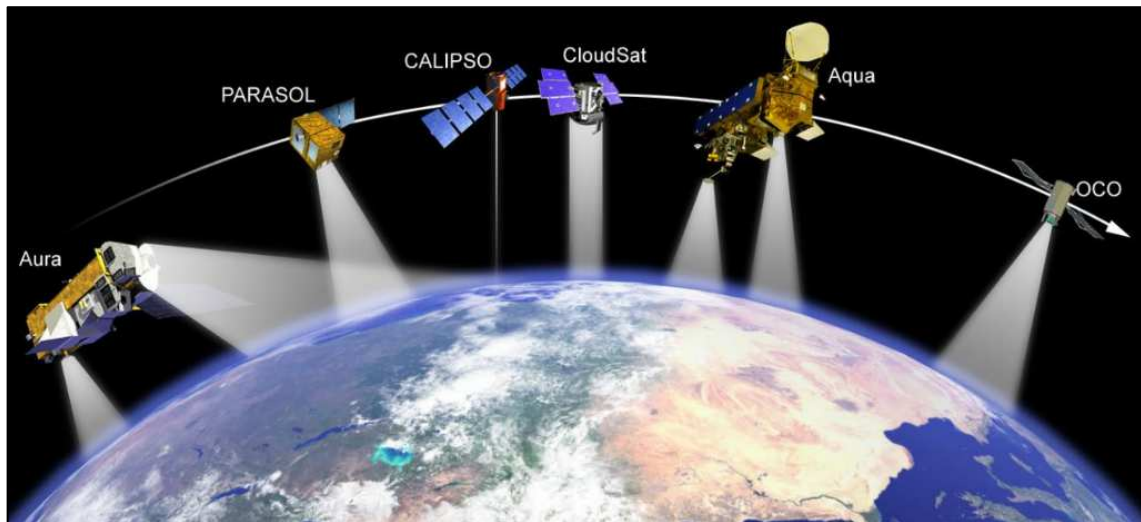




1 – Présentation

De très nombreuses applications liées aux besoins de l'Homme impliquent l'usage de satellites artificiels en orbite autour de la Terre : communication (téléphone, radio, télévision, Internet), déplacement (système de navigation GPS) ou encore observation de la Terre (observations météorologiques, surveillance militaire).

⇒ Plusieurs centaines de satellites circulent en permanence au-dessus de nos têtes.



Exemple de satellites en orbite autour de la Terre



Principaux éléments d'Ariane 5

Comment les satellites sont-ils mis en orbite ?

Quitter la Terre pour mettre un satellite en orbite ou même envoyer une sonde dans l'espace nécessite un lanceur, souvent appelé « fusée ». Son rôle est de transporter des charges utiles au-delà de l'atmosphère et de donner une vitesse suffisante (pour une mise en orbite autour de la Terre par exemple).

Comment décoller ?

Dans l'espace, il n'existe pas de points d'appui extérieurs. Un moteur-fusée est capable de créer sa propre force motrice aussi bien dans l'atmosphère que dans le vide spatial. Son fonctionnement repose sur un phénomène naturel, celui de l'égalité de l'action et de la réaction, découvert par Isaac Newton.



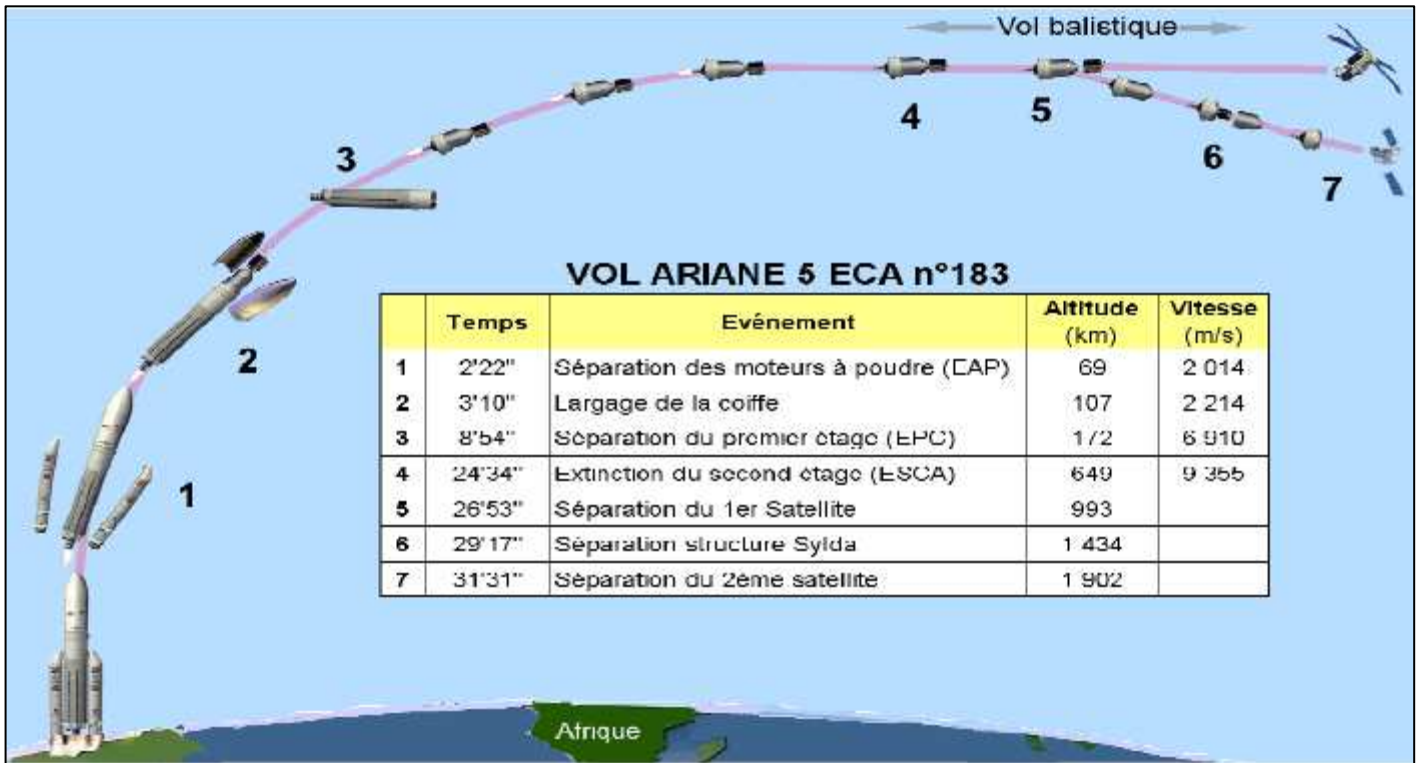
Lanceur européen Ariane 5
(Kourou, Guyane Française)

2 – Problématique

On se propose d'étudier le décollage du lanceur Ariane 5 ; le but sera d'identifier les principaux paramètres physiques à prendre en compte et de les relier entre eux via la seconde loi de Newton (Principe Fondamental de la Dynamique, dit « PFD »).

PARTIE A

Etude générale du plan de vol d'Ariane 5 (modèle ECA)



→ A partir du visionnage de la vidéo...

Q1 – On distingue l'allumage successif de deux systèmes de propulsion : _____ puis _____

Q2 – A $t = 30 \text{ s}$, le lanceur Ariane 5 traverse _____

Q3 – Ariane subit une poussée totale de _____ T ; ceci est ☐ cohérent ☐ incohérent avec l'annexe 1.

Q4 – A $t = 40 \text{ s}$, la vitesse du lanceur Ariane est de _____, soit _____ fois la vitesse du son qui est de _____ sur terre (aux CNPT).

Q5 – Les altitudes remarquables sont :

$$h(t = 1 \text{ min}) = \quad \quad \quad h(t = 2 \text{ min}) = \quad \quad \quad h(t = 3 \text{ min}) = \quad \quad \quad$$

Q6 – A quelle altitude considère-t-on qu'il n'y a plus d'atmosphère (vide spatial) ? $h_{lim} =$ _____

EAP = Etages Accélérateurs à Poudre (propergol solide) | MPS = Moteur à Propergol Solide.

Q7* – Il est dit que les EAP⁽¹⁾ assurent 90% de la poussée totale ; vérifier la cohérence de ce propos avec les données fournies dans l'annexe 1.

⇒ Le propos tenu est ☐ cohérent ☐ incohérent avec l'annexe 1.

(1) se sont les MPS en fait, les EAP ne sont que des réservoirs.

Q8 – La consommation de carburant des MPS est $q_{MPS} \approx \text{_____} T \cdot s^{-1}$

Q9 – Les MPS sont au nombre de _____ (comme les EAP)

Q10 – Les MPS consomment un total de _____ T de poudre, soit _____ T chacun.

Q11* – Calculer la durée nécessaire pour que les MPS consomment tout le carburant contenu dans les EAP.

Q12* – Il est dit que les EAP ont une masse $m_{EAP} = 36 T$ chacun ; vérifier la cohérence de ce propos avec les données fournies dans l'annexe 1 et les données ci-dessus (questions précédentes).

⇒ Le propos tenu est ☐ cohérent ☐ incohérent avec l'annexe 1.

Q13* – Partant de l'incohérence précédente, déduire ce qui « semblerait » être la masse des MPS.

Q14 – La séparation des deux EAP a lieu à $t = \text{_____} s$. Ceci est ☐ cohérent ☐ incohérent avec ce qui est annoncé dans le tableau du plan de vol page précédente.

Le prochain élément qui sera largué est la coiffe.

Q15 – Donner la fonction de la coiffe : _____

Q16 – Il est dit que la coiffe a une masse $m_{coiffe} = \text{_____} T$; le propos tenu est ☐ cohérent ☐ incohérent avec la valeur fournie dans l'annexe 1.

Q17 – En anglais, « coiffe » se dit _____, ce qui signifie usuellement « carénage ».

Q18 – Entourer sur le plan de vol page précédente les étapes qui viennent d'être étudiées.

PARTIE B

Etude du moteur Vulcain

Q19 – Le moteur Vulcain fonctionne dès le début du décollage :
☐ vrai ☐ faux

Q20 – Calculer en minutes sa durée de fonctionnement :
 voir annexe 1 pour la valeur en secondes.

Q21 – Il fonctionne plus longtemps que les MPS :
☐ vrai ☐ faux

Q22 – En recoupant les données fournies dans le tableau ci-dessous mais aussi dans l'annexe 1, proposer une valeur moyenne de la poussée du moteur Vulcain :



Vulcain est alimenté par deux réservoirs superposés à fond commun contenant 132 tonnes d'hydrogène et 26 tonnes d'oxygène à très basse température.

Q23 – Calculer la masse totale de carburant qu'il va consommer :

Q24 – Calculer le débit $q_{VULCAIN}$ supposé constant auquel la consommation a lieu :

$$q_{VULCAIN} \approx \text{_____} T \cdot s^{-1}$$

Q25 – Pour se donner un ordre de grandeur, calculer le nombre d'Audi TT RS permettant d'égaliser la puissance maximale de la turbopompe de Vulcain :

Version	Vulcain 2
Hauteur	3,45 m
Diamètre	2,10 m
Masse	2 100 kg
Vitesse de rotation des turbopompes	31 800 à 39 800 tr/min
Puissance de la turbopompe	9,9 à 20,4 MW
Pression dans la chambre de combustion	115 bar
Poussée dans le vide	1 340 kN
Poussée au sol	960 kN
<u>Impulsion spécifique</u> dans le vide	434,2 s
<u>Rapport de section</u>	58,3
Vitesse d'éjection dans le vide (SI)	4 228 m/s



Audi TT RS Coupé 2.5 TFSI 340 Quattro (Coupé)

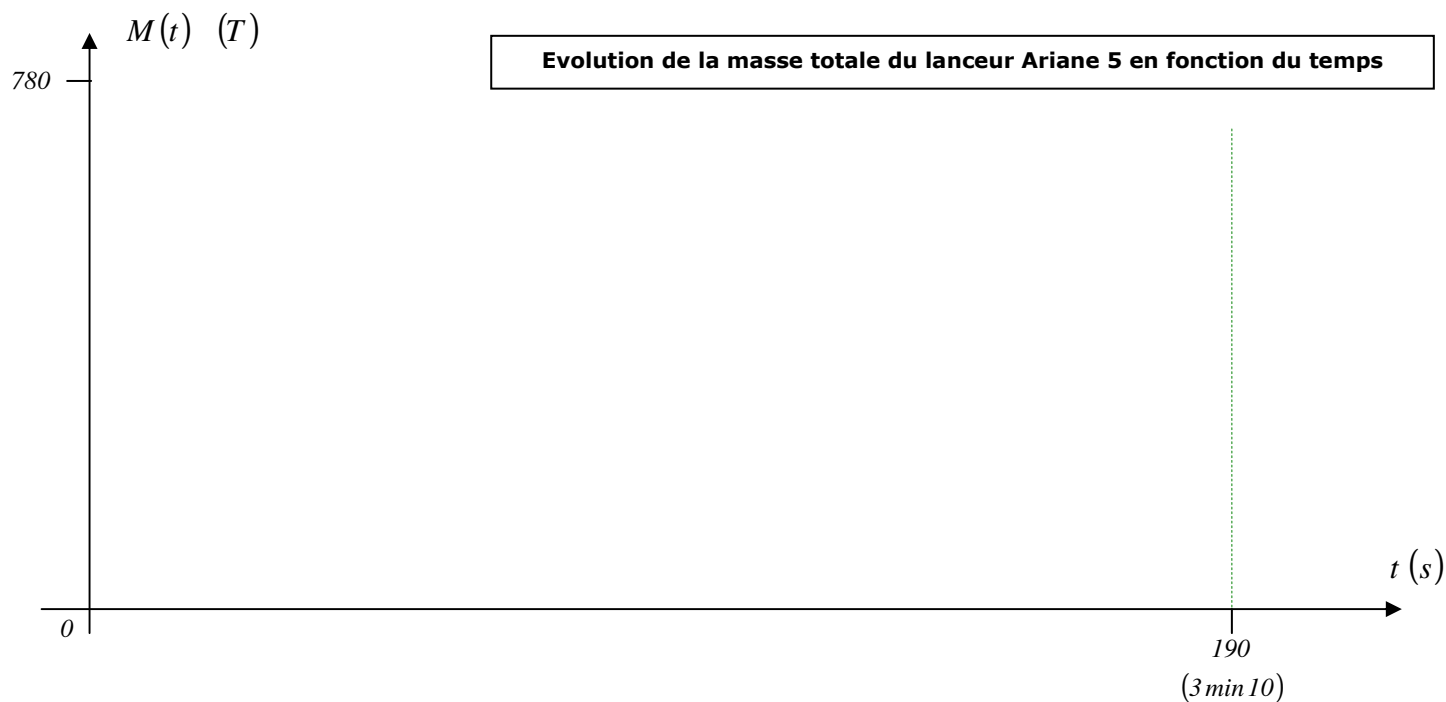
Coupé - 4roues permanent - Essence - Boîte manuelle, 6 vitesses - 24 cv - 340 ch / 250 kW
 Consommation mixte: 9,0 L/100 km Autonomie moyenne: 667 km
 Dimensions (L x l x h): 4,198 m x 1,842 m x 1,342 m

PARTIE C

Evolution de la masse du lanceur Ariane du début jusqu'au largage de sa coiffe

La masse du lanceur est une grandeur significative sur sa dynamique. Or, elle est variable au cours du temps (elle diminue), ce qui est de nature à complexifier le problème. On se propose donc ici de définir l'évolution de la masse du lanceur.

Q26 – Partant de l'ensemble des informations disponibles, tracer l'évolution de la masse totale M du lanceur Ariane 5 du début du décollage jusqu'au largage de la coiffe (un peu au-delà même) :



Q27 – Deux « zones » apparaissent ; les repérer ① et ②.

Q28 – Déterminer les équations des droites présentes :

→ Recherche de l'équation $M_1(t)$...

$$M_1(t) = \underline{\hspace{10cm}}$$

→ Recherche de l'équation $M_2(t)$...

$$M_2(t) = \underline{\hspace{10cm}}$$

PARTIE D

Recherche des efforts que subit le lanceur

Durant son ascension, Ariane 5 subit des efforts. Il y a bien entendu la poussée générée par Vulcain, mais pas que... On le verra plus tard, les efforts subits interviennent sur sa dynamique, tout comme sa masse. Il faut donc les expliciter et c'est ce qu'on se propose de faire dans cette partie.

- ⇒ Exprimer tous les efforts dans le système international d'unités (MKS).
- ⇒ Utiliser les puissances de 10 si nécessaire
- ⇒ Arrondir correctement les valeurs numériques.

Bilan des Actions Mécaniques Extérieures (BAME) que subit le lanceur...

On distingue cinq AME :

- la poussée du moteur Vulcain, $\overrightarrow{F_{VULCAIN}}$, en C ,
- la poussée des deux MPS, $\overrightarrow{F_{MPS}}$, en A et B ,
- le poids propre du lanceur, $\vec{P}$, en G (centre de gravité),
- la résistance de l'air, $\vec{R}$, en D .

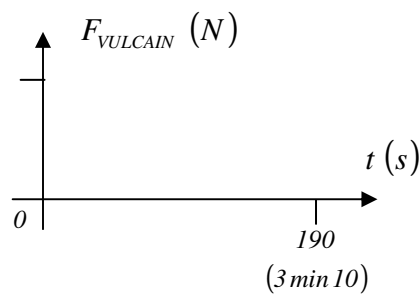
⇒ On admet que tous les efforts sont verticaux.

Q29 – Tracer les cinq efforts que subit le lanceur Ariane 5 sur la figure ci-contre en rouge et sans échelle particulière mais en faisant attention à leur sens ; nommer ces efforts $\overrightarrow{F_{VULCAIN}}$, $\overrightarrow{F_{MPS}}$ (x 2), $\vec{P}$ et $\vec{R}$.

1^{er} effort : la poussée de Vulcain...

Q30 – Rappeler la valeur moyenne de la poussée du moteur Vulcain qui a été calculée dans la partie précédente : $F_{VULCAIN} =$ _____

Q31 – Tracer en rouge l'allure de cette poussée en fonction du temps (placer les valeurs remarquables).

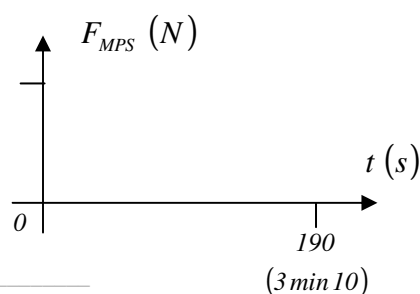


2^{ème} et 3^{ème} effort : la poussée des MPS...

Q32 – Donner la valeur moyenne de la poussée d'un seul MPS :

$F_{MPS} =$ _____

Q33 – Tracer en rouge l'allure de cette poussée en fonction du temps (placer les valeurs remarquables).



4^{ème} effort : le poids propre d'Ariane ...

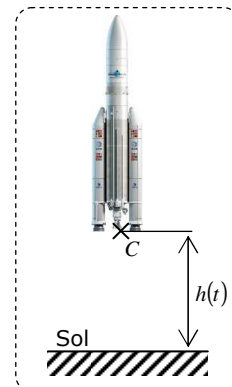
Contrairement aux poussées de Vulcain et des deux MPS qui sont (supposées) constantes, le poids ne l'est pas. En effet, il dépend de la masse M du lanceur qui est variable (voir partie C), mais aussi du champ de pesanteur g qui dépend de l'altitude ; comme le lanceur prend de l'altitude, g va décroître.

Etablir le poids va donc consister à donner une relation (une formule) et non pas une valeur ; voyons voir...

On note :

- $\Rightarrow g_0 = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ l'intensité du champ de pesanteur à la surface de la Terre (au sol),
- $\Rightarrow h$ l'altitude du point C ; h étant variable en fonction du temps, on a $h = h(t)$,
- $\Rightarrow P_1$ le poids de la fusée sur la phase ① qui dépend de h et de t ; on a $P_1 = P_1(h, t)$,
- $\Rightarrow P_2$ le poids de la fusée sur la phase ② qui dépend de h et de t ; on a $P_2 = P_2(h, t)$,

Remarque : la fusée étant posée au sol à $t = 0$, on a $h(0) = 0$,



Q34 – Etablir l'expression du poids $P_1(h, t)$ sur la phase ① :

$P_1(h, t) =$ _____

Q35 – Etablir l'expression du poids $P_2(h, t)$ sur la phase ② :

$P_2(h, t) =$ _____

5^{ème} effort : la résistance de l'air ...

Tout comme le poids, la force issue de la résistance de l'air va être variable (désolé !) ; elle dépend en effet de la vitesse de la fusée qui ne fait qu'augmenter, mais aussi de la masse volumique de l'air qui varie selon l'altitude. Aïe aïe aïe !

Etablir cette force va donc consister à donner une relation (une formule) et non pas une valeur ; voyons voir...

On note :

- $\Rightarrow \rho_0 = 1,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ la masse volumique de l'air à la surface de la Terre,
- $\Rightarrow \rho(h)$ la masse volumique de l'air à l'altitude h ,
- $\Rightarrow M_{\text{air}} = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ la masse molaire de l'air (constante),
- $\Rightarrow v(t)$ la vitesse ascensionnelle du lanceur à l'instant t ,
- $\Rightarrow S = 80 \text{ m}^2$ sa surface « maître couple » (constante connue),
- $\Rightarrow C_x$ son coefficient de pénétration dans l'air (ou coefficient de traînée, constante inconnue)

Hypothèses :

- $\Rightarrow$ La température de l'atmosphère est supposée constante ; on a $T = 280 \text{ K}$,
- $\Rightarrow$ Le régime d'écoulement de l'air sur la fusée est turbulent.

Consulter la fiche « Mécanique des fluides >> 8 – Force de frottement visqueux ».

Q35 – Proposer une valeur pour le coefficient de pénétration dans l'air : $C_x = \underline{\hspace{2cm}}$

Q36 – Donner l'expression numérique de la force de frottement visqueux R en fonction de la masse volumique ρ de l'air et de la vitesse v .

Consulter la fiche « Matériaux >> 2 – Masse volumique, densité ».

Q37 – Donner l'expression numérique de la masse volumique ρ en fonction de la pression p de l'air.

Q38 – Construire l'expression numérique de la force de frottement visqueux R en fonction de la pression p de l'air et de la vitesse v .

Consulter la fiche « Mécanique des fluides >> 2 – Statique des fluides ».

Q39 – Donner l'expression numérique de la pression p en fonction de l'altitude h .

Q40 – Construire l'expression numérique de la force de frottement visqueux R en fonction de l'altitude h et de la vitesse v .

PARTIE E

Equation de la dynamique du lanceur Ariane

Nous voilà au terme de l'étude. L'évolution de la masse du lanceur est connue, l'ensemble des efforts aussi. C'est bien. Se pose maintenant la question de savoir comment relier ces grandeurs pour connaître à chaque instant l'altitude du lanceur, sa vitesse et aussi son accélération ; une équation permet de faire le lien entre tout cela, c'est la seconde loi de Newton, appelée aussi « Principe Fondamental de la Dynamique » ou PFD.

Ainsi, pour terminer, on se propose dans cette partie d'utiliser le PFD ; s'ensuivra alors une conclusion sur l'ensemble de l'étude...

Hypothèses :

⇒ On considère que la Terre est fixe.

Consulter la fiche « Physique >> 5 – Repère et référentiel ».

Q41 – Partant de l'hypothèse formulée ci-dessus, dire dans quel référentiel on place l'étude et préciser ce qui par voie de conséquence est négligé.

Q42 – Compte tenu de ce qu'on étudie (le décollage du lanceur Ariane 5), le repère considéré est galiléen avec une approximation : ☐ satisfaisante ☐ moyenne ☐ médiocre

Consulter la fiche « Mécanique du solide >> 2 – Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) ».

Q43 – Appliquer le PFD.

- ☞ Développer les calculs sur une feuille annexe.
- ☞ Se limiter au théorème de la résultante dynamique sur l'axe verticale.
- ☞ Se limiter à la zone ①.

On note :

⇒ $h = h(t)$ la position du point C ,

⇒ $v = v(t) = \frac{d h(t)}{dt} = \dot{h}$ la vitesse du point C (dérivée première de la position $h(t)$),

⇒ $a = a(t) = \frac{d v(t)}{dt} = \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = \ddot{h}$ l'accélération du point C (dérivée seconde de la position $h(t)$),

Q44 – Remplacer dans l'équation précédente les vitesses v par $\dot{h}$ et les accélérations a par $\ddot{h}$.

ARIANE 5-ECA LAUNCH VEHICLE

ANNEXE 1

54.8 m

Fairing

(RUAG Space)

↙ 17 m

↙ Mass: 2.4 t

Intelsat 30

(Space Systems/Loral)

↙ Mass: 6.3 t

ARSAT-1

(INVAP)

↙ Mass: 2.98 t

Vehicle Equipment Bay

(Airbus Defence and Space)

↙ Height: 1.13 m

↙ Mass: 970 kg

ESC-A - Cryogenic upper stage

(Airbus Defence and Space)

↙ Height: 4.71 m

↙ Mass: 19 t

EPC - Main Cryogenic stage

(Airbus Defence and Space)

↙ Height: 31 m

↙ Mass: 188 t

EAP - Solid Rocket Boosters

(Airbus Defence and Space)

↙ Height: 31.6 m

↙ Mass: 277 t approx.

Moteur Vulcain 2

(Snecma)

↙ Thrust: 1,390 kN (in the vacuum)

↙ 540 sec of propulsion

780 tons

(total mass at lift-off)

ACU - Payload adaptateur (2)

(RUAG Space ou Airbus Defence and Space)

↙ Mass: 1.40 kg each approx.

SYLDA - Internal structure

(Airbus Defence and Space)

↙ 7 versions (Height: 4.9 to 6.4 m)

↙ Mass: 400 to 530 kg

Moteur HM-7B

(Snecma)

↙ Thrust: 67 kN (in the vacuum)

↙ 945 sec of propulsion

Propellants (in ton) at T-O

H : Cryogenic

P : Solid

MPS - Moteur à Propergol Solide

(Europropulsion)

↙ Average thrust: 5,060 kN

↙ Maximum thrust: 7,080 kN (in the vacuum)

↙ 130 sec of propulsion

13,000 kN at Lift-off
(at T-O + 7 to 8 sec)

Conclusion

On le voit, l'étude du décollage d'une fusée est un problème complexe. L'approche proposée ici a consisté à mettre en œuvre le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) et, bien que le nombre de forces est réduit à cinq, il a fallu considérer de très nombreux aspects et aussi faire des hypothèses.

→ D'un point de vue physique, on a :

Hypothèse : la terre est fixe => référentiel terrestre.

PFD dans un repère galiléen

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a}$$

$$\underbrace{\vec{P} + \vec{F}_{Vulcain} + 2 \cdot \vec{F}_{MPS} + \vec{R}}$$

PFD dans un repère non galiléen

$$\sum \vec{F}_{ext} + \vec{F}_{ie} + \vec{F}_{ic} = m \cdot \vec{a}$$

$\vec{P}$, vertical et toujours vers le bas, dépend de la masse M de la fusée et aussi de g ; on a : $P = m \cdot g$

↳ mais g dépend de l'altitude h : $g(h) = g_0 \cdot \frac{r_T^2}{(r_T + h)^2}$

$\vec{R}$, toujours opposée au mouvement et donc verticale vers le bas ; on a : $R = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2$

↳ mais ρ dépend de la pression p : $\rho = \frac{M \cdot p}{R \cdot T}$

↳ mais p dépend de l'altitude h : $P(h) = P_0 \cdot e^{-\frac{Mg}{RT}(h-h_0)}$

Hypothèse : la température de l'atmosphère est constante

L'équation issue du PFD met en relation la position $h(m)$, la vitesse $v(m \cdot s^{-1})$ et l'accélération $a(m \cdot s^{-2})$. Ces trois grandeurs varient au cours du temps ; on a $h = h(t)$, $v = v(t)$ et $a = a(t)$ et résoudre un problème de dynamique consiste à expliciter ces fonctions pour être en mesure de connaître les valeurs de la position h , la vitesse v et l'accélération a du lanceur à n'importe quelle date t .

→ D'un point de vue mathématique, on a :

La vitesse exprimant la variation de position, ces deux grandeurs sont reliées par l'opérateur de dérivation.

⇒ on a : $v(t) = \frac{dh(t)}{dt} = \dot{h}$ (dérivée première de la position)

L'accélération exprimant la variation de vitesse, ces deux grandeurs sont reliées par l'opérateur de dérivation.

⇒ on a : $a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = \ddot{h}$ (dérivée première de la vitesse et donc seconde de la position)

Ainsi, le PFD donne une équation dans laquelle on trouve une fonction $h = h(t)$ mais aussi sa dérivée première $\dot{h}(t)$ et sa dérivée seconde $\ddot{h}(t)$. Il s'agit d'une équation différentielle (ED) ; un grand classique dans tous les domaines de la physique. Résoudre une ED consiste alors à trouver la fonction, ici $h(t)$.

⇒ Vous étudierez ça en détail dans le supérieur...