

ANTI-SÈCHE — Propulsion CQPM 082

Fiche de révision complète

Sommaire : 1. Généralités 2. Formule de la poussée + exemples 3. Taux de dilution (λ) 4. Conversions d'unités 5. Flux d'air / Convergent-Divergent / Bernoulli 6. Structure du GTR 7. Entrée d'air 8. Le compresseur 9. Chambre de combustion

1 — Généralités

Les 4 forces en vol

Portance (vers le haut) — Poids (vers le bas) — Poussée (vers l'avant) — Traînée (vers l'arrière), toutes appliquées autour du centre de gravité.

3e loi de Newton — Principe d'action-réaction

« L'action est toujours égale à la réaction, c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens contraires. »

Exemple ballon de baudruche : l'air éjecté vers l'arrière (ACTION) génère une réaction qui propulse le ballon vers l'avant (RÉACTION).

Application moteur : ACTION = force de poussée du moteur (gaz éjectés vers l'arrière) → RÉACTION = accélération de l'avion dans le sens opposé, proportionnelle à la poussée.

	Air / Gaz expulsé	Résultat	Poussée
Ballon de baudruche	Air expulsé par l'arrière	Le ballon avance	Faible et lente
Turboréacteur	Gaz brûlés expulsés par la tuyère	L'avion est propulsé	Importante et continue

La turbine à gaz pour l'aviation

Le pétrole = énergie potentielle → transformation en énergie mécanique (utilisation indirecte : turbopropulseur, entraîne une hélice) ou en énergie cinétique (utilisation directe : turboréacteur, gaz éjectés à grande vitesse).

Les turboréacteurs — 2 familles

- GTR simple corps simple flux (1ère génération) — Tout l'air traverse le cœur du moteur. Bruyant, consommation spécifique élevée, forte pollution.
- GTR double corps double flux (turbofan) — Une partie de l'air (flux secondaire) contourne le cœur. Masse d'air accélérée moins vite mais en bien plus grande quantité → idéal pour l'aviation civile (économique, moins bruyant).

Architecture double flux : arbre BP (low pressure shaft — relie soufflante/fan + booster + turbine BP) et arbre HP (high pressure shaft — relie compresseur HP + turbine HP).

2 — Formule de la poussée (à connaître par cœur)

$F = QA1 \times (VS1 - VE) + QA2 \times (VS2 - VE) + QC \times VS$

Symbole	Signification
F	Poussée, en Newton (N)
QA1	Débit d'air du flux primaire (cœur moteur), en kg/s
QA2	Débit d'air du flux secondaire (fan / soufflante), en kg/s
QC	Débit massique de carburant, en kg/s
VE	Vitesse de l'air à l'entrée (= vitesse avion), en m/s
VS1	Vitesse de sortie du flux primaire, en m/s

Symbole	Signification
VS2	Vitesse de sortie du flux secondaire, en m/s
VS	Vitesse de sortie du gaz carburant injecté (= VS1 en général), en m/s

Astuce : pour un moteur simple flux (sans soufflante), $QA2 = 0 \rightarrow F = QA1(VS1 - VE) + QC(VS)$.

Exemple 1 — Turboréacteur simple flux, avion à l'arrêt

Données : $QA1 = 50 \text{ kg/s}$; $VE = 0 \text{ m/s}$; $VS1 = 500 \text{ m/s}$; $QC = 1 \text{ kg/s}$; $VS = 500 \text{ m/s}$.

$$F = 50 \times (500 - 0) + 1 \times 500 = 25\,000 + 500 = 25\,500 \text{ N} \approx 25,5 \text{ kN}$$

Exemple 2 — Turbofan en vol de croisière

Données : $QA1 = 20 \text{ kg/s}$; $VS1 = 450 \text{ m/s}$; $QA2 = 200 \text{ kg/s}$; $VS2 = 300 \text{ m/s}$; $VE = 100 \text{ m/s}$; $QC = 0,8 \text{ kg/s}$; $VS = 450 \text{ m/s}$.

$$F = 20 \times (450 - 100) + 200 \times (300 - 100) + 0,8 \times 450 = 7\,000 + 40\,000 + 360 = 47\,360 \text{ N} \approx 47,4 \text{ kN}$$

→ Le flux secondaire fournit ici la plus grande partie de la poussée : c'est le principe même du turbofan à fort taux de dilution.

Exemple 3 — Retrouver une vitesse de sortie inconnue

Données : $F = 30\,000 \text{ N}$; $QA1 = 40 \text{ kg/s}$; $VE = 50 \text{ m/s}$; QC négligé. On cherche $VS1$.

$$VS1 = (F/QA1) + VE = (30\,000/40) + 50 = 750 + 50 = 800 \text{ m/s}$$

Exemple 4 — Retrouver $QA1$ à partir du taux de dilution λ

Données : taux de dilution $\lambda = 8$; $QA2 = 90 \text{ kg/s}$; $QC = 8 \text{ kg/s}$; $VE = 900 \text{ km/h}$; $VS1 = 300 \text{ m/s}$; $VS2 = 400 \text{ m/s}$.

- 1) VE en m/s : $900 / 3,6 = 250 \text{ m/s}$
- 2) $\lambda = QA2 / QA1 \rightarrow QA1 = QA2 / \lambda = 90 / 8 = 11,25 \text{ kg/s}$
- 3) $F = 11,25 \times (300 - 250) + 90 \times (400 - 250) + 8 \times 300 = 562,5 + 13\,500 + 2\,400 = 16\,462,5 \text{ N} \approx 16,46 \text{ kN}$

Retenir : $\lambda = QA2/QA1$ est un simple rapport. Si $QA2$ est connu $\rightarrow QA1 = QA2 / \lambda$. Si $QA1$ est connu $\rightarrow QA2 = \lambda \times QA1$. Ne jamais confondre les deux sens du calcul !

3 — Taux de dilution (λ) et relations $QA1 / QA2$

Taux de dilution $\lambda = QA2 / QA1$ (débit secondaire / débit primaire).

À ne pas confondre : $\lambda = \text{taux de dilution} / \rho$ (rho) = masse volumique de l'air (kg/m^3). Deux symboles différents pour deux grandeurs différentes.

Moteur	Taux de dilution λ
M88 (militaire, Rafale)	0,30 : 1
CFM56	5 : 1
LEAP 1A	11 : 1
LEAP 1B	9 : 1
PW 1500	12 : 1

→ Plus le taux de dilution est élevé, plus le moteur est économique et silencieux (réacteurs civils modernes). Les moteurs militaires (M88) ont un taux faible car ils privilégient la poussée pure sur la vitesse pour la performance.

Retrouver $QA1$ ou $QA2$ — tous les cas possibles

Donné dans l'énoncé	Formule à utiliser
λ et $QA1$	$QA2 = \lambda \times QA1$
λ et $QA2$	$QA1 = QA2 / \lambda$
λ et débit total $Qt = QA1 + QA2$	$QA1 = Qt / (1 + \lambda)$ puis $QA2 = Qt - QA1$

Donné dans l'énoncé	Formule à utiliser
QA1 et QA2 connus, on veut λ	$\lambda = QA2 / QA1$

Moyen mnémotechnique : $\lambda = QA2/QA1 \rightarrow QA2$ est TOUJOURS le plus gros débit (numérateur) car le flux secondaire (fan) est plus important que le flux primaire (cœur). Si ton résultat donne QA1 supérieur à QA2 alors que λ est supérieur à 1, tu as inversé la formule.

4 — Conversions d'unités indispensables

La formule de la poussée exige TOUJOURS des débits en kg/s et des vitesses en m/s. Convertis systématiquement AVANT de calculer.

Grandeur	Conversion	Exemple
Vitesse : km/h $\rightarrow$ m/s	diviser par 3,6	900 km/h / 3,6 = 250 m/s
Vitesse : m/s $\rightarrow$ km/h	multiplier par 3,6	250 m/s $\times$ 3,6 = 900 km/h
Vitesse : nœuds (kt) $\rightarrow$ m/s	multiplier par 0,514	500 kt $\times$ 0,514 $\approx$ 257 m/s
Vitesse : Mach $\rightarrow$ m/s	multiplier par $\approx$ 340 (niveau mer)	Mach 0,8 $\times$ 340 $\approx$ 272 m/s
Débit : t/h $\rightarrow$ kg/s	$\times$ 1000 puis /3600	18 t/h $\rightarrow$ 18000/3600 = 5 kg/s
Débit : kg/h $\rightarrow$ kg/s	diviser par 3600	3600 kg/h / 3600 = 1 kg/s
Débit : kg/min $\rightarrow$ kg/s	diviser par 60	60 kg/min / 60 = 1 kg/s
Masse : tonnes $\rightarrow$ kg	multiplier par 1000	2,4 t = 2400 kg
Pression : bar $\rightarrow$ Pa	multiplier par 100 000	1 bar = 100 000 Pa
Pression : psi $\rightarrow$ bar	diviser par 14,5	500 psi / 14,5 $\approx$ 34,5 bar
Dosage $\rightarrow$ QC	QC = QA1 $\times$ dosage	QA1=50, dosage 1/50 $\rightarrow$ QC=1 kg/s
Force : kN $\rightarrow$ N	multiplier par 1000	25,5 kN = 25 500 N

Piège fréquent : si l'énoncé mélange les unités, il faut TOUT convertir dans la même unité (m/s) avant de soustraire.

5 — Évolution du flux d'air + Convergent / Divergent / Bernoulli

Zone	Température / Pression / Vitesse
Admission	T $\approx$ -54°C ; P $\approx$ 5 psi ; vitesse relativement stable
Compression	T et P augmentent : T $\approx$ 500-600°C, P $\approx$ 500 psi en sortie compresseur
Combustion	Pic T $\approx$ 1400°C (flamme locale jusqu'à $\approx$ 2200°C) ; la vitesse chute puis la pression reste quasi stable
Détente (turbine)	T et P diminuent en cédant leur énergie aux turbines BP/HP ; la vitesse augmente vers la tuyère

Convergent / Divergent

Profil	Section	Vitesse	Pression
Convergent (A $\rightarrow$ B)	Diminue	AUGMENTE	DIMINUE
Divergent (B $\rightarrow$ C)	Augmente	DIMINUE	AUGMENTE

Loi de Bernoulli

$$p \times S \times V = \text{constante}$$

Le long d'une ligne de courant, la somme pression + énergie cinétique du fluide reste constante : ~~$P + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{constante}$~~ . C'est ce principe qui explique pourquoi, dans un profil convergent/divergent, quand la vitesse augmente la pression diminue, et inversement.

Application : le stator du compresseur a un profil divergent → il transforme la vitesse (communiquée par le rotor) en pression. L'entrée d'air d'un turboréacteur civil a également un profil divergent à géométrie fixe, adapté au régime et à l'altitude de croisière.

6 — Structure du GTR (Générateur de Turbine à gaz Réacteur)

- FAN MODULE — Fan + booster, paliers n°1/n°2, carter de soufflante (fan case), fan frame, boîtier d'entraînement (IGB).
- CORE MODULE (cœur moteur) — Compresseur HP (rotor + stator), chambre de combustion, turbine HP (tuyères + rotor), turbine center frame.
- LOW PRESSURE TURBINE MODULE — Arbre BP, rotor + stator turbine BP, carter d'échappement (turbine rear frame).

Cette architecture modulaire permet une maintenance plus efficace et optimise le temps d'immobilisation moteur (TAT — Turn Around Time).

7 — Entrée d'air

Rôle :

- Alimenter le compresseur
- Fournir une pression du flux adaptée
- Éviter les turbulences (écoulement le plus laminaire possible)

Profil : divergent, à géométrie fixe sur les réacteurs civils modernes — adapté au régime et à l'altitude de vol de croisière. Certains avions militaires utilisent des entrées d'air à géométrie variable pour s'adapter aux vitesses supersoniques.

8 — Le compresseur

4 fonctions du compresseur :

- Il assure l'alimentation continue de l'air vers la chambre de combustion
- Il élève la pression statique de l'air avant la chambre de combustion
- Il établit le débit d'air qui traverse le réacteur (QA1)
- Il assure l'alimentation pneumatique de bord (ATA 36)

Deux types de compresseur

Compresseur AXIAL	Compresseur CENTRIFUGE
L'air progresse parallèlement à l'axe du moteur. Rendement élevé, idéal pour machines de forte puissance. Sensible aux perturbations d'écoulement.	L'air est aspiré axialement puis rejeté radialement (force centrifuge). Robuste, compact, mais rendement et taux de compression par étage plus faibles.

Principe de fonctionnement (1 étage = 1 grille ROTOR + 1 grille STATOR)

- ROTOR (pièce mobile) : transmet de l'énergie au flux d'air en tournant → la vitesse du flux d'air est accélérée.
- STATOR (intégré au carter, fixe) : profil divergent → transforme en pression la vitesse communiquée par le rotor.
- Résultat : flux entrant à faible vitesse/pression → flux sortant avec pression augmentée, étage après étage.

Taux de compression — exemples

Moteur	Compresseur	Rapport de compression
Snecma M88 (Rafale)	3 étages BP + 6 étages HP	24,50 / 1
Jumo 008	Axial, 8 étages	3,14 / 1

Le vrillage des ailettes (aubes)

Les ailettes des rotors/stators ne sont pas droites : elles sont vrillées (hélicoïdales) le long de leur rayon, pour adapter l'angle d'incidence local à la vitesse de l'écoulement d'air à différentes positions → optimise la compression et l'écoulement de l'air, assure un fonctionnement optimal et efficace.

L'angle de vrillage des ailettes est généralement compris entre 15° et 19°.

Le pompage compresseur

Définition : interruption pulsatoire de l'écoulement dans le compresseur (perturbation/inversion locale du flux d'air).

Condition	Cause
Régime de croisière / hauts régimes	Défaillance des étages HP
Régime ralenti	Débit des étages BP trop important

Conséquences : mauvaise alimentation en air de la chambre de combustion, vibrations, augmentation de la température turbine.

Solutions anti-pompage :

- Bas régimes → Vannes de décharge (VBV — Variable Bleed Valve) : délestage / évacuation d'une partie du flux entre les compresseurs BP et HP.
- Hauts régimes → Stator à calage variable (VSV — Variable Stator Vane) : installé sur le compresseur HP, modification de l'angle de calage du stator pour adapter les propriétés aérodynamiques en fonction du régime moteur. Peut être complété par des vannes de décharge (ex. V2500).

9 — La chambre de combustion

Rôles :

- Réalise le mélange de l'air et du carburant
- Assure la combustion et dirige les gaz vers la turbine et le canal d'éjection
- Point de rencontre des 3 circuits du réacteur : circuit d'air sortant du compresseur, circuit de carburant, circuit d'allumage

Dosages

Dosage stœchiométrique (combustion théorique complète) = 1/15

Dosage global réellement utilisé (avec air de dilution/refroidissement) = 1/50 à 1/70

→ On injecte donc beaucoup plus d'air que nécessaire pour la combustion seule : l'excès d'air sert à refroidir la chambre et diluer les gaz avant la turbine.

Repères de température

Entrée chambre ≈ 550°C → Cœur de flamme ≈ 2200°C → Sortie vers turbine ≈ 1500°C

Bon courage pour le contrôle !