

Col de tuyère : pourquoi le débit devient étranglé

Version PDF de travail - contenu du cours HTML canonique

Boussole du cours

Question directrice : Pourquoi le plus petit passage de la tuyère peut-il fixer le débit de tout le moteur ?

Réponse essentielle

Col de tuyère : pourquoi le débit devient étranglé. La question à résoudre est la suivante : Pourquoi le plus petit passage de la tuyère peut-il fixer le débit de tout le moteur ? 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

débit massique · tuyère · unité · ordre de grandeur · hypothèse

1 — La question physique

Pourquoi le plus petit passage de la tuyère peut-il fixer le débit de tout le moteur ?

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

$\dot{m} = \rho \times V \times A$. Lecture : « m point égale rho fois V fois A ».

$\dot{m}$ — débit massique, kilogrammes par seconde ; ρ — rho : masse volumique ; V — vitesse locale du fluide ; A — aire de passage ; M — nombre de Mach ; $M=1$ au col étranglé

3 — D'où vient la relation ?

La conservation de la masse impose qu'en régime stationnaire le même débit massique traverse chaque section. Dans un écoulement compressible, le col est choisi pour atteindre Mach 1 ; au-delà, augmenter la baisse de pression aval ne fait plus croître le débit de la même manière : le débit est dit étranglé.

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

4 — A — Débit incompressible mental

D'où viennent les nombres ? $\rho=4 \text{ kg/m}^3$, $V=50 \text{ m/s}$, $A=0,01 \text{ m}^2$.

Calcul pas à pas : $\dot{m}=4 \times 50 \times 0,01=2 \text{ kg/s}$.

Ce premier calcul apprend les unités ; un gaz de fusée réel est compressible.

5 — B — Aire doublée

D'où viennent les nombres ? Même ρ et V , $A=0,02 \text{ m}^2$.

Calcul pas à pas : $\dot{m}=4 \times 50 \times 0,02=4 \text{ kg/s}$.

Dans ce modèle simple, doubler l'aire double le débit.

6 — C — Pourquoi Mach 1 change le problème

D'où viennent les nombres ? Au col, $M=1$. La vitesse locale égale la vitesse du son locale.

Calcul pas à pas : Le calcul complet utilise pression totale, température, γ , R et A^* .

Le cours avancé remplace le modèle pVA par l'équation de débit étranglé NASA.

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 Col de tuyère : pourquoi le débit devient étranglé : 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 le plus petit passage de la tuyère peut-il fixer le débit de tout le moteur ? 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

Le col n'est pas seulement la partie la plus étroite

Dans une tuyère convergente-divergente, le col est la section minimale et joue un rôle dynamique : lorsque les conditions amont et aval le permettent, l'écoulement y atteint Mach 1. Le débit devient alors « étranglé ». Cela ne signifie pas que le gaz s'arrête ; cela signifie qu'une diminution supplémentaire de la pression aval ne peut plus augmenter le débit massique de la même manière simple.

Pourquoi Mach 1 change le problème

Une perturbation de pression se propage dans un gaz à une vitesse liée à la vitesse du son. Lorsque l'écoulement atteint cette vitesse au col, l'information venant de l'aval ne remonte plus librement vers l'amont à travers le col. Cette idée explique qualitativement pourquoi le débit est alors principalement fixé par l'état amont, la géométrie du col et les propriétés thermodynamiques du gaz.

La formule $\dot{m}=\rho VA$ est une porte d'entrée, pas le modèle complet

Multiplier densité ρ , vitesse V et aire A donne bien un débit massique lorsque les valeurs sont cohérentes localement. Mais dans une tuyère compressible, ρ et V changent ensemble le long du conduit. On ne peut donc pas prendre arbitrairement une densité de réservoir et une vitesse de sortie pour les multiplier par l'aire du col. Le cours complet de débit étranglé ajoute la thermodynamique des gaz compressibles.

Question d'ingénierie : que change un col plus grand ?

Toutes choses égales par ailleurs dans un modèle de premier ordre, augmenter l'aire de col augmente la capacité de débit. Mais cela modifie aussi la relation avec la chambre et la tuyère ; un moteur réel doit retrouver un équilibre entre génération des gaz, pression de chambre, débit, expansion et stabilité. C'est pourquoi ce cours enseigne la dépendance sans fournir une recette géométrique de fabrication.

9 — Exercices et corrigés

Défi 1

$\rho=4 \text{ kg/m}^3$, $V=50 \text{ m/s}$, $A=0,01 \text{ m}^2$.

Défi 2

Même ρ et V , $A=0,02 \text{ m}^2$.

Défi 3

Au col, $M=1$. La vitesse locale égale la vitesse du son locale.

Sources primaires et techniques

- NASA Glenn — Nozzle Design
- NASA Glenn — Mass Flow Rate Equations
- NASA Glenn — Rocket Thrust Equation