

# Throttling : réduire la poussée sans éteindre le moteur

Version PDF de travail - contenu du cours HTML canonique

## Boussole du cours

Question directrice : Que signifie vraiment « moteur à 70 % » ?

## Réponse essentielle

Throttling : réduire la poussée sans éteindre le moteur. La question à résoudre est la suivante : Que signifie vraiment « moteur à 70 % » ? 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 · unité · ordre de grandeur · hypothèse · approximation

## 1 — La question physique

Que signifie vraiment « moteur à 70 % » ?

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

$F_{\text{cible}} = \alpha \times F_{\text{max}}$ . Lecture : « F cible égale alpha fois F max ».

$\alpha$  — alpha : fraction de commande entre 0 et 1 ;  $F_{\text{max}}$  — poussée maximale de référence ;  $F_{\text{cible}}$  — poussée demandée

## 3 — D'où vient la relation ?

Pour une première intuition,  $\alpha$  représente une fraction de la poussée maximale : 1,00 signifie 100 %, 0,70 signifie 70 %. Un vrai moteur ne suit pas forcément une proportion parfaite entre débit, pression et poussée ; la relation sert ici de modèle pédagogique.

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

## 4 — A — 70 %

D'où viennent les nombres ?  $F_{\text{max}}=1\,000\text{ kN}$ ,  $\alpha=0,70$ .

Calcul pas à pas :  $F_{\text{cible}}=0,70 \times 1000=700\text{ kN}$ .

Le pourcentage est transformé en fraction avant multiplication.

## 5 — B — 40 %

D'où viennent les nombres ?  $F_{\text{max}}=1\,000\text{ kN}$ ,  $\alpha=0,40$ .

Calcul pas à pas :  $F_{\text{cible}}=400\text{ kN}$ .

Un moteur réel peut avoir une limite minimale stable supérieure à cette valeur.

## 6 — C — Retrouver $\alpha$

D'où viennent les nombres ?  $F_{cible}=825$  kN,  $F_{max}=1\ 100$  kN.

Calcul pas à pas :  $\alpha=825\div1\ 100=0,75=75\ \%$ .

Calcul inverse : on retrouve la commande relative à partir de la poussée demandée.

## 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 Throttling : réduire la poussée sans éteindre le moteur : 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, que signifie vraiment « moteur à 70 % » ? 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

### Moduler la poussée ne signifie pas simplement fermer une vanne de moitié

Le modèle  $F_{cible}=\alpha F_{max}$  est utile pour comprendre une consigne :  $\alpha=0,7$  demande 70 % de la poussée maximale dans cette approximation. Mais une vraie architecture moteur doit obtenir simultanément des débits, pressions, rapports de mélange, vitesses de turbomachines et marges stables. La relation entre position de vanne et poussée n'est donc pas forcément linéaire.

### Pourquoi descendre trop bas peut devenir difficile

À faible régime, des phénomènes qui étaient confortablement dans leur domaine nominal peuvent changer : stabilité de combustion, comportement des turbomachines, atomisation, refroidissement ou capacité des actionneurs à rester précis. Un moteur possède donc une plage de modulation qualifiée, et non une promesse abstraite de fonctionner entre 0 et 100 % dans toutes les conditions.

### La boucle de commande cherche un état, pas seulement un nombre

Le contrôleur compare la poussée ou des grandeurs corrélées à la consigne et agit sur plusieurs organes. Il doit en même temps surveiller les limites. Une demande de poussée plus élevée peut être refusée ou limitée si une pression, une température ou une vitesse de rotation approche un seuil. C'est le principe d'une commande avec contraintes.

### Pourquoi la modulation est utile en mission

Pouvoir changer la poussée permet d'adapter accélération, charges, trajectoire ou phase d'atterrissage. Mais toute mission doit connaître la réponse dynamique : combien de temps faut-il pour passer d'un régime à un autre et avec quel dépassement éventuel ? Une commande instantanée sur l'écran n'implique jamais une réponse instantanée de la machine.

## 9 — Exercices et corrigés

### Défi 1

$F_{max}=1\ 000$  kN,  $\alpha=0,70$ .

### Défi 2

$F_{\max}=1\,000\text{ kN}$ ,  $\alpha=0,40$ .

### Défi 3

$F_{\text{cible}}=825\text{ kN}$ ,  $F_{\max}=1\,100\text{ kN}$ .

## Sources primaires et techniques

- NASA Glenn — Rocket Thrust Equation
- NASA NTRS — Deep Throttling / CECE