalité du propergol aura été consommée, la fusée aura donc une vitesse :

$$\Delta V_{\max} = V_{ej} \ln \left( \frac{m_0}{m_f} \right) \quad \text{I.22}$$

Où  $m_f$  est la masse finale ( $m_f = m_s + m_L$ ) où  $m_s, m_L$  sont respectivement les masses de la structure et celle de la charge, avec  $m_0 = m_s + m_L + m_p$ , où  $m_p$  est la masse de propergol.

En termes de vitesses, on définit également :

- La vitesse d'éjection effective (efficace), notée  $c$ , qui inclut le terme de pression. Il s'agit ici d'une forme globalisée de la résultante de la vitesse  $F / \dot{m}_p$  qui tient compte de la résultante des forces qui s'exercent sur le volume de contrôle :

$$F = \dot{m}_{ej} V_{ej} + (p_{ej} - p_a) A_{ej} = \dot{m}_{ej} c \quad \text{I.23}$$

---

<sup>1</sup> Il s'agit de l'équation de Constantin Édouardovitch Tsiolkovski (cf. AVANT-PROPOS)

$$\text{Soit : } c = V_{ej} + \frac{(p_{ej} - p_a)A_{ej}}{\dot{m}_{ej}} \quad 1.24$$

- La vitesse caractéristique, notée  $c^*$ , qui est une fonction du débit massique et de la température dans la chambre. Ce n'est autre que la force qui s'exerce au col de section  $A_c$ , rapportée au débit massique des produits de combustion :

$$c^* = \frac{p_{Ch}A_c}{\dot{m}_{ej}} \quad 1.25$$

### 3. Paramètres spécifiques à la propulsion par fusée

#### 3.1 Le paramètre impulsion

On définit dans un premier temps l'impulsion spécifique qui est une grandeur analogue à la consommation d'un véhicule terrestre :

$$I_{sp} = \frac{\text{Poussée}}{\text{Débit de propergol}} \quad 1.26$$

L'unité de ce paramètre est en général la seconde<sup>1</sup>. Dans ces conditions, il faut bien préciser que le débit de propergol est alors un débit poids et non un débit masse. La valeur du terme d'accélération de la pesanteur  $g$  est alors choisie au sol.

Si l'on se place dans le cas particulier où  $p_{ej}=p_a$  (impulsion spécifique optimale), on aura, alors, en unités SI :

$$I_{sp} = \frac{\dot{m}_{ej} V_{ej}}{\dot{m}_{ej} g_0} = \frac{V_{ej}}{g_0} \quad 1.27$$

Dans le cas général où  $p_{ej} \neq p_a$ , on aura recours à la vitesse effective et on écrira :

$$I_{sp} = \frac{c}{g_0} \quad 1.28$$

L'impulsion spécifique est alors égale à la vitesse. On peut également définir l'impulsion totale entre un temps initial  $t_0$  et un temps final  $t_b$  en supposant que la poussée reste constante ( $F(t) = C^{te}$ ) :

---

<sup>1</sup> Ce choix initial vient des unités de mesure anglo-saxonnes, mais est maintenant utilisé par l'ensemble des acteurs du secteur aérospatial en Europe ; toutefois, l'unité en m/s est également utilisée.



$$I_t = \int_{t_0}^{t_b} F(t) dt = Ft_b \quad 1.29$$

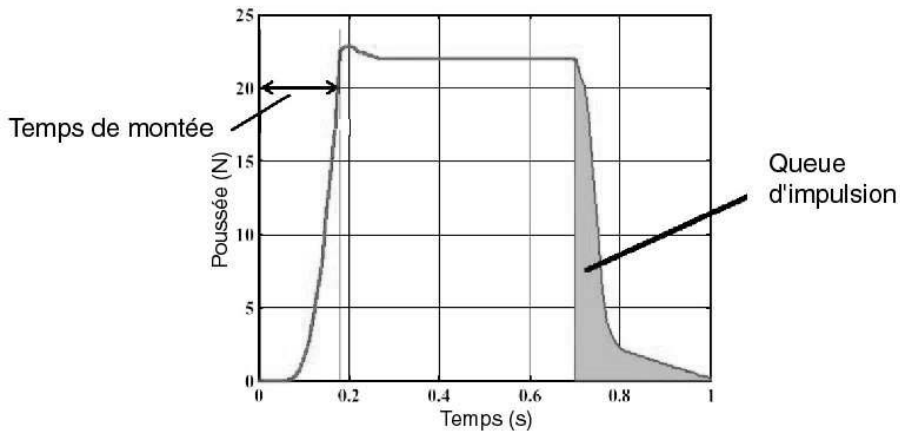
Ce qui correspond à :  $I_{sp} = \frac{F t_b}{m_p g_0}$  1.30

Enfin, on définit une densité d'impulsion spécifique :  $I_d = \rho I_{sp}$  qui correspond à une impulsion par unité de volume, dont l'unité est alors  $\frac{kg}{m^3} s$ .

En termes d'impulsion spécifique, on peut ajouter deux définitions complémentaires :

- Le temps de montée qui correspond au temps requis pour que la pression qui règne dans la chambre de combustion atteigne 90% de sa valeur nominale,
- La queue d'impulsion qui représente le reliquat d'impulsion lorsque la vanne d'injection est fermée. On peut, comme pour la phase de montée, définir le début de la perte en poussée dès lors que celle-ci a atteint 90% de sa valeur maximale.

Ces deux paramètres sont schématisés sur la Figure 1.5<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> On note que l'unité de l'axe vertical sur ce schéma est la poussée et non la pression. C'est une représentation possible, mais, en toute rigueur, durant la phase d'élévation de la pression dans la chambre, la tuyère n'est pas dans ses conditions de fonctionnement stationnaire, de sorte que la poussée n'est pas strictement proportionnelle à la pression.