

Tuyère : transformer pression et chaleur en vitesse

Version PDF de travail - contenu du cours HTML canonique

Boussole du cours

Question directrice : Pourquoi une tuyère converge-t-elle puis diverge-t-elle au lieu d'être un simple tube ?

Réponse essentielle

Tuyère : transformer pression et chaleur en vitesse. La question à résoudre est la suivante : Pourquoi une tuyère converge-t-elle puis diverge-t-elle au lieu d'être un simple tube ? Nous partons du problème concret avant la notation. Le but est de comprendre ce que l'on cherche, puis seulement pourquoi les mathématiques deviennent utiles. 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 · tuyère · unité · ordre de grandeur · hypothèse

1 — La question physique

Pourquoi une tuyère converge-t-elle puis diverge-t-elle au lieu d'être un simple tube ?

Nous partons du problème concret avant la notation. Le but est de comprendre ce que l'on cherche, puis seulement pourquoi les mathématiques deviennent utiles.

2 — Comment lire les symboles et les unités

$F = \dot{m} \times V_e + (p_e - p_a) \times A_e$. Lecture : « F égale m point fois V e, plus p e moins p a, fois A e ».

V_e — vitesse de sortie ; p_e — pression à la sortie ; p_a — pression ambiante ; A_e — aire de sortie

3 — D'où vient la relation ?

La tuyère accélère l'échappement. La poussée combine le flux de quantité de mouvement $\dot{m}V_e$ et une contribution de pression à la sortie. Une tuyère convergente-divergente permet au gaz étranglé au col de continuer son expansion dans la partie divergente.

Chaque nombre utilisé plus bas est explicitement classé comme donnée, convention, hypothèse pédagogique ou résultat calculé.

4 — A — Terme de vitesse

D'où viennent les nombres ? $\dot{m}=5 \text{ kg/s}$, $V_e=2\,000 \text{ m/s}$, pression équilibrée.

Calcul pas à pas : $F=5 \times 2000 = 10\,000 \text{ N}$.

Le terme de pression vaut alors environ zéro.

5 — B — Terme de pression

D'où viennent les nombres ? $p_e p_a = 20\,000 \text{ Pa}$, $A_e = 0,25 \text{ m}^2$.

Calcul pas à pas : $F_p = 20\,000 \times 0,25 = 5\,000 \text{ N}$.

La différence de pression ajoute de la poussée.

6 — C — Ambiance différente

D'où viennent les nombres ? Même p_e , mais p_a diminue en altitude.

Calcul pas à pas : Le terme $(p_e p_a)$ augmente tant que les autres grandeurs restent identiques.

C'est une raison pour laquelle une tuyère a un point de fonctionnement optimal.

7 — Sensibilité, calcul inverse et contrôle du résultat

Changez une seule entrée, prévoyez le sens du résultat, calculez, puis contrôlez unités, signe, ordre de grandeur et limites.

Limite essentielle pour Tuyère : transformer pression et chaleur en vitesse : la relation affichée est un modèle d'apprentissage. Un système réel ajoute géométrie détaillée, propriétés variables, capteurs, incertitudes, transitoires et essais.

8 — Pourquoi cela compte en mission

Dans une mission spatiale, pourquoi une tuyère converge-t-elle puis diverge-t-elle au lieu d'être un simple tube ? La compétence utile n'est pas de réciter la formule, mais de savoir quelles données sont nécessaires, lesquelles sont mesurées et à quel moment le modèle devient insuffisant.

10 — Approfondir : du calcul à la compréhension physique

Une tuyère convertit une forme d'énergie en une autre

Les gaz dans la chambre possèdent une pression et une température élevées. La tuyère fournit une géométrie dans laquelle une partie de cette énergie interne et de pression peut devenir énergie cinétique du jet. Dire « la tuyère accélère les gaz » est donc correct mais incomplet : il faut comprendre que cette vitesse de sortie provient d'une détente du gaz.

Pourquoi la partie divergente peut accélérer un écoulement supersonique

Notre intuition issue des liquides lents peut tromper. Pour un écoulement compressible supersonique, une section divergente peut continuer à augmenter la vitesse alors que la pression et la température statiques diminuent. Ce comportement dépend du régime de Mach ; c'est précisément pourquoi il faut apprendre d'abord le col et l'étranglement avant de parler de la forme de la partie divergente.

La pression de sortie doit être comparée à la pression ambiante

Le terme $(p_e - p_a)A_e$ de l'équation de poussée rappelle que le moteur ne travaille pas dans le même environnement au sol et dans le vide. Si p_e diffère de p_a , il existe une contribution de pression à la poussée et l'expansion n'est pas parfaitement adaptée. Cette idée explique pourquoi une géométrie optimisée pour le niveau de la mer n'est pas nécessairement optimale dans le vide.

Une grande tuyère n'est pas automatiquement une meilleure tuyère

Augmenter l'expansion peut améliorer certaines performances dans le vide, mais impose aussi masse, longueur, structure, refroidissement et contraintes d'intégration. Au sol, une expansion excessive peut conduire à des comportements d'écoulement défavorables. La conception réelle est donc un compromis de mission, pas la recherche du plus grand cône possible.

9 — Exercices et corrigés

Défi 1

$\dot{m}=5$ kg/s, $V_e=2\,000$ m/s, pression équilibrée.

Défi 2

$p_e p_a=20\,000$ Pa, $A_e=0,25$ m².

Défi 3

Même p_e , mais p_a diminue en altitude.

Sources primaires et techniques

- NASA Glenn — Nozzle Design
- NASA Glenn — Rocket Thrust Equation