

PHYSIQUE INDUSTRIELLE

ÉTUDE DE L'ÉTAGE DE PROPULSION CRYOTECHNIQUE DE LA FUSÉE ARIANE 5

Les différentes parties du problème sont indépendantes et peuvent être traitées séparément

L'EXPRESSION DU PROGRES

Ariane 5 est la réponse technique et économique aux besoins de lancement de charges utiles pour les prochaines décennies.

Ariane 5 est constitué de deux éléments :

- un bi-étage inférieur
- un composite supérieur.

Le bi-étage inférieur reste commun à toutes les missions quelle que soit l'orbite visée et le type de charges utiles embarquées, de l'homme dans l'espace aux structures de plate-formes tout en satisfaisant, de façon optimum, le lancement des satellites commerciaux.

Ce bi-étage se compose d'un Etage Principal Cryotechnique (EPC) à hydrogène et à oxygène liquides, et de deux propulseurs à propergol solide.

L'étage cryotechnique est équipé d'un moteur Vulcain très puissant, allumé puis contrôlé avant la mise à feu des propulseurs à poudre.

Le composite supérieur

Coiffe
OERLIKON-CONTRAVES

Structure Porteuse Externe
pour Lancement Multiple Ariane
(SPELTRA)
DEUTSCHE AEROSPACE

Etage à propergols stockables
(EPS)
DEUTSCHE AEROSPACE

Case à équipements
MATRA MARCONI SPACE

Le bi-étage inférieur

Etage d'accélération
à poudre
(EAP)
AEROSPATIALE

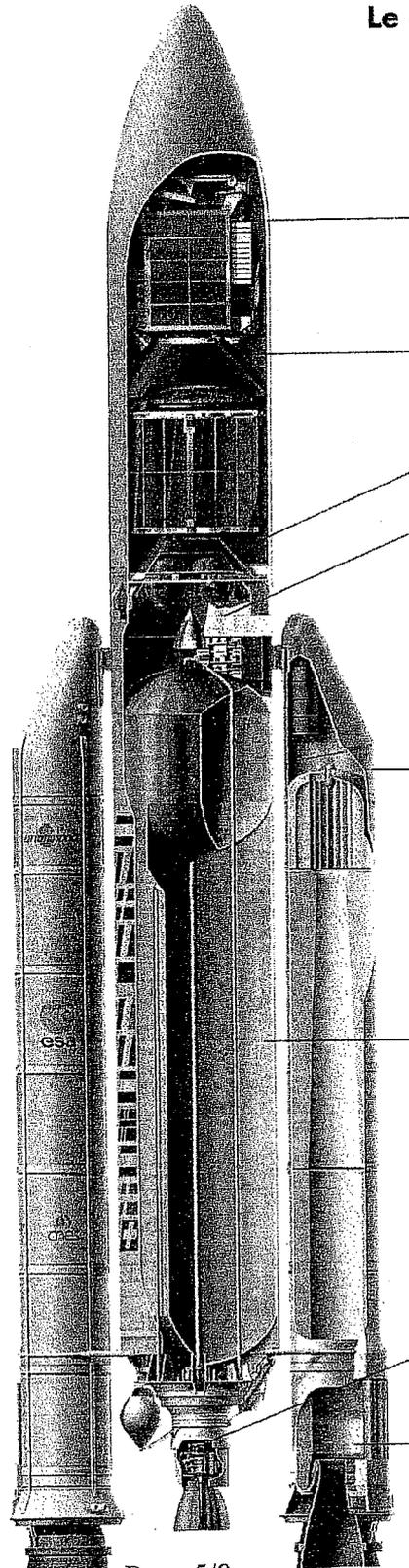
Etage principal cryotechnique
(EPC)
AEROSPATIALE

Moteur Vulcain
SEP

Moteur à propergol solide
EUROPROPULSION
(groupe FIAT/SEP)

Hauteur : 51 m

Capacité en GTO :
5,9 tonnes (lancement double)
6,8 tonnes (lancement simple)
en orbite basse : près de 20 tonnes



CAE3CI

L'étage principal cryotechnique H155 de la fusée Ariane V est propulsé par le moteur Vulcain.

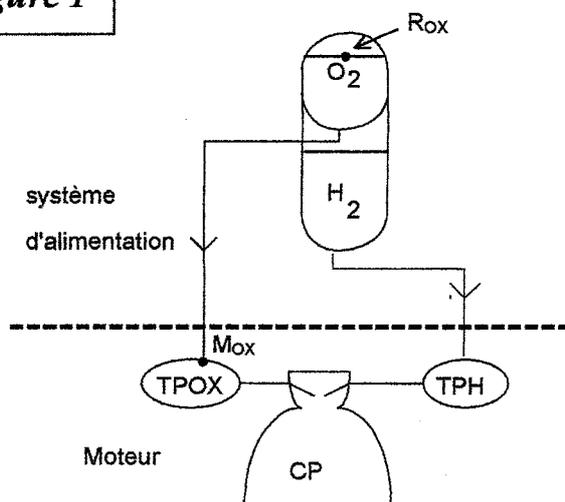
La poussée est obtenue par éjection à grande vitesse de gaz produits par la combustion à haute pression (108 bar) et haute température (3 500 K) du dihydrogène (carburant) avec du dioxygène (comburant).

Le dihydrogène et le dioxygène sont stockés et acheminés séparément vers le moteur sous forme liquide.

Dans la suite l'entrée des turbopompes constitue la limite entre le système d'alimentation et le moteur (voir fig. 1).

figure 1

Synoptique EPC



O_2 : réservoir de dioxygène

H_2 : réservoir de dihydrogène

TPOX : turbopompe pour le dioxygène
TPH : turbopompe pour le dihydrogène

CP : chambre propulsive du moteur Vulcain

Données numériques :

On rappelle que 1 bar = 100 kPa.

Les données concernant le dioxygène liquide sont les suivantes :

La pression au point R_{ox} : P_{Rox} du réservoir de O_2 est maintenue à 3,5 bar.

La température de O_2 est de 91 K du réservoir jusqu'à l'entrée du moteur.

A 91 K la masse volumique $\rho_{ox} = 1\,140 \text{ kg.m}^{-3}$.

La pression au point M_{ox} : P_{Mox} de O_2 à l'entrée de la turbopompe (entrée du moteur) est de 6,0 bar.

Les données pour le dihydrogène liquide sont :

La température de H_2 est de 21 K du réservoir jusqu'à l'entrée du moteur.

A 21 K la masse volumique est $\rho_{H_2} = 70 \text{ kg.m}^{-3}$.

La pression de H_2 à l'entrée de la turbopompe (entrée du moteur) est de 3,2 bar.

Q_{vH} le débit volumique du dihydrogène liquide est de 600 L.s^{-1}

On admet que tous ces paramètres restent constants pendant toute la phase de décollage.

CAE3CI

I. Étude du système d'alimentation en dioxygène liquide

Nous voulons calculer le débit volumique du dioxygène à l'allumage du moteur. La seule accélération à prendre en compte est celle de la pesanteur soit $9,8 \text{ m.s}^{-2}$.

Le réservoir de O_2 a un diamètre D de 4,5m et la surface libre est à une hauteur h de 25,2 m au-dessus du moteur (au décollage). Le tuyau qui achemine le dioxygène à l'entrée du moteur a un diamètre d de 185 mm.

1.1) Représenter le schéma de l'ensemble 'réservoir d' O_2 et tuyau d'alimentation du moteur' en indiquant le point R_{ox} au niveau de la surface du dioxygène et le point M_{ox} juste à l'entrée du moteur. Donner la relation entre les pressions, altitudes et vitesses du liquide entre ces deux points. On néglige les pertes de charge.

1.2) Donner l'expression littérale de la vitesse V_{Mox} du dioxygène à l'entrée du moteur en fonction des données du problème. On expliquera pourquoi on peut négliger la vitesse de la surface libre du réservoir.

1.3) Calculer la vitesse V_{Mox} .

1.4) Vérifier que le débit volumique Q_{Vox} du dioxygène est de $0,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ce débit est maintenu constant dans la suite de la phase de décollage.

II. Étude de la turbopompe pour le dihydrogène

La turbopompe pour le dihydrogène tourne à $33\,500 \text{ tr.min}^{-1}$ et absorbe une puissance P_a de 12 MW pour un rendement de 85 %. Elle est constituée d'une pompe à deux étages centrifuges.

2.1) Donner la relation entre la pression P_{SH} à la sortie de la turbopompe, la pression P_{MH} à l'entrée de la turbopompe, la puissance absorbée P_a , le rendement η et le débit volumique Q_{VH} du dihydrogène.

2.2) Calculer la pression P_{SH} .

III. Détermination de la masse d'ergols pour l'étage de propulsion cryotechnique

Le système d'alimentation fournit un débit volumique trois fois plus grand en dihydrogène qu'en dioxygène afin d'assurer aussi le refroidissement du moteur.

3.1) Le moteur fonctionne pendant une durée Δt . Exprimer la masse m_{Ox} de dioxygène nécessaire dans le réservoir en fonction de Q_{Vox} (débit volumique du dioxygène), de ρ_{Ox} et de Δt .

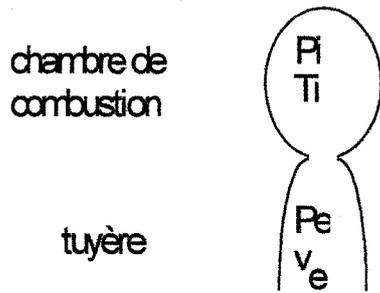
3.2) Calculer la masse du dioxygène m_{Ox} si $\Delta t = 9$ minutes et 35 secondes.

3.3) Écrire l'équation bilan de la réaction puis calculer la masse m_H de dihydrogène nécessaire.

3.4) En déduire m_{erg} , la masse totale d'ergols (H_2 et O_2) qu'il faut placer dans les réservoirs de l'étage principal cryotechnique H155 d'Ariane V.

IV. Détermination de la poussée du moteur cryogénique Vulcain

On veut d'abord calculer la vitesse d'éjection des gaz.



Dans la chambre de combustion, les gaz sont au repos, à la pression P_i et à la température $T_i = 3\,500\text{ K}$. Ils sont éjectés à une vitesse v_e , la pression étant P_e .

Ces gaz ont une capacité thermique massique égale à $C_p = 4\,200\text{ J.K}^{-1}\text{kg}^{-1}$.

figure 2

4.1) En considérant les gaz comme parfaits et en utilisant la loi de conservation de l'énergie pour un écoulement adiabatique, trouver l'expression de v_e en fonction de C_p , T_i et T_e .

4.2) Exprimer le rapport T_e/T_i en fonction du rapport des pressions P_e/P_i et du coefficient $\gamma = C_p/C_v$.

4.3) En déduire que : $v_e^2 = 2 \cdot C_p \cdot T_i \cdot \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$

4.4) Le rapport des pressions $\frac{P_e}{P_i}$ étant égal à 10^{-3} et $\gamma = 1,2$, calculer la vitesse d'éjection v_e .

4.5) Le théorème des quantités de mouvement appliqué au système gaz-tuyère, permet de montrer que la poussée du moteur peut s'écrire $F = q_m \cdot v_e$, q_m étant le débit massique des gaz. Calculer F pour $q_m = 250\text{ kg.s}^{-1}$.