

Calculer la poussée d'une fusée — et comprendre d'où vient la formule

Version PDF de travail - contenu du cours HTML canonique

Boussole du cours

Question directrice : Comment la matière éjectée et la pression à la sortie d'une tuyère deviennent-elles une force mesurable ?

Repères : MESURÉ CONVENTION CALCULÉ HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE DONNÉE DE MISSION DONNÉE CONSTRUCTEUR APPROXIMATION

Objectifs :

- reconstruire l'équation de poussée
- lire $\dot{m}$ et expliquer le point
- faire les conversions Pa/kPa et N/kN
- résoudre trois exemples et un calcul inverse
- expliquer pourquoi le débit n'est pas choisi au hasard

Réponse essentielle

Calculer la poussée d'une fusée — et comprendre d'où vient la formule. La question à résoudre est la suivante : Comment la matière éjectée et la pression à la sortie d'une tuyère deviennent-elles une force mesurable ? Repères : MESURÉ CONVENTION CALCULÉ HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE DONNÉE DE MISSION DONNÉE CONSTRUCTEUR APPROXIMATION Objectifs : reconstruire l'équation de poussée lire $\dot{m}$ et expliquer le point faire les conversions Pa/kPa et N/kN résoudre trois exemples et un calcul inverse expliquer pourquoi le débit n'est pas choisi au hasard ? Un moteur liquide stocke un carburant et un comburant, les amène dans une chambre, libère de l'énergie par combustion et accélère les gaz à travers une tuyère. L'objectif n'est pas de « fabriquer du feu » mais de créer un écoulement de masse très rapide vers l'arrière. La suite du cours montre comment passer de cette idée à un raisonnement contrôlable : unités explicites, hypothèses annoncées, calculs reproductibles, ordre de grandeur et limites d'interprétation. Le résultat n'est utile que si l'on peut expliquer ce qu'il mesure, d'où viennent les nombres et quelle décision d'ingénierie il éclaire.

Synthèse de départ : les démonstrations, exemples, limites et sources sont développés dans le corps du cours.

Mots clés avant de commencer

poussée · impulsion spécifique · débit massique · tuyère · turbopompe

1 — Avant la formule : que fait physiquement le moteur ?

Un moteur liquide stocke un carburant et un comburant, les amène dans une chambre, libère de l'énergie par combustion et accélère les gaz à travers une tuyère. L'objectif n'est pas de « fabriquer du feu » mais de créer un écoulement de masse très rapide vers l'arrière.

2 — Construire le premier morceau : débit × vitesse

Imaginons HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE 5 kilogrammes de gaz chaque seconde, sortant à HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE 2 500 mètres par seconde. Avant le symbole, le raisonnement est : $5 \text{ kg/s} \times 2\,500 \text{ m/s} = 12\,500 \text{ N}$.

La quantité « kilogrammes chaque seconde » s'appelle le débit massique et s'écrit $\dot{m}$, lu « m point ». Le point signifie ici une variation par unité de temps.

3 — Pourquoi ajouter un terme de pression ?

Le gaz à la sortie de la tuyère possède une pression p_e . L'environnement extérieur possède une pression p_0 . Une pression est une force par surface ; pour retrouver une force totale, on multiplie la différence de pression par l'aire de sortie A_e .

NASA Glenn présente cette relation pour la poussée d'une fusée. Le premier terme vient du jet ; le second corrige l'effet de la différence de pression sur la surface de sortie.

4 — Exemple A : nombres faciles dans le vide

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE $\dot{m} = 5 \text{ kg/s}$; $V_e = 2\,500 \text{ m/s}$; $A_e = 0,40 \text{ m}^2$; $p_e = 20 \text{ kPa}$; $p_0 = 0 \text{ Pa}$.

Le résultat raconte son origine : 12 500 N viennent du transport de quantité de mouvement ; 8 000 N du terme de pression.

5 — Exemple B : même idée au niveau de la mer

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE Prenons $p_e = 100\,000 \text{ Pa}$ et $p_0 = 101\,300 \text{ Pa}$. Le terme de pression vaut $0,40 \times (100\,000 - 101\,300) = -520 \text{ N}$. Le signe négatif signifie que, dans cet exemple, la pression extérieure retire légèrement de la poussée. Avec le terme de jet de 12 500 N : $F = 11\,980 \text{ N}$.

6 — Exemple C : environnement martien pédagogique

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE $\dot{m} = 6 \text{ kg/s}$; $V_e = 3\,000 \text{ m/s}$; $A_e = 0,50 \text{ m}^2$; $p_e = 10\,000 \text{ Pa}$; $p_0 = 600 \text{ Pa}$.

Ce n'est pas une fiche de performances d'un moteur réel. C'est un cas construit pour voir immédiatement que l'environnement extérieur apparaît dans l'équation.

7 — Calcul inverse : quelle masse par seconde pour une poussée donnée ?

Pour un premier ordre de grandeur, on utilise aussi $F = \dot{m} I_{sp} g_0$. HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE Prenons $F = 2\,000\,000 \text{ N}$, $I_{sp} = 330 \text{ s}$ et $g_0 = 9,81 \text{ m/s}^2$.

8 — Alors, qui « ordonne » 5 kg/s plutôt que 3 ou 10 ?

Le calculateur moteur reçoit une consigne de fonctionnement. Il agit sur des vannes et sur le régime des turbopompes ; ces actions modifient les pressions et donc les débits vers les injecteurs. Des capteurs mesurent pression, température, vitesse de rotation et autres paramètres ; le calculateur corrige la commande.

Le débit final est donc la conséquence d'une architecture physique et d'une boucle de contrôle. Dans une tuyère, le débit maximal est aussi relié au col et à l'écoulement étranglé ; NASA Glenn montre que lorsque le col atteint Mach 1, la géométrie et les conditions thermodynamiques imposent fortement le débit.

9 — Ce que cette équation ne suffit pas à prédire

Une vraie conception moteur demande combustion, thermodynamique, mélange, stabilité, refroidissement, pertes, transitoires, propriétés des gaz et géométrie. L'équation de poussée ne vous dit pas à elle seule si un injecteur est stable ni si une chambre va survivre.

Le niveau ingénieur consiste justement à savoir quand un modèle simple est suffisant et quand il faut passer à un modèle plus riche ou à un essai.

Exercices et corrigés

Exercice A — jet seul

$\dot{m} = 8 \text{ kg/s}$ et $V_e = 2\,000 \text{ m/s}$. Ignorez le terme de pression.

Exercice B — pression

$A_e = 0,25 \text{ m}^2$; $p_e = 12\,000 \text{ Pa}$.

Défi — retrouver le débit

$F = 100\,000\text{ N}$, $I_{sp} = 250\text{ s}$, $g_0 = 9,81\text{ m/s}^2$.

Sources primaires et techniques

- NASA Glenn — Rocket Thrust Equation
- NASA Glenn — Mass Flow Rate Equations
- NASA Glenn — Liquid Rocket Engine

Cours pédagogique Delta-Sierra — ne constitue ni une qualification professionnelle ni une procédure opérationnelle de vol.