

Fusées et moteurs: de Newton à l'équation de la fusée

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Fusées et moteurs: de Newton à l'équation de la fusée: comment « Pression de chambre, débit et dimensionnement: lire les causalités » agit-il sur « Rapport de mélange: deux réservoirs qui doivent finir ensemble », et quel repère issu de « Rapport de mélange et vidange synchronisée » permet de vérifier la décision?

Intuition. Augmenter la pression de chambre peut améliorer les performances d'une tuyère et réduire certaines dimensions pour une poussée donnée, mais cela augmente aussi les contraintes mécaniques, les températures et la puissance demandée aux systèmes d'alimentation. Une valeur de pression n'est donc jamais « meilleure » isolément.

1

Pression de chambre, débit et dimensionnement: lire les causalités

Augmenter la pression de chambre peut améliorer les performances d'une tuyère et réduire certaines dimensions pour une poussée donnée, mais cela augmente aussi les contraintes mécaniques, les températures et...

2

Rapport de mélange: deux réservoirs qui doivent finir ensemble

Augmenter la pression de chambre peut améliorer les performances d'une tuyère et réduire certaines dimensions pour une poussée donnée, mais cela augmente aussi les contraintes mécaniques, les températures et...

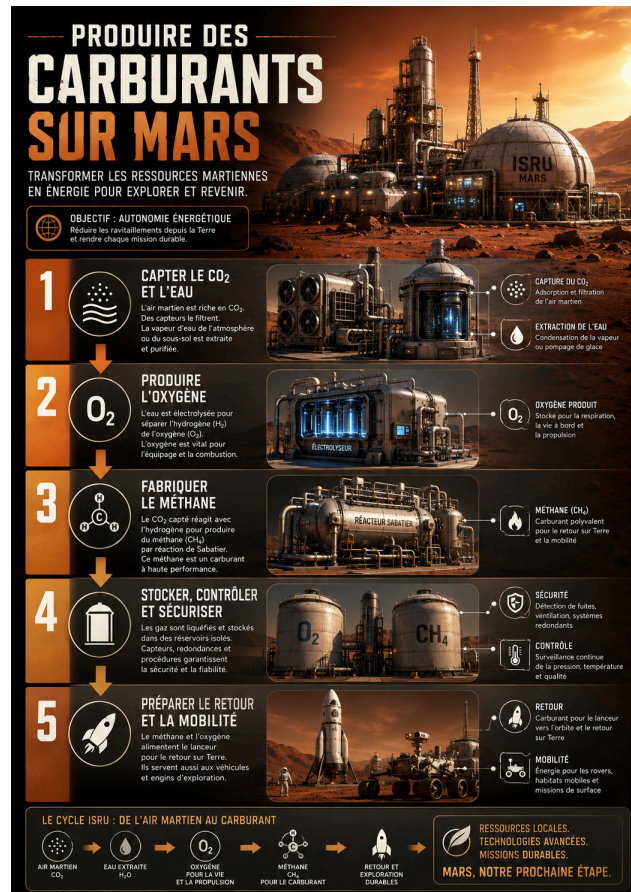
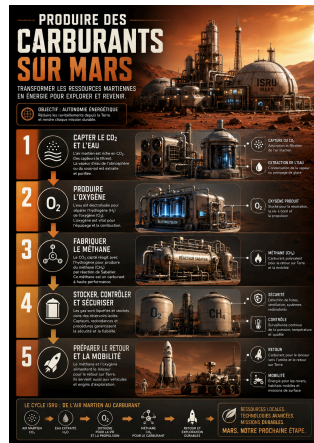
3

Rapport de mélange et vidange synchronisée

Augmenter la pression de chambre peut améliorer les performances d'une tuyère et réduire certaines dimensions pour une poussée donnée, mais cela augmente aussi les contraintes mécaniques, les températures et...

Repère concret. Si $\dot{m} = 250 \text{ kg/s}$ et qu'un allumage dure 150 s, la masse consommée vaut $m = \dot{m}\Delta t = 37\,500 \text{ kg}$, soit 37,5 t, en supposant le débit constant.

- Pression de chambre, débit et dimensionnement: lire les causalités — Augmenter la pression de chambre peut améliorer les performances d'une tuyère et réduire certaines dimensions pour une poussée donnée, mais cela augmente aussi les contraintes...
- Rapport de mélange: deux réservoirs qui doivent finir ensemble — Augmenter la pression de chambre peut améliorer les performances d'une tuyère et réduire certaines dimensions pour une poussée donnée, mais cela augmente aussi les contraintes...
- Rapport de mélange et vidange synchronisée — Augmenter la pression de chambre peut améliorer les performances d'une tuyère et réduire certaines dimensions pour une poussée donnée, mais cela augmente aussi les contraintes...



Des moteurs à l'autonomie: produire, stocker et sécuriser les propergols fait partie de l'architecture complète d'une mission martienne.

Une fusée n'avance pas parce qu'elle « pousse sur l'air ». Elle accélère une masse de gaz vers l'arrière et reçoit une variation de quantité de mouvement en sens opposé. C'est ce principe qui permet à un moteur-fusée de fonctionner dans le vide. Ce module part de cette idée simple, puis construit progressivement la poussée, le **débit** massique, l'impulsion spécifique, le rôle de la tuyère et enfin l'**équation de Tsiolkovski**. L'objectif n'est pas de mémoriser des formules: il est de savoir ce que chaque symbole mesure et ce qui change physiquement lorsque l'on modifie une valeur.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 04

Comprendre avant de calculer

Vous observez une fusée sur son pas de tir. Le véhicule doit accélérer en éjectant de la masse très vite dans la direction opposée, alors que sa propre masse diminue pendant la combustion.

Progression du module — force; poussée; impulsion spécifique; rapport poussée-poids.

force

Définition. Une force est une interaction capable de modifier le mouvement ou de déformer un objet. Son **unité** est le newton.

Exemple. La poussée d'un moteur exerce une force sur le véhicule tandis que la gravité et les efforts aérodynamiques contribuent à l'**accélération** résultante.

Piège. Une force élevée ne garantit pas une grande accélération si la masse à accélérer est elle aussi très élevée.

Contrôle mental. Pour une même masse, une accélération plus forte exige une **force** plus grande; si votre calcul prédit l'inverse, revérifiez le signe, l'unité et la direction du vecteur.

Exercice guidé — force

Situation à reconnaître. Une force est une interaction capable de modifier le mouvement ou de déformer un objet. Son unité est le newton.

Vérification demandée. Pour une même masse, une accélération plus forte exige une force plus grande; si votre calcul prédit l'inverse, revérifiez le signe, l'unité et la direction du vecteur.

Erreur à écarter. Une force élevée ne garantit pas une grande accélération si la masse à accélérer est elle aussi très élevée.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une force est une interaction capable de modifier le mouvement ou de déformer un objet. Son unité est le newton.

Test du cas

Pour une même masse, une accélération plus forte exige une force plus grande; si votre calcul prédit l'inverse, revérifiez le signe, l'unité et la direction du vecteur.

Piège exclu

Une force élevée ne garantit pas une grande accélération si la masse à accélérer est elle aussi très élevée.

Conséquence opérationnelle

Le garde-fou associé à ce point est concret: Une force élevée ne garantit pas une grande accélération si la masse à accélérer est elle aussi très élevée.. Si ce risque apparaît, la valeur calculée ne doit pas être utilisée seule pour valider la configuration.

Quantification

force: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

force: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

poussée

Définition. La poussée est la force propulsive produite par un moteur, généralement liée au débit massique éjecté et à la **vitesse** d'éjection ainsi qu'à un terme de pression.

Exemple. Un moteur peut avoir une grande poussée au décollage alors qu'un propulseur électrique possède une très faible poussée sur une longue durée.

Piège. Poussée et impulsion spécifique décrivent des propriétés différentes; la plus grande poussée n'est pas automatiquement le meilleur **rendement** propulsif.

Contrôle mental. Comparez la **poussée** au poids instantané du véhicule: au décollage, une poussée totale inférieure au poids ne peut pas produire une accélération verticale ascendante.

Exercice guidé — poussée

Situation à reconnaître. La poussée est la force propulsive produite par un moteur, généralement liée au débit massique éjecté et à la vitesse d'éjection ainsi qu'à un terme de pression.

Vérification demandée. Comparez la poussée au poids instantané du véhicule: au décollage, une poussée totale inférieure au poids ne peut pas produire une accélération verticale ascendante.

Erreur à écarter. Poussée et impulsion spécifique décrivent des propriétés différentes; la plus grande poussée n'est pas automatiquement le meilleur rendement propulsif.

Corrigé raisonné

Sens précis

La poussée est la force propulsive produite par un moteur, généralement liée au débit massique éjecté et à la vitesse d'éjection ainsi qu'à un terme de pression.

Test du cas

Comparez la poussée au poids instantané du véhicule: au décollage, une poussée totale inférieure au poids ne peut pas produire une accélération verticale ascendante.

Piège exclu

Poussée et impulsion spécifique décrivent des propriétés différentes; la plus grande poussée n'est pas automatiquement le meilleur rendement propulsif.

Conséquence opérationnelle

Pour ce point, la décision doit rester compatible avec le test suivant: Comparez la poussée au poids instantané du véhicule: au décollage, une poussée totale inférieure au poids ne peut pas produire une accélération verticale ascendante.. Une incohérence conduit à suspendre la conclusion et à contrôler unités, hypothèses ou capteurs concernés.

Quantification

poussée: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

poussée: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

impulsion spécifique

Définition. L'impulsion spécifique I_{sp} est une mesure de performance propulsive liée à la vitesse d'éjection effective, souvent exprimée en secondes.

Exemple. Deux moteurs consommant des ergols à des débits différents peuvent être comparés par leur I_{sp} pour certaines analyses de [delta-v](#).

Piège. I_{sp} en secondes n'est pas une durée de fonctionnement; c'est une convention de performance qui utilise l'accélération standard g_0 .

Contrôle mental. À poussée comparable, une [impulsion spécifique](#) plus élevée signifie en principe moins de débit de propergol; un résultat donnant simultanément plus d' I_{sp} et plus de consommation mérite un contrôle.

Exercice guidé — impulsion spécifique

Situation à reconnaître. L'impulsion spécifique I_{sp} est une mesure de performance propulsive liée à la vitesse d'éjection effective, souvent exprimée en secondes.

Vérification demandée. À poussée comparable, une impulsion spécifique plus élevée signifie en principe moins de débit de propergol; un résultat donnant simultanément plus d' I_{sp} et plus de consommation mérite un contrôle.

Erreur à écarter. I_{sp} en secondes n'est pas une durée de fonctionnement; c'est une convention de performance qui utilise l'accélération standard g_0 .

Corrigé raisonné

Sens précis

L'impulsion spécifique I_{sp} est une mesure de performance propulsive liée à la vitesse d'éjection effective, souvent exprimée en secondes.

Test du cas

À poussée comparable, une impulsion spécifique plus élevée signifie en principe moins de débit de propergol; un résultat donnant simultanément plus d' I_{sp} et plus de consommation mérite un contrôle.

Piège exclu

I_{sp} en secondes n'est pas une durée de fonctionnement; c'est une convention de performance qui utilise l'accélération standard g_0 .

Conséquence opérationnelle

L'usage de cette notion en mission exige un second regard: lsp en secondes n'est pas une durée de fonctionnement; c'est une convention de performance qui utilise l'accélération standard g_0 .. Ce point transforme la notion théorique en règle de validation avant engagement du système.

rapport poussée-poids

Définition. Le rapport poussée-poids compare la poussée disponible au poids du véhicule dans un champ de gravité donné.

Exemple. Au décollage terrestre, un rapport supérieur à 1 est nécessaire pour commencer à monter dans le modèle simplifié.

Piège. Le poids change avec le champ gravitationnel et la masse change pendant la combustion; le rapport n'est donc pas constant.

Contrôle mental. Situez mentalement le rapport autour de 1: en dessous de 1 le véhicule ne peut pas soutenir son poids dans le champ gravitationnel considéré; au-dessus de 1 une accélération ascendante devient possible.

Exercice guidé — rapport poussée-poids

Situation à reconnaître. Le rapport poussée-poids compare la poussée disponible au poids du véhicule dans un champ de gravité donné.

Vérification demandée. Situez mentalement le rapport autour de 1: en dessous de 1 le véhicule ne peut pas soutenir son poids dans le champ gravitationnel considéré; au-dessus de 1 une accélération ascendante devient possible.

Erreur à écarter. Le poids change avec le champ gravitationnel et la masse change pendant la combustion; le rapport n'est donc pas constant.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le rapport poussée-poids compare la poussée disponible au poids du véhicule dans un champ de gravité donné.

Test du cas

Situez mentalement le rapport autour de 1: en dessous de 1 le véhicule ne peut pas soutenir son poids dans le champ gravitationnel considéré; au-dessus de 1 une accélération ascendante devient possible.

Piège exclu

Le poids change avec le champ gravitationnel et la masse change pendant la combustion; le rapport n'est donc pas constant.

Conséquence opérationnelle

Le garde-fou associé à ce point est concret: Le poids change avec le champ gravitationnel et la masse change pendant la combustion; le rapport n'est donc pas constant.. Si ce risque apparaît, la valeur calculée ne doit pas être utilisée seule pour valider la configuration.

Propulsion : mini-leçons canoniques

Ces mini-leçons constituent la référence quantitative canonique du module. Les exemples numériques sont pédagogiques et doivent rester distingués des données de mission.

Accélération à partir de la force nette

$$a = (F_{\text{poussée}} - F_{\text{opposées}}) / m$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $a = (F_{\text{poussée}} - F_{\text{opposées}}) / m$ » dans le contexte de «Accélération à partir de la force nette» ?

2 — Intuition sans symboles

L'accélération dépend de la force qui reste réellement disponible une fois les oppositions retirées, rapportée à la masse à accélérer.

3 — Grandeurs

a : accélération ; F_poussée : poussée utile ; F_opposées : somme des forces opposées ; m : masse instantanée.

4 — Formule

$$a = (F_{\text{poussée}} - F_{\text{opposées}}) / m$$

5 — Lecture

Lire la relation « $a = (F_{\text{poussée}} - F_{\text{opposées}}) / m$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

a : accélération ; F_poussée : poussée utile ; F_opposées : somme des forces opposées ; m : masse instantanée.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

a en m/s^2 ; forces en N ; masse en kg.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

La deuxième loi de Newton s'applique à la force nette, pas à la poussée brute.

11 — Hypothèses

Axe unique, forces exprimées avec la même convention de signe et masse prise au même instant.

12 — Contrôle d'unités

a en m/s^2 ; forces en N ; masse en kg. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $F_{\text{poussée}} = 2,40 \text{ MN}$, $F_{\text{opposées}} = 0,60 \text{ MN}$ et $m = 300\,000 \text{ kg}$, $a = (2,40 - 0,60) \times 10^6 / 300\,000 = 6,00 \text{ m/s}^2$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La deuxième loi de Newton s'applique à la force nette, pas à la poussée brute.

15 — Contrôle algébrique

Le contrôle inverse $m \cdot a + F_{\text{opposées}}$ doit redonner la poussée initiale.

16 — Estimation mentale

Une force nette de 1,8 MN sur 0,3 million de kilogrammes donne immédiatement un ordre de grandeur de 6 m/s^2 .

17 — Interprétation

Le résultat mesure la capacité instantanée à modifier la vitesse dans l'axe étudié.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

À forces inchangées, une baisse de masse augmente l'accélération ; à masse inchangée, une hausse de force nette l'augmente proportionnellement.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $F_{\text{poussée}} = 2,60 \text{ MN}$, $F_{\text{opposées}} = 0,70 \text{ MN}$ et $m = 300\,000 \text{ kg}$. Calculez a.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Force nette = 1,90 MN = 1 900 000 N. $a = 1\,900\,000 / 300\,000 = 6,33 \text{ m/s}^2$.

Exercice autonome. $F_{\text{poussée}} = 2,20 \text{ MN}$, $F_{\text{opposées}} = 0,50 \text{ MN}$ et $m = 250\,000 \text{ kg}$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

Force nette = 1,70 MN. $a = 1\,700\,000 / 250\,000 = 6,80 \text{ m/s}^2$.

21 — Décision mission

Vérifier que l'accélération disponible reste compatible avec guidage, structure et trajectoire.

Poussée d'un moteur-fusée

$$F = \dot{m} V_e + A_e(p_e - p_0)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $F = \dot{m} V_e + A_e(p_e - p_0)$ » dans le contexte de «Poussée d'un moteur-fusée» ?

2 — Intuition sans symboles

La poussée vient principalement de la quantité de mouvement du jet et peut recevoir une contribution supplémentaire de la différence de pression à la sortie.

3 — Grandeurs

F : poussée ; $\dot{m}$: débit massique ; V_e : vitesse d'éjection ; A_e : aire de sortie ; p_e : pression de sortie ; p_0 : pression ambiante.

4 — Formule

$$F = \dot{m} V_e + A_e(p_e - p_0)$$

5 — Lecture

Lire la relation « $F = \dot{m} V_e + A_e(p_e - p_0)$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

F : poussée ; $\dot{m}$: débit massique ; V_e : vitesse d'éjection ; A_e : aire de sortie ; p_e : pression de sortie ; p_0 : pression ambiante.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

F en N ; $\dot{m}$ en kg/s ; V_e en m/s ; A_e en m² ; pressions en Pa.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Le premier terme est un flux de quantité de mouvement ; le second transforme une différence de pression appliquée sur une aire en force.

11 — Hypothèses

Régime représentatif du point de fonctionnement et grandeurs de sortie cohérentes avec le même environnement.

12 — Contrôle d'unités

F en N ; $\dot{m}$ en kg/s ; V_e en m/s ; A_e en m² ; pressions en Pa. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $\dot{m} = 250$ kg/s, $V_e = 3\,200$ m/s, $A_e = 1,20$ m² et $p_e - p_0 = 20\,000$ Pa, $F = 800\,000 + 24\,000 = 824\,000$ N = 824 kN.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le premier terme est un flux de quantité de mouvement ; le second transforme une différence de pression appliquée sur une aire en force.

15 — Contrôle algébrique

Chaque terme doit être en newtons et leur somme doit rester positive dans le cas moteur considéré.

16 — Estimation mentale

$250 \times 3\,200$ donne déjà 800 kN ; une correction de pression de 24 kN ne peut déplacer le total que de quelques pourcents.

17 — Interprétation

La formule montre pourquoi la poussée dépend à la fois du moteur et de la pression ambiante.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

À géométrie et pressions constantes, une hausse de $\dot{m}$ ou de V_e augmente directement la contribution de quantité de mouvement.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $\dot{m} = 240 \text{ kg/s}$, $V_e = 3\,300 \text{ m/s}$, $A_e = 1,10 \text{ m}^2$ et $p_e - p_0 = 15\,000 \text{ Pa}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$\dot{m}V_e = 792\,000 \text{ N}$; $A_e\Delta p = 16\,500 \text{ N}$; $F = 808\,500 \text{ N} = 808,5 \text{ kN}$.

Exercice autonome. $\dot{m} = 200 \text{ kg/s}$, $V_e = 3\,400 \text{ m/s}$, $A_e = 0,90 \text{ m}^2$ et $p_e - p_0 = 10\,000 \text{ Pa}$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$\dot{m}V_e = 680\,000 \text{ N}$; $A_e\Delta p = 9\,000 \text{ N}$; $F = 689\,000 \text{ N} = 689 \text{ kN}$.

21 — Décision mission

Évaluer la poussée au bon environnement avant de conclure sur accélération, marge ou dimensionnement.

Masse de propergol consommée

$$m_{\text{prop}} = \dot{m} \times \Delta t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_{\text{prop}} = \dot{m} \times \Delta t$ » dans le contexte de «Masse de propergol consommée» ?

2 — Intuition sans symboles

Un débit massique devient une masse totale lorsqu'on le multiplie par la durée pendant laquelle il s'écoule.

3 — Grandeurs

m_{prop} : masse consommée ; $\dot{m}$: débit massique moyen ; Δt : durée de fonctionnement.

4 — Formule

$$m_{\text{prop}} = \dot{m} \times \Delta t$$

5 — Lecture

Lire la relation « $m_{\text{prop}} = \dot{m} \times \Delta t$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

m_{prop} : masse consommée ; $\dot{m}$: débit massique moyen ; Δt : durée de fonctionnement.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

m_{prop} en kg ; $\dot{m}$ en kg/s ; Δt en s.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Le débit indique une quantité par seconde ; la multiplication par le nombre de secondes restitue la quantité totale.

11 — Hypothèses

Débit moyen représentatif et durée mesurée sur le même intervalle.

12 — Contrôle d'unités

m_{prop} en kg ; $\dot{m}$ en kg/s ; Δt en s. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $\dot{m} = 250 \text{ kg/s}$ pendant 150 s, $m_{\text{prop}} = 250 \times 150 = 37\,500 \text{ kg} = 37,5 \text{ t}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le débit indique une quantité par seconde ; la multiplication par le nombre de secondes restitue la quantité totale.

15 — Contrôle algébrique

Diviser la masse obtenue par la durée doit retrouver le débit moyen.

16 — Estimation mentale

Un quart de tonne par seconde pendant 150 s doit donner un peu moins de 40 tonnes.

17 — Interprétation

Le résultat fixe l'ordre de grandeur du propergol effectivement brûlé pendant la séquence.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

À durée fixe, la masse consommée varie proportionnellement au débit ; à débit fixe, elle varie proportionnellement au temps.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Un moteur consomme 420 kg/s pendant 125 s.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$m_{\text{prop}} = 420 \times 125 = 52\,500 \text{ kg} = 52,5 \text{ t.}$$

Exercice autonome. Un moteur consomme 300 kg/s pendant 90 s.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$m_{\text{prop}} = 300 \times 90 = 27\,000 \text{ kg} = 27,0 \text{ t.}$$

21 — Décision mission

Comparer cette consommation au propergol utilisable réellement embarqué, pas seulement à la capacité géométrique des réservoirs.

Impulsion spécifique à partir de la vitesse équivalente

$$I_{\text{sp}} = V_{\text{eq}} / g_0$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $I_{\text{sp}} = V_{\text{eq}} / g_0$ » dans le contexte de «Impulsion spécifique à partir de la vitesse équivalente» ?

2 — Intuition sans symboles

L'impulsion spécifique exprime la performance propulsive sous forme d'un temps de référence relié à la vitesse d'éjection équivalente.

3 — Grandeurs

I_{sp} : impulsion spécifique ; V_{eq} : vitesse d'éjection équivalente ; g_0 : accélération normale de référence.

4 — Formule

$$I_{\text{sp}} = V_{\text{eq}} / g_0$$

5 — Lecture

Lire la relation « $I_{\text{sp}} = V_{\text{eq}} / g_0$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

I_{sp} : impulsion spécifique ; V_{eq} : vitesse d'éjection équivalente ; g_0 : accélération normale de référence.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

I_{sp} en s ; V_{eq} en m/s ; $g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

- 10 — Pourquoi cette opération
Diviser une vitesse par une accélération donne un temps ; cette convention historique rend comparables des moteurs.
- 11 — Hypothèses
Vitesse équivalente et g_0 exprimées en unités SI cohérentes.
- 12 — Contrôle d'unités
 I_{sp} en s ; V_{eq} en m/s ; $g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
- 13 — Cas numérique
Avec $V_{eq} = 3\,200 \text{ m/s}$, $I_{sp} = 3\,200/9,80665 = 326,31 \text{ s}$.
- 14 — Pourquoi le calcul fonctionne
Diviser une vitesse par une accélération donne un temps ; cette convention historique rend comparables des moteurs.
- 15 — Contrôle algébrique
Le produit $I_{sp} \times g_0$ doit redonner V_{eq} .
- 16 — Estimation mentale
3 200 divisé par environ 10 donne un peu plus de 320 s.
- 17 — Interprétation
Une valeur plus élevée signifie davantage de vitesse équivalente par unité de poids de propergol de référence, pas une durée de combustion.
- 18 — Ce que le résultat ne prouve pas
Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.
- 19 — Sensibilité
 I_{sp} varie linéairement avec V_{eq} lorsque g_0 reste fixé.
- 20 — Exercices guidé et autonome
Exercice guidé. $V_{eq} = 3\,400 \text{ m/s}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$I_{sp} = 3\,400/9,80665 = 346,70 \text{ s}$ environ.

Exercice autonome. $V_{eq} = 3\,000 \text{ m/s}$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$I_{sp} = 3\,000/9,80665 = 305,91 \text{ s}$ environ.

- 21 — Décision mission
Utiliser la valeur correspondant au moteur et au régime réellement étudiés dans le budget de mission.

Équation idéale de Tsiolkovski

$$\Delta v = V_{eq} \ln(m_0 / m_f)$$

- 1 — Question concrète
Que permet de calculer « $\Delta v = V_{eq} \ln(m_0 / m_f)$ » dans le contexte de «Équation idéale de Tsiolkovski» ?
- 2 — Intuition sans symboles
Le gain idéal de vitesse augmente avec la qualité de l'éjection et avec le rapport entre masse avant et après combustion, mais ce dernier agit logarithmiquement.
- 3 — Grandeurs
 Δv : variation idéale de vitesse ; V_{eq} : vitesse d'éjection équivalente ; m_0 : masse initiale ; m_f : masse finale ; $\ln$: logarithme naturel.
- 4 — Formule
$$\Delta v = V_{eq} \ln(m_0 / m_f)$$

5 — Lecture

Lire la relation « $\Delta v = V_{eq} \ln(m_0 / m_f)$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

Δv : variation idéale de vitesse ; V_{eq} : vitesse d'éjection équivalente ; m_0 : masse initiale ; m_f : masse finale ;
 $\ln$: logarithme naturel.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Δv et V_{eq} en m/s ; m_0 et m_f dans la même unité de masse ; leur rapport est sans dimension.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

L'intégration de la conservation de quantité de mouvement d'une fusée à masse variable produit la dépendance logarithmique au rapport de masse.

11 — Hypothèses

Modèle idéal : vitesse d'éjection équivalente constante et pertes gravitationnelles, aérodynamiques et de pilotage exclues.

12 — Contrôle d'unités

Δv et V_{eq} en m/s ; m_0 et m_f dans la même unité de masse ; leur rapport est sans dimension. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $V_{eq} = 3\,200$ m/s, $m_0 = 100$ t et $m_f = 40$ t, $\Delta v = 3\,200 \times \ln(2,5) \approx 2\,932$ m/s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

L'intégration de la conservation de quantité de mouvement d'une fusée à masse variable produit la dépendance logarithmique au rapport de masse.

15 — Contrôle algébrique

L'inverse $m_0/m_f = \exp(\Delta v/V_{eq})$ doit retrouver le rapport de masse.

16 — Estimation mentale

$\ln(2,5)$ est un peu inférieur à 1 ; le Δv doit donc être légèrement inférieur à 3 200 m/s.

17 — Interprétation

Le résultat est un potentiel idéal ; la mission doit ajouter les pertes et marges réelles.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

Augmenter le rapport de masse aide, mais avec des rendements décroissants à cause du logarithme.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $V_{eq} = 3\,400$ m/s, $m_0 = 100$ t et $m_f = 50$ t.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Rapport = 2 ; $\ln(2) = 0,6931$; $\Delta v = 3\,400 \times 0,6931 \approx 2\,357$ m/s.

Exercice autonome. $V_{eq} = 3\,300$ m/s, $m_0 = 120$ t et $m_f = 45$ t.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

Rapport = 2,6667 ; $\ln \approx 0,9808$; $\Delta v \approx 3\,237$ m/s.

21 — Décision mission

Comparer le Δv idéal disponible au budget mission majoré des pertes et réserves.

Rapport de mélange et partage des débits

$$O/F = \dot{m}_{ox} / \dot{m}_{fuel} ; \dot{m}_{fuel} = \dot{m}_{total} / (1 + O/F)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $O/F = \dot{m}_{ox} / \dot{m}_{fuel} ; \dot{m}_{fuel} = \dot{m}_{total} / (1 + O/F)$ » dans le contexte de «Rapport de mélange et partage des débits» ?

2 — Intuition sans symboles

Le rapport oxydant/carburant fixe comment le débit total se partage entre les deux constituants.

3 — Grandeurs

O/F : rapport de mélange ; $\dot{m}_{ox}$: débit oxydant ; $\dot{m}_{fuel}$: débit carburant ; $\dot{m}_{total}$: somme des deux débits.

4 — Formule

$$O/F = \dot{m}_{ox} / \dot{m}_{fuel} ; \dot{m}_{fuel} = \dot{m}_{total} / (1 + O/F)$$

5 — Lecture

Lire la relation « $O/F = \dot{m}_{ox} / \dot{m}_{fuel} ; \dot{m}_{fuel} = \dot{m}_{total} / (1 + O/F)$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

O/F : rapport de mélange ; $\dot{m}_{ox}$: débit oxydant ; $\dot{m}_{fuel}$: débit carburant ; $\dot{m}_{total}$: somme des deux débits.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Les débits sont en kg/s ; O/F est sans dimension.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Avec $\dot{m}_{total} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{ox}$ et $\dot{m}_{ox} = (O/F)\dot{m}_{fuel}$, on obtient directement le partage.

11 — Hypothèses

Convention O/F clairement déclarée et débit total portant sur les mêmes flux.

12 — Contrôle d'unités

Les débits sont en kg/s ; O/F est sans dimension. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $\dot{m}_{total} = 450$ kg/s et $O/F = 3,5$, $\dot{m}_{fuel} = 450/4,5 = 100$ kg/s et $\dot{m}_{ox} = 350$ kg/s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Avec $\dot{m}_{total} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{ox}$ et $\dot{m}_{ox} = (O/F)\dot{m}_{fuel}$, on obtient directement le partage.

15 — Contrôle algébrique

La somme $100 + 350$ doit redonner 450 kg/s et $350/100$ doit redonner 3,5.

16 — Estimation mentale

Un rapport 3,5 signifie 4,5 parts totales, dont une part carburant.

17 — Interprétation

Le partage conditionne alimentation, réservoirs et stabilité du point de fonctionnement moteur.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

À débit total fixe, augmenter O/F diminue la fraction carburant et augmente la fraction oxydant.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $\dot{m}_{total} = 600$ kg/s et $O/F = 2,5$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$\dot{m}_{fuel} = 600/3,5 = 171,43 \text{ kg/s} ; \dot{m}_{ox} = 600 - 171,43 = 428,57 \text{ kg/s.}$$

Exercice autonome. $\dot{m}_{total} = 500$ kg/s et $O/F = 4,0$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = 500/5 = 100 \text{ kg/s} ; \dot{m}_{\text{ox}} = 400 \text{ kg/s}.$$

21 — Décision mission

Vérifier que les deux circuits peuvent fournir leurs débits cibles avec les marges prévues.

Rapport d'expansion de la tuyère

$$\varepsilon = A_e / A^*$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\varepsilon = A_e / A^*$ » dans le contexte de «Rapport d'expansion de la tuyère» ?

2 — Intuition sans symboles

Le rapport d'expansion compare la surface de sortie à la surface de gorge et décrit combien la tuyère s'élargit après la gorge.

3 — Grandeurs

ε : rapport d'expansion ; A_e : aire de sortie ; A^* : aire de gorge.

4 — Formule

$$\varepsilon = A_e / A^*$$

5 — Lecture

Lire la relation « $\varepsilon = A_e / A^*$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

ε : rapport d'expansion ; A_e : aire de sortie ; A^* : aire de gorge.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Aires dans la même unité, typiquement m^2 ; ε sans dimension.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Le quotient de deux aires décrit directement l'agrandissement géométrique relatif.

11 — Hypothèses

Aires prises sur les sections effectives correspondant à la même tuyère.

12 — Contrôle d'unités

Aires dans la même unité, typiquement m^2 ; ε sans dimension. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $A_e = 1,50 \text{ m}^2$ et $A^* = 0,10 \text{ m}^2$, $\varepsilon = 1,50/0,10 = 15$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le quotient de deux aires décrit directement l'agrandissement géométrique relatif.

15 — Contrôle algébrique

$A_e = \varepsilon A^*$ doit redonner $1,50 \text{ m}^2$.

16 — Estimation mentale

Une sortie quinze fois plus grande que la gorge donne un rapport égal à 15.

17 — Interprétation

Le rapport aide à comprendre l'adaptation de la tuyère aux conditions de pression, sans suffire à lui seul à prédire la performance.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

À gorge fixe, augmenter l'aire de sortie augmente ε linéairement.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $A_e = 2,40 \text{ m}^2$ et $A^* = 0,12 \text{ m}^2$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$\varepsilon = 2,40/0,12 = 20.$$

Exercice autonome. $A_e = 1,80 \text{ m}^2$ et $A^* = 0,15 \text{ m}^2$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$\varepsilon = 1,80/0,15 = 12.$$

21 — Décision mission

Associer le rapport d'expansion au domaine de pression prévu avant de valider une géométrie de tuyère.

Entraînement progressif

1. Expliquez sans équation quatre notions réellement utilisées dans « Fusées et moteurs: de Newton à l'équation de la fusée », puis indiquez pour chacune l'observation qui permet de la reconnaître.
2. Refaire le calcul avec valeurs déjà converties.
3. Recevoir des données inutiles et choisir lesquelles utiliser — module 04 · Entraînement progressif.
4. Diagnostiquer un résultat volontairement faux.
5. Prendre une décision dans la scène mission en explicitant marge et limite — module 04 · Entraînement progressif.

Gate zéro prérequis

- Avant tout calcul de « Fusées et moteurs: de Newton à l'équation de la fusée », vérifiez que vous pouvez nommer la grandeur recherchée, l'unité attendue et le phénomène qu'elle représente.
- Je sais lire la relation et les unités — « module 04 ».
- Je sais faire un ordre de grandeur.
- Je sais expliquer une erreur fréquente.
- Je peux refaire un exercice sans copier le résultat — « module 04 ».

1. Force, accélération et quantité de mouvement

Une force s'exprime en newtons, symbole **N**. Avec la relation $F = ma$, une force F appliquée à une masse m produit une accélération a . Le moteur ne « crée » pourtant pas une force à partir de rien: il transforme énergie chimique ou autre en énergie d'un jet. Le système complet — fusée + gaz éjectés — conserve la quantité de mouvement.

Pour une fusée en vol, plusieurs forces se superposent: poussée, poids, **traînée** aérodynamique et parfois **portance**. Au décollage vertical, la poussée doit dépasser le poids pour accélérer vers le haut. Mais un rapport poussée/poids très élevé n'est pas automatiquement optimal: structure, charges, contrôle et consommation entrent dans le compromis.

Lire une fusée comme un diagramme de forces

À un instant donné, l'accélération résulte de la somme vectorielle des forces. Pour une montée verticale simplifiée, on peut écrire $a = (F - mg - D)/m$. Le symbole a désigne l'accélération en m/s^2 ; F la poussée en newtons; m la masse instantanée en kilogrammes; g l'accélération de la pesanteur en m/s^2 ; D la traînée en newtons. La masse diminue pendant la combustion: le même moteur peut donc produire une accélération plus forte en fin de brûlage qu'au début. Cette relation explique aussi pourquoi le rapport poussée/poids n'est qu'un instantané. Un étage doit rester contrôlable lorsque la poussée monte, quand la **pression dynamique** atteint son maximum et quand la masse propulsive devient faible. L'exercice utile consiste à recalculer a pour trois masses et à repérer quelle contrainte devient dominante.

2. La poussée d'un moteur-fusée

NASA Glenn donne l'équation générale $F = \dot{m}V_e + A_e(p_e - p_0)$. Le symbole $\dot{m}$, « m point », est le débit massique en kg/s; V_e est la vitesse des gaz à la sortie en m/s; A_e l'aire de sortie en m²; p_e la pression de sortie et p_0 la pression extérieure, en pascals.

Le premier terme est la poussée de quantité de mouvement. Le second est une correction de pression. Dans le vide, p_0 devient très faible; au niveau de la mer, elle vaut environ 101 kPa. Une tuyère est donc optimisée pour certaines conditions et peut être sous-détendue ou sur-détendue ailleurs.

Exercice guidé A

Un moteur éjecte 250 kg/s avec une vitesse équivalente de 3 200 m/s. En négligeant le terme de pression, calculez la poussée.

Correction: $F = \dot{m}V = 250 \times 3\,200 = 800\,000\text{ N} = 800\text{ kN}$. Le **préfixe k** signifie mille: 800 kN = 800 000 N.

Données du cas

Exercice guidé A — Un moteur éjecte 250 kg/s avec une vitesse équivalente de 3 200 m/s. En négligeant le terme de pression, calculez la poussée.

Relation

Correction: $F = \dot{m}V = 250 \times 3\,200 = 800\,000\text{ N} = 800\text{ kN}$.

Raisonnement

Correction: $F = \dot{m}V = 250 \times 3\,200 = 800\,000\text{ N} = 800\text{ kN}$. Le préfixe k signifie mille: 800 kN = 800 000 N.

Résultat

$F = \dot{m}V = 250 \times 3\,200 = 800\,000\text{ N} = 800\text{ kN}$.

Interprétation

Le préfixe k signifie mille: 800 kN = 800 000 N.

3. Pourquoi la gorge et la tuyère comptent

La chambre porte un gaz chaud à forte pression. À la gorge, section minimale, l'écoulement peut devenir sonique: **Mach 1**. La partie divergente de la tuyère accélère ensuite un écoulement supersonique en convertissant une partie de l'énergie thermique et de pression en vitesse dirigée. Le rapport entre aire de sortie et aire de gorge influence pression, vitesse et adaptation à l'environnement.

Une grande tuyère de vide cherche une forte détente, mais devient volumineuse. Un moteur de premier étage doit aussi fonctionner dans une atmosphère dense. C'est pourquoi deux moteurs utilisant les mêmes ergols peuvent avoir des géométries de tuyère différentes selon l'étage.

Tuyère: transformer pression en vitesse sans oublier l'environnement

La gorge impose un débit étranglé lorsque les conditions le permettent; l'écoulement accélère ensuite dans la partie divergente. Une grande aire de sortie favorise l'expansion en **altitude**, mais une tuyère très expansée au niveau de la mer peut subir séparation d'écoulement et charges latérales. L'ingénieur distingue donc pression de chambre, rapport d'aires et pression ambiante. Le rapport d'expansion $\epsilon = A_e/A^*$ compare l'aire de sortie A_e à l'aire de gorge A^* , toutes deux en m²: ϵ est sans dimension. Une valeur plus grande n'est pas automatiquement meilleure; elle déplace le point d'adaptation de la tuyère. Pour un étage supérieur, le vide autorise des géométries différentes de celles d'un premier étage. Cette simple observation relie thermodynamique, structure et architecture du lanceur.

4. Impulsion spécifique: efficacité, pas puissance

L'impulsion spécifique, **Isp**, s'exprime en secondes. NASA Glenn la relie à une vitesse équivalente par $Isp = V_{eq}/g_0$, avec $g_0 \approx 9,80665\text{ m/s}^2$. Un Isp élevé signifie qu'une même masse de **propergol** peut produire davantage d'impulsion. Il ne dit pas que le moteur possède nécessairement une forte poussée. Un moteur électrique peut avoir un Isp très élevé mais une poussée faible; un moteur chimique de lancement a besoin d'une forte poussée pour lutter contre le poids.

Exercice guidé B

Avec $V_{eq} = 3\,200\text{ m/s}$, estimez I_{sp} .

$I_{sp} = 3\,200 \div 9,80665 \approx 326\text{ s}$. Le symbole « $\div$ » signifie diviser. Cette valeur représente une performance propulsive, pas une durée de fonctionnement.

Données du cas

Exercice guidé B — Avec $V_{eq} = 3\,200\text{ m/s}$, estimez I_{sp} .

Relation

$$I_{sp} = 3\,200 \div 9,80665 \approx 326\text{ s}.$$

Raisonnement

$I_{sp} = 3\,200 \div 9,80665 \approx 326\text{ s}$. Le symbole « $\div$ » signifie diviser. Cette valeur représente une performance propulsive, pas une durée de fonctionnement.

Résultat

$$I_{sp} = 3\,200 \div 9,80665 \approx 326\text{ s}.$$

Interprétation

Le symbole « $\div$ » signifie diviser.

5. L'équation de la fusée: pourquoi la masse de propergol devient vite énorme

L'équation idéale de Tsiolkovski s'écrit $\Delta v = V_{eq} \ln(m_0/m_f)$. Δv est la variation idéale de vitesse en m/s; V_{eq} la vitesse équivalente; m_0 la masse initiale; m_f la masse finale après consommation; $\ln$ le [logarithme](#) naturel. Le rapport m_0/m_f est le rapport de masse.

La présence du logarithme explique pourquoi « ajouter deux fois plus de vitesse » ne demande pas simplement deux fois plus de propergol. Pour obtenir davantage de Δv , on transporte du propergol qui doit lui-même être accéléré au début de la manœuvre. Les étages permettent de jeter structure et moteurs devenus inutiles, améliorant le rapport de masse de la partie encore active.

Exercice guidé C

Une étape a $m_0 = 100\text{ t}$, $m_f = 40\text{ t}$ et $V_{eq} = 3\,200\text{ m/s}$. Calculez le Δv idéal.

$m_0/m_f = 2,5$. $\ln(2,5) \approx 0,916$. $\Delta v \approx 3\,200 \times 0,916 \approx 2\,930\text{ m/s}$. Ce résultat ne retrace ni pertes gravitationnelles ni traînée ni réserves.

Données du cas

Exercice guidé C — Une étape a $m_0 = 100\text{ t}$, $m_f = 40\text{ t}$ et $V_{eq} = 3\,200\text{ m/s}$. Calculez le Δv idéal.

Relation

$$m_0/m_f = 2,5.$$

Raisonnement

$m_0/m_f = 2,5$. $\ln(2,5) \approx 0,916$. $\Delta v \approx 3\,200 \times 0,916 \approx 2\,930\text{ m/s}$. Ce résultat ne retrace ni pertes gravitationnelles ni traînée ni réserves.

Résultat

$$m_0/m_f = 2,5.$$

Interprétation

Ce résultat ne retrace ni pertes gravitationnelles ni traînée ni réserves.

Équation de Tsiolkovski: le piège exponentiel

L'équation $\Delta v = v_e \ln(m_0/m_1)$ relie la variation idéale de vitesse Δv à la vitesse effective d'éjection v_e et au rapport de masse entre m_0 , masse avant combustion, et m_1 , masse après combustion. Δv et v_e s'expriment en m/s; le logarithme naturel $\ln$ porte sur un rapport sans unité. Si v_e vaut $3\,400\text{ m/s}$ et si l'on demande $3\,000\text{ m/s}$ de Δv idéal, le rapport m_0/m_1 vaut $\exp(3000/3400) \approx 2,42$. Cela signifie que la masse initiale doit être environ 2,42 fois la masse finale, avant même d'ajouter les pertes gravitationnelles ou aérodynamiques. Les étages existent parce qu'abandonner structure, réservoirs et moteurs devenus inutiles permet de réinitialiser ce rapport de masse au cours du vol.

6. De la formule au moteur réel

Un moteur réel ajoute injecteurs, chambre, allumage, [turbopompes](#) ou [pressurisation](#), refroidissement, valves, alimentation, contrôle du mélange et mécanismes d'orientation. Un cycle à générateur de gaz, un staged-combustion ou un expander cycle ne distribuent pas de la même manière l'énergie aux turbomachines. L'architecture dépend des ergols, de la pression de chambre, de la réutilisation, du nombre d'allumages et des marges de stabilité de combustion.

Une panne n'est donc pas seulement « moteur éteint ». [Cavitation](#) à l'entrée d'une pompe, oscillation de combustion, fuite, température de paroi, mauvaise position de vanne ou perte de capteur peuvent dégrader la poussée. L'ingénierie consiste à mesurer ces états, définir des limites et décider quand continuer, réduire la poussée ou couper.

7. Vérification de fin de module

- Expliquez pourquoi une fusée fonctionne dans le vide.
- Donnez l'unité de $\dot{m}$, V_e , pression et poussée.
- Expliquez la différence entre poussée et I_{sp} .
- Refaites l'exercice C avec $m_f = 50$ t et comparez.
- Dites pourquoi une grande tuyère de vide peut être peu pratique au décollage.

Calculateurs associés

Mettre en pratique ce module avec:

- [Calculateur de budget \$\Delta v\$ — équation idéale de Tsiolkovski](#)

8. Pression de chambre, débit et dimensionnement: lire les causalités

Augmenter la pression de chambre peut améliorer les performances d'une tuyère et réduire certaines dimensions pour une poussée donnée, mais cela augmente aussi les contraintes mécaniques, les températures et la puissance demandée aux systèmes d'alimentation. Une valeur de pression n'est donc jamais « meilleure » isolément. Il faut demander comment le réservoir, les [turbopompes](#), les injecteurs, la chambre, le refroidissement et la tuyère supportent ensemble ce niveau de fonctionnement.

Le débit massique relie directement le moteur à ses réservoirs. Si $\dot{m} = 250$ kg/s et qu'un allumage dure 150 s, la masse consommée vaut $m = \dot{m}\Delta t = 37\,500$ kg, soit 37,5 t, en supposant le débit constant. Ce calcul simple permet de vérifier immédiatement si un nombre de réservoir ou une durée de combustion est plausible.

Exercice D — consommation

Un moteur consomme 420 kg/s pendant 125 s. Calculez la masse de propergol consommée. Puis supposez que 3 % du propergol embarqué doit rester inutilisable ou réservé: quelle masse embarquer au minimum pour couvrir seulement cette combustion?

Consommation: $420 \times 125 = 52\,500$ kg. Si cette masse représente 97 % de l'embarqué, masse minimale = $52\,500 \div 0,97 \approx 54\,124$ kg. Cela ne comprend pas les autres allumages ni les réserves de mission.

Données du cas

Exercice D — consommation — Un moteur consomme 420 kg/s pendant 125 s. Calculez la masse de propergol consommée. Puis supposez que 3 % du propergol embarqué doit rester inutilisable ou réservé: quelle masse embarquer au minimum pour couvrir seulement cette combustion?

Relation

Consommation: $420 \times 125 = 52\,500$ kg.

Raisonnement

Consommation: $420 \times 125 = 52\,500$ kg. Si cette masse représente 97 % de l'embarqué, masse minimale = $52\,500 \div 0,97 \approx 54\,124$ kg. Cela ne comprend pas les autres allumages ni les réserves de mission.

Résultat

Consommation: $420 \times 125 = 52\,500$ kg.

Interprétation

Cela ne comprend pas les autres allumages ni les réserves de mission.

9. Rapport de mélange: deux réservoirs qui doivent finir ensemble

Un moteur bi-ergol consomme carburant et comburant selon un rapport de mélange. Si le rapport O/F vaut 3,5, cela signifie ici 3,5 kg de comburant pour 1 kg de carburant. Sur 450 kg/s de débit total, la part carburant vaut $450/(1+3,5) = 100$ kg/s et la part comburant 350 kg/s. Ce partage dimensionne pompes, injecteurs et volumes de réservoirs après prise en compte des densités.

Un écart de rapport de mélange modifie la température de flamme, la composition des gaz, la performance et les marges thermiques. C'est pourquoi la mesure des débits et pressions fait partie de la santé du moteur, pas seulement de la comptabilité de propergol.

Rapport de mélange et vidange synchronisée

Le rapport de mélange peut être défini comme $O/F = \dot{m}_{ox}/\dot{m}_{fuel}$, c'est-à-dire le débit massique d'oxydant divisé par celui du combustible. Les deux débits s'expriment en kg/s, donc O/F est sans unité. Si un moteur consomme 600 kg/s avec $O/F = 2,5$, alors $\dot{m}_{fuel} = 600/(1+2,5) \approx 171,4$ kg/s et $\dot{m}_{ox} \approx 428,6$ kg/s. Pour une combustion de 180 s, les consommations idéales sont respectivement environ 30,9 t et 77,1 t. Le calcul de réservoir ne s'arrête pas là: il faut intégrer résidus non aspirables, marge de guidage, refroidissement éventuel, transitoires d'allumage et d'arrêt. Une mauvaise synchronisation peut laisser beaucoup d'un ergol inutilisable tandis que l'autre est épuisé.

10. Refroidir une chambre qui produit sa propre destruction potentielle

Les gaz de combustion peuvent être plus chauds que ce que la paroi supporterait durablement. Plusieurs stratégies existent: refroidissement régénératif en faisant circuler un ergol dans des canaux de paroi, film de refroidissement, matériaux ablatifs sur certaines architectures, ou combinaison. Le refroidissement régénératif récupère de l'énergie mais ajoute conduites, pertes de charge et risques de fuite.

Un moteur réutilisable doit gérer des cycles thermiques répétés. Le problème n'est plus seulement « ne pas fondre une fois », mais éviter fatigue, fissures, érosion et variation de performance sur de nombreux allumages.

Le refroidissement est un bilan de flux thermique

Une chambre de combustion peut contenir des gaz à des températures supérieures à la limite admissible du métal. La paroi survit parce que le transfert de chaleur vers elle est limité et qu'un moyen évacue ce flux: régénération par ergol, film, rayonnement ou combinaison de techniques. On raisonne en flux thermique q'' exprimé en W/m^2 , c'est-à-dire watts par mètre carré. Une zone deux fois plus chargée thermiquement n'a pas seulement besoin de deux fois plus de matériau: conductivité, épaisseur, température du fluide et contraintes mécaniques évoluent ensemble. Une inspection après essai cherche donc fissures, érosion, points chauds et changements de débit. Un moteur réutilisable ajoute une question de fatigue: une paroi qui résiste une fois peut accumuler des dommages à chaque cycle thermique.

11. Trois familles de cycles à reconnaître sans apprendre un catalogue

Dans un moteur à générateur de gaz, une fraction des ergols alimente une combustion séparée qui entraîne les turbopompes; ses gaz peuvent être rejetés sans passer par la chambre principale. Dans un cycle à combustion étagée, les gaz du prébrûleur rejoignent la chambre principale, ce qui peut augmenter l'efficacité mais impose des pressions et une intégration difficiles. Dans un cycle expander, un ergol chauffé par le refroidissement du moteur entraîne la turbine; la puissance disponible est alors liée au transfert thermique.

Le but de ce niveau n'est pas de retenir quel moteur historique utilise quel cycle, mais de savoir poser trois questions: où l'énergie de la pompe est-elle prise? où vont les gaz ayant entraîné la turbine? quelle contrainte principale limite l'architecture?

12. Atelier de diagnostic: le moteur pousse moins que prévu

Supposons une poussée mesurée 5 % sous la valeur attendue. Plusieurs causes sont possibles: débit inférieur, vitesse d'éjection effective plus faible, pression de chambre anormale, pression de sortie différente, mesure erronée, ou commande de mélange décalée. Une démarche d'ingénierie ne remplace pas immédiatement le moteur: elle compare les capteurs indépendants, vérifie les bilans de masse, cherche la cohérence entre pressions amont/aval et examine si l'écart est transitoire ou stable.

Cette démarche introduit une habitude fondamentale de la Space Academy: **ne jamais confondre symptôme et cause**. Une poussée faible est un symptôme; la cause doit être démontrée.

Diagnostic: séparer perte de poussée et erreur de mesure

Si la poussée mesurée baisse de 5 %, plusieurs causes restent compatibles: débit massique plus faible, vitesse d'éjection réduite, pression de chambre anormale, mélange incorrect ou capteur de force mal étalonné. Le diagnostic commence par des grandeurs indépendantes. Une mesure de débit peut être comparée aux variations de masse des réservoirs; la pression de chambre et les températures donnent d'autres indices. La relation $F \approx \dot{m}v_e$ permet un premier bilan: si $\dot{m}$ baisse de 3 % et v_e de 2 %, la baisse combinée de poussée est de l'ordre de 5 % au premier ordre. Mais une corrélation n'est pas une preuve de cause. Le banc d'essai doit conserver assez de **télémétrie** pour reconstruire l'événement et vérifier le capteur avant de modifier le moteur.

Rendre le diagnostic falsifiable

Un bon diagnostic propose des hypothèses que les mesures peuvent réellement éliminer. Si la poussée baisse mais que la pression de chambre reste nominale, une perte importante de débit devient moins probable et l'on examine davantage mesure de poussée, efficacité de tuyère ou conditions ambiantes. Si pression et débit chutent ensemble, alimentation et **turbopompes** deviennent prioritaires. L'essai doit donc conserver une chaîne d'étalonnage connue, des mesures redondantes lorsque la criticité le justifie et une synchronisation temporelle suffisante pour comparer les transitoires. Le but n'est pas de collecter le maximum de données mais les observables qui distinguent les causes. Cette logique prépare directement aux essais de qualification, où une anomalie doit conduire à une décision argumentée: accepter, réparer, modifier, limiter le domaine d'emploi ou recommencer l'essai.

13. Mini-projet — dimensionner un étage idéal avant d'ouvrir un logiciel

Choisissez une masse finale de 20 t, un V_{eq} de 3 400 m/s et un objectif idéal de Δv de 3 000 m/s. Inversez l'équation de Tsiolkovski: $m_0/m_f = \exp(\Delta v/V_{eq})$. Calculez le rapport de masse, puis m_0 et la masse de propergol idéale. Ensuite ajoutez volontairement 10 % de Δv de marge et observez combien la masse initiale augmente. Cette comparaison montre que la marge de vitesse n'est jamais gratuite.

Pour aller plus loin: un vrai dimensionnement doit ajouter pertes gravitationnelles, traînée, performances variables, masse résiduelle, **ullage**, réserves, structure, moteurs et contraintes de trajectoire. Le modèle idéal est un outil de compréhension et de contrôle d'ordre de grandeur.

Du Δv idéal au dimensionnement d'un étage

Dans un mini-projet réaliste, le Δv issu de Tsiolkovski n'est que le premier niveau. On ajoute ensuite une estimation des pertes, une masse sèche, une masse de charge utile et une réserve de propergol. Supposons qu'un étage doive fournir 3,5 km/s idéal avec $v_e = 3,4$ km/s: le rapport de masse vaut $\exp(3,5/3,4) \approx 2,80$. Si la masse finale après combustion est 40 t, la masse initiale idéale vaut environ 112 t et le propergol environ 72 t. Si la structure et le moteur occupent déjà 18 t, il ne reste que 22 t pour charge utile et autres équipements dans la masse finale. Ce type de fermeture révèle immédiatement si une performance moteur séduisante conduit ou non à un étage viable.

Studio d'ingénierie — fermer un bilan de propulsion

On prend un étage qui doit fournir 3 200 m/s de Δv , avec une impulsion spécifique I_{sp} de 360 s. L'équation de Tsiolkovski donne le rapport de masse $R = \exp(\Delta v / (g_0 \cdot I_{sp}))$. Ici $g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$ est l'accélération normale de référence, $\Delta v = 3\,200 \text{ m/s}$ et $I_{sp} = 360 \text{ s}$; $R \approx \exp(3200 / (9,80665 \times 360)) \approx 2,48$. Si la masse finale, après combustion, vaut 8,0 t, la masse initiale idéale vaut donc environ 19,8 t et le propergol idéal environ 11,8 t. Ce résultat n'est pas un devis de véhicule: il ne contient ni réserve, ni pertes gravitationnelles, ni pertes aérodynamiques, ni ergols résiduels. Il sert à comprendre pourquoi quelques centaines de mètres par seconde supplémentaires peuvent coûter beaucoup de masse.

Le mini-projet impose ensuite une anomalie: la poussée mesurée est 5 % plus faible que prévu. L'élève doit distinguer ce qui change immédiatement — accélération et durée de combustion — de ce qui ne change pas directement — l'impulsion spécifique si le défaut vient seulement d'une limitation de débit parfaitement proportionnelle. Il doit proposer les données à examiner: pression de chambre, débits, rapport de mélange, températures et position des vannes, puis définir un critère d'arrêt avant que la marge d'atterrissage ou de séparation soit consommée.

Exercice de sensibilité — pourquoi quelques secondes d'impulsion spécifique peuvent changer le véhicule entier

L'équation de Tsiolkovski est **exponentielle** par rapport au rapport entre Δv et vitesse d'éjection. Une amélioration modeste de l'impulsion spécifique ne réduit donc pas le propergol du même pourcentage pour toutes les missions. Recalcule un même Δv avec une vitesse d'éjection donnée, puis avec une valeur supérieure de 5 %, et compare les rapports de masse plutôt que seulement les pourcentages de propergol. On apprend ainsi que la sensibilité dépend de la zone de la courbe où se trouve le projet.

Inverse ensuite le raisonnement: garde le rapport de masse constant et calcule le Δv supplémentaire permis. Cette seconde lecture montre pourquoi performance du moteur, masse sèche, réservoirs et étagement doivent être arbitrés ensemble. Une impulsion spécifique plus élevée n'est pas automatiquement meilleure si elle exige un moteur plus lourd, un refroidissement complexe ou des conditions d'emploi plus contraignantes.

Sources et références

Sources et approfondissement

NASA Glenn — Rocket Thrust Equation · NASA Glenn — Specific Impulse · NASA — Rockets Rock Module. Ces ressources sont utilisées comme points d'ancrage; les exercices Delta-Sierra ci-dessus sont originaux.

Matrice de compétences FR ↔ EN

#	Français	English	Statut
01	Accélération à partir de la force nette	Acceleration from net force	PASS
02	Poussée d'un moteur-fusée	Rocket-engine thrust	PASS
03	Masse de propergol consommée	Propellant mass consumed	PASS
04	Impulsion spécifique à partir de la vitesse équivalente	Specific impulse from equivalent exhaust velocity	PASS
05	Équation idéale de Tsiolkovski	Ideal Tsiolkovsky rocket equation	PASS
06	Rapport de mélange et partage des débits	Mixture ratio and flow split	PASS
07	Rapport d'expansion de la tuyère	Nozzle expansion ratio	PASS

Termes de la progression. [rapport poussée-poids](#)