

De la Terre à la Lune: énergie, fenêtres et rendez-vous

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — De la Terre à la Lune: énergie, fenêtres et rendez-vous: comment « Lire un budget de delta-v » agit-il sur « Comprendre l'équation de Tsiolkovski sans la transformer en magie », et quel repère issu de « Arriver ne signifie pas être capturé » permet de vérifier la décision?

Intuition. Le symbole Δv , « delta-v », désigne une variation de vitesse exprimée en m/s ou km/s. Il ne représente pas directement la vitesse du véhicule: c'est un budget d'impulsions nécessaires pour modifier l'orbite.

1

Lire un budget de delta-v

Le symbole Δv , « delta-v », désigne une variation de vitesse exprimée en m/s ou km/s.

2

Comprendre l'équation de Tsiolkovski sans la transformer en magie

L'équation idéale des fusées s'écrit $\Delta v = v_e \ln(m_0 / m_f)$.

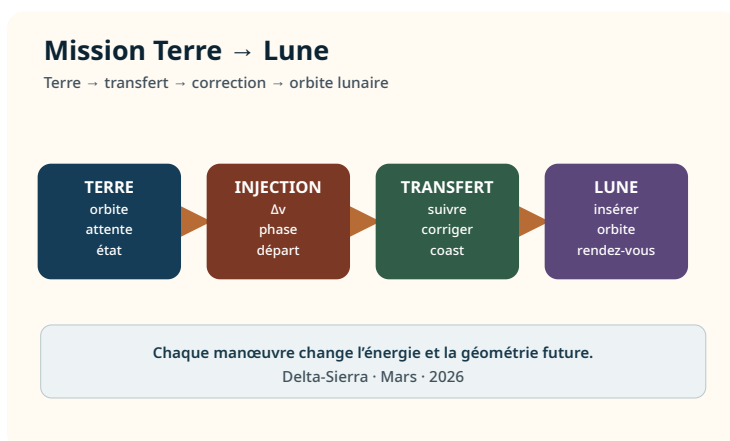
3

Arriver ne signifie pas être capturé

À proximité de la Lune, un véhicule hyperbolique ne s'arrête pas spontanément.

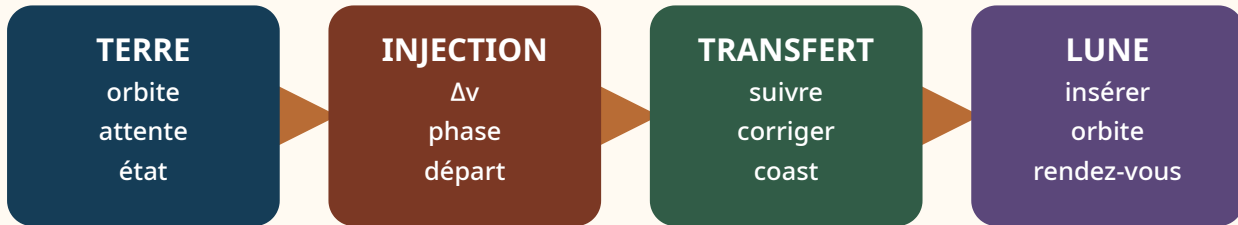
Repère concret. Le symbole Δv , « delta-v », désigne une variation de vitesse exprimée en m/s ou km/s.

- Lire un budget de delta-v — Le symbole Δv , « delta-v », désigne une variation de vitesse exprimée en m/s ou km/s.
- Comprendre l'équation de Tsiolkovski sans la transformer en magie — L'équation idéale des fusées s'écrit $\Delta v = v_e \ln(m_0 / m_f)$.
- Arriver ne signifie pas être capturé — À proximité de la Lune, un véhicule hyperbolique ne s'arrête pas spontanément.



Mission Terre → Lune

Terre → transfert → correction → orbite lunaire



Chaque manœuvre change l'énergie et la géométrie future.

Delta-Sierra · Mars · 2026

Un trajet Terre–Lune est une succession de changements d'énergie et de géométrie, pas une ligne droite dans l'espace.

La Lune est assez proche pour que la lumière y parvienne en un peu plus d'une seconde, mais assez loin pour obliger à raisonner en [mécanique orbitale](#). Ce module relie les notions d'orbite du module 05 à une mission complète: départ de l'orbite terrestre, transfert, corrections, arrivée, insertion et rendez-vous. Les nombres proposés sont pédagogiques; ils servent à apprendre à fermer un raisonnement et non à reproduire le plan de vol d'une mission réelle.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 06

Comprendre avant de calculer

Une mission quitte l'orbite terrestre, vise la Lune, doit arriver au bon moment puis réduire sa [vitesse relative](#) pour être capturée ou se placer sur une trajectoire de survol.

Progression du module — sphère d'influence; injection translunaire; capture lunaire; retour libre.

sphère d'influence

Définition. La sphère d'influence est une approximation permettant de découper un problème multi-corps en régions où un corps domine le calcul orbital simplifié.

Exemple. Une trajectoire Terre-Lune peut être approximée par des arcs dominés par la Terre puis par la Lune, même si la gravité des deux agit en permanence.

Piège. La frontière n'est pas un mur physique; l'attraction ne change pas brutalement en la traversant.

Contrôle mental. La [sphère d'influence](#) est une frontière d'approximation, pas un mur physique: les forces ne s'annulent pas brutalement lorsque le véhicule la franchit.

Exercice guidé — sphère d'influence

Situation à reconnaître. La sphère d'influence est une approximation permettant de découper un problème multi-corps en régions où un corps domine le calcul orbital simplifié.

Vérification demandée. La sphère d'influence est une frontière d'approximation, pas un mur physique: les forces ne s'annulent pas brutalement lorsque le véhicule la franchit.

Erreur à écarter. La frontière n'est pas un mur physique; l'attraction ne change pas brutalement en la traversant.

Corrigé raisonné

Sens précis

La sphère d'influence est une approximation permettant de découper un problème multi-corps en régions où un corps domine le calcul orbital simplifié.

Test du cas

La sphère d'influence est une frontière d'approximation, pas un mur physique: les forces ne s'annulent pas brutalement lorsque le véhicule la franchit.

Piège exclu

La frontière n'est pas un mur physique; l'attraction ne change pas brutalement en la traversant.

Conséquence opérationnelle

Une trajectoire Terre-Lune peut être approximée par des arcs dominés par la Terre puis par la Lune, même si la gravité des deux agit en permanence.

injection translunaire

Définition. L'injection translunaire est une manœuvre qui place un véhicule depuis une orbite terrestre sur une trajectoire atteignant la région lunaire.

Exemple. La direction et le moment du burn déterminent où la trajectoire coupe l'orbite de la Lune plusieurs jours plus tard.

Piège. Atteindre la distance lunaire n'est pas suffisant: la Lune doit être au bon endroit à l'arrivée.

Contrôle mental. Après l'injection, l'énergie orbitale doit avoir augmenté et l'apogée s'élever vers la distance lunaire; l'inverse indique un mauvais sens de burn ou une mauvaise convention.

Exercice guidé — injection translunaire

Situation à reconnaître. L'injection translunaire est une manœuvre qui place un véhicule depuis une orbite terrestre sur une trajectoire atteignant la région lunaire.

Vérification demandée. Après l'injection, l'énergie orbitale doit avoir augmenté et l'apogée s'élever vers la distance lunaire; l'inverse indique un mauvais sens de burn ou une mauvaise convention.

Erreur à écarter. Atteindre la distance lunaire n'est pas suffisant: la Lune doit être au bon endroit à l'arrivée.

Corrigé raisonné

Sens précis

L'injection translunaire est une manœuvre qui place un véhicule depuis une orbite terrestre sur une trajectoire atteignant la région lunaire.

Test du cas

Après l'injection, l'énergie orbitale doit avoir augmenté et l'apogée s'élever vers la distance lunaire; l'inverse indique un mauvais sens de burn ou une mauvaise convention.

Piège exclu

Atteindre la distance lunaire n'est pas suffisant: la Lune doit être au bon endroit à l'arrivée.

Conséquence opérationnelle

L'usage de cette notion en mission exige un second regard: Atteindre la distance lunaire n'est pas suffisant: la Lune doit être au bon endroit à l'arrivée.. Ce point transforme la notion théorique en règle de validation avant engagement du système.

capture lunaire

Définition. Une capture lunaire transforme une arrivée non liée ou de survol en orbite liée autour de la Lune, généralement par propulsion ou architecture dynamique particulière.

Exemple. Un burn rétrograde près du [périapside](#) lunaire peut réduire l'énergie relative et créer une ellipse liée.

Piège. Freiner trop peu laisse le véhicule repartir; freiner trop ou au mauvais endroit peut produire une orbite non souhaitée ou un impact.

Contrôle mental. Une capture exige de retirer assez d'énergie relative à la Lune: sans freinage ou mécanisme équivalent, une arrivée hyperbolique ne devient pas spontanément une orbite liée.

Exercice guidé — capture lunaire

Situation à reconnaître. Une capture lunaire transforme une arrivée non liée ou de survol en orbite liée autour de la Lune, généralement par propulsion ou architecture dynamique particulière.

Vérification demandée. Une capture exige de retirer assez d'énergie relative à la Lune: sans freinage ou mécanisme équivalent, une arrivée hyperbolique ne devient pas spontanément une orbite liée.

Erreur à écarter. Freiner trop peu laisse le véhicule repartir; freiner trop ou au mauvais endroit peut produire une orbite non souhaitée ou un impact.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une capture lunaire transforme une arrivée non liée ou de survol en orbite liée autour de la Lune, généralement par propulsion ou architecture dynamique particulière.

Test du cas

Une capture exige de retirer assez d'énergie relative à la Lune: sans freinage ou mécanisme équivalent, une arrivée hyperbolique ne devient pas spontanément une orbite liée.

Piège exclu

Freiner trop peu laisse le véhicule repartir; freiner trop ou au mauvais endroit peut produire une orbite non souhaitée ou un impact.

Conséquence opérationnelle

Pour ce point, la décision doit rester compatible avec le test suivant: Une capture exige de retirer assez d'énergie relative à la Lune: sans freinage ou mécanisme équivalent, une arrivée hyperbolique ne devient pas spontanément une orbite liée.. Une incohérence conduit à suspendre la conclusion et à contrôler unités, hypothèses ou capteurs concernés.

Quantification

capture lunaire: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

capture lunaire: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

retour libre

Définition. Une trajectoire de retour libre est conçue pour que la dynamique gravitationnelle ramène naturellement le véhicule vers la Terre après un passage lunaire si aucune manœuvre majeure n'est effectuée.

Exemple. Certaines architectures Apollo utilisaient des géométries offrant une capacité de retour importante en cas de panne.

Piège. Retour libre ne signifie pas retour sans navigation, correction ni contraintes d'entrée atmosphérique.

Contrôle mental. La géométrie doit ramener la trajectoire vers la Terre même sans propulsion majeure après le passage lunaire; vérifiez ce caractère passif dans le schéma avant les chiffres.

Exercice guidé — retour libre

Situation à reconnaître. Une trajectoire de retour libre est conçue pour que la dynamique gravitationnelle ramène naturellement le véhicule vers la Terre après un passage lunaire si aucune manœuvre majeure n'est effectuée.

Vérification demandée. La géométrie doit ramener la trajectoire vers la Terre même sans propulsion majeure après le passage lunaire; vérifiez ce caractère passif dans le schéma avant les chiffres.

Erreur à écarter. Retour libre ne signifie pas retour sans navigation, correction ni contraintes d'entrée atmosphérique.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une trajectoire de retour libre est conçue pour que la dynamique gravitationnelle ramène naturellement le véhicule vers la Terre après un passage lunaire si aucune manœuvre majeure n'est effectuée.

Test du cas

La géométrie doit ramener la trajectoire vers la Terre même sans propulsion majeure après le passage lunaire; vérifiez ce caractère passif dans le schéma avant les chiffres.

Piège exclu

Retour libre ne signifie pas retour sans navigation, correction ni contraintes d'entrée atmosphérique.

Conséquence opérationnelle

La conséquence pratique de ce point est de relier le calcul à un critère observable. Ici, La géométrie doit ramener la trajectoire vers la Terre même sans propulsion majeure après le passage lunaire; vérifiez ce caractère passif dans le schéma avant les chiffres.; un écart à cette relation déclenche une vérification des données et hypothèses.

Quantification

retour libre: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

retour libre: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Transfert Terre–Lune : 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.

Budget Δv avec réserve

$$\Delta v_{\text{budget}} = (\sum \Delta v_{\text{nominal}}) \times (1 + f_{\text{marge}})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\Delta v_{\text{budget}} = (\sum \Delta v_{\text{nominal}}) \times (1 + f_{\text{marge}})$ » dans le contexte de «Budget Δv avec réserve» ?

2 — Intuition sans symboles

Le budget total additionne les manœuvres prévues puis ajoute une réserve explicite pour les écarts et corrections.

3 — Grandeurs

Δv_{budget} : budget final ; $\sum \Delta v_{\text{nominal}}$: somme des manœuvres nominales ; f_{marge} : fraction de réserve.

4 — Formule

$$\Delta v_{\text{budget}} = (\sum \Delta v_{\text{nominal}}) \times (1 + f_{\text{marge}})$$

5 — Lecture

Lire la relation « $\Delta v_{\text{budget}} = (\sum \Delta v_{\text{nominal}}) \times (1 + f_{\text{marge}})$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

Δv_{budget} : budget final ; $\sum \Delta v_{\text{nominal}}$: somme des manœuvres nominales ; f_{marge} : fraction de réserve.

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

Vitesses en m/s ou km/s, mais la même unité partout ; f_{marge} 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

La somme construit le besoin nominal, puis le facteur de marge l'augmente proportionnellement.

11 — Hypothèses

Les manœuvres appartiennent au même périmètre de mission et la marge est appliquée une seule fois.

12 — Contrôle d'unités

Vitesses en m/s ou km/s, mais la même unité partout ; f_{marge} sans dimension. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $3,15 + 0,12 + 0,90 = 4,17$ km/s et 8 % de marge, $\Delta v_{\text{budget}} = 4,17 \times 1,08 = 4,5036$ km/s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La somme construit le besoin nominal, puis le facteur de marge l'augmente proportionnellement.

15 — Contrôle algébrique

Diviser le budget final par 1,08 doit redonner 4,17 km/s.

16 — Estimation mentale

8 % de 4,17 vaut environ 0,33 ; le total doit donc être proche de 4,50 km/s.

17 — Interprétation

Le budget indique la capacité propulsive à réserver, pas la trajectoire exacte.

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

Une marge plus forte augmente directement le budget ; une manœuvre supprimée réduit d'abord la somme nominale.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Le nominal vaut 4 110 m/s avec 8 % de réserve.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$\Delta v_{\text{budget}} = 4\,110 \times 1,08 = 4\,438,8$ m/s, soit environ 4 439 m/s.

Exercice autonome. Le nominal vaut 3 900 m/s avec 10 % de réserve.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$\Delta v_{\text{budget}} = 3\,900 \times 1,10 = 4\,290$ m/s.

21 — Décision mission

Réserver le Δv avant de figer masse de propergol et séquence de manœuvres.

Capacité idéale d'un étage

$$\Delta v = v_e \ln(m_0 / m_f)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\Delta v = v_e \ln(m_0 / m_f)$ » dans le contexte de «Capacité idéale d'un étage» ?

2 — Intuition sans symboles

Le rapport de masse et la vitesse d'éjection déterminent le potentiel idéal de variation de vitesse de l'étage.

3 — Grandeurs

Δv : variation idéale ; v_e : vitesse d'éjection ; m_0 : masse avant combustion ; m_f : masse après combustion.

4 — Formule

$$\Delta v = v_e \ln(m_0 / m_f)$$

5 — Lecture

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

6 — Symboles et sens

Δv : variation idéale ; v_e : vitesse d'éjection ; m_0 : masse avant combustion ; m_f : masse après combustion.

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_e en m/s ; masses dans la même unité.

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 conservation de quantité de mouvement d'une fusée à masse variable conduit au logarithme du rapport de masse.

11 — Hypothèses

Modèle idéal sans pertes et v_e représentative de la combustion.

12 — Contrôle d'unités

Δv et v_e en m/s ; masses dans la même unité. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $v_e = 3\,200$ m/s et $m_0/m_f = 2$, $\Delta v = 3\,200 \times \ln(2) \approx 2\,218$ m/s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La conservation de quantité de mouvement d'une fusée à masse variable conduit au logarithme du rapport de masse.

15 — Contrôle algébrique

$\exp(\Delta v/v_e)$ doit redonner le rapport de masse 2.

16 — Estimation mentale

$\ln(2) \approx 0,69$, donc le résultat doit valoir environ 70 % de 3 200 m/s.

17 — Interprétation

Cette capacité idéale doit être comparée au budget Terre–Lune avec pertes et réserves.

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 de façon logarithmique ; augmenter v_e agit linéairement.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $v_e = 3\,300$ m/s, $m_0/m_f = 2,2$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$\ln(2,2) \approx 0,7885$; $\Delta v \approx 3\,300 \times 0,7885 = 2\,602$ m/s.

Exercice autonome. $v_e = 3\,400$ m/s, $m_0/m_f = 2,5$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$\ln(2,5) \approx 0,9163$; $\Delta v \approx 3\,116$ m/s.

21 — Décision mission

Vérifier que le potentiel idéal couvre le budget majoré avant de figer l'étage.

Accélération moyenne pendant une poussée

$$a = F / m$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $a = F / m$ » dans le contexte de « Accélération moyenne pendant une poussée » ?

2 — Intuition sans symboles

Une même poussée accélère davantage un véhicule léger qu'un véhicule lourd.

3 — Grandeurs

a : accélération ; F : force nette utile ; m : masse instantanée.

4 — Formule

$$a = F / m$$

5 — Lecture

Lire la relation « $a = F / m$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

a : accélération ; F : force nette utile ; 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 ; F en N ; m 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 relie directement force nette, masse et accélération.

11 — Hypothèses

Force moyenne représentative et masse cohérente avec la phase.

12 — Contrôle d'unités

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

13 — Cas numérique

Avec $F = 20\,000\text{ N}$ et $m = 10\,000\text{ kg}$, $a = 20\,000/10\,000 = 2,00\text{ m/s}^2$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La deuxième loi de Newton relie directement force nette, masse et accélération.

15 — Contrôle algébrique

$m \cdot a$ doit redonner $20\,000\text{ N}$.

16 — Estimation mentale

20 kN sur 10 t donne environ 2 m/s^2 .

17 — Interprétation

L'accélération sert ensuite à estimer durée de poussée et capacité de correction.

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 force fixe, une baisse de masse augmente a inversement.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $F = 30\,000\text{ N}$, $m = 12\,000\text{ kg}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$a = 30\,000/12\,000 = 2,50\text{ m/s}^2$.

Exercice autonome. $F = 18\,000\text{ N}$, $m = 9\,000\text{ kg}$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$a = 18\,000/9\,000 = 2,00\text{ m/s}^2$.

21 — Décision mission

Conserver une accélération compatible avec pointage, structure et rendez-vous.

Durée idéale d'une correction

$$\Delta t = \Delta v / a$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\Delta t = \Delta v / a$ » dans le contexte de «Durée idéale d'une correction» ?

2 — Intuition sans symboles

À accélération moyenne connue, le temps nécessaire est le changement de vitesse demandé divisé par cette accélération.

3 — Grandeurs

Δt : durée ; Δv : changement de vitesse ; a : accélération moyenne.

4 — Formule

$$\Delta t = \Delta v / a$$

5 — Lecture

Lire la relation « $\Delta t = \Delta v / a$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

Δt : durée ; Δv : changement de vitesse ; a : accélération moyenne.

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

Δt en s ; Δv en m/s ; a en m/s².

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

Une accélération est un changement de vitesse par unité de temps ; la relation est donc l'inverse direct.

11 — Hypothèses

Accélération moyenne supposée constante sur l'intervalle.

12 — Contrôle d'unités

Δt en s ; Δv en m/s ; a en m/s². Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Pour $\Delta v = 800$ m/s et $a = 2$ m/s², $\Delta t = 800/2 = 400$ s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Une accélération est un changement de vitesse par unité de temps ; la relation est donc l'inverse direct.

15 — Contrôle algébrique

$a \cdot \Delta t$ doit redonner 800 m/s.

16 — Estimation mentale

800 divisé par 2 donne 400 s, soit environ 6,7 min.

17 — Interprétation

La durée idéale ne comprend ni montée en poussée ni extinction ni variations de masse.

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

Doubler a divise le temps par deux à Δv constant.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $\Delta v = 6$ m/s et $a = 0,30$ m/s².

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$\Delta t = 6/0,30 = 20 \text{ s.}$$

Exercice autonome. $\Delta v = 12$ m/s et $a = 0,40$ m/s².

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$\Delta t = 12/0,40 = 30 \text{ s.}$$

21 — Décision mission

Vérifier que la fenêtre de manœuvre est assez longue pour exécuter la correction.

Erreur de position due au temps

$$\Delta x \approx v \times \Delta t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\Delta x \approx v \times \Delta t$ » dans le contexte de «Erreur de position due au temps» ?

2 — Intuition sans symboles

Une erreur de temps transforme une vitesse relative en erreur de position approximative.

3 — Grandeurs

Δx : déplacement ou erreur de position ; v : vitesse relative représentative ; Δt : erreur ou intervalle de temps.

4 — Formule

$$\Delta x \approx v \times \Delta t$$

5 — Lecture

Lire la relation « $\Delta x \approx v \times \Delta t$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

Δx : déplacement ou erreur de position ; v : vitesse relative représentative ; Δt : erreur ou intervalle de temps.

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

Δx en m ou km ; v en m/s ou km/s ; Δt en s, avec unités cohérentes.

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 distance parcourue à vitesse constante est vitesse multipliée par temps.

11 — Hypothèses

Approximation locale à vitesse quasi constante ; ce n'est pas une propagation orbitale complète.

12 — Contrôle d'unités

Δx en m ou km ; v en m/s ou km/s ; Δt en s, avec unités cohérentes. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

À $v = 1,0$ km/s et $\Delta t = 30$ s, $\Delta x \approx 1,0 \times 30 = 30$ km.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La distance parcourue à vitesse constante est vitesse multipliée par temps.

15 — Contrôle algébrique

$\Delta x/v$ doit redonner 30 s.

16 — Estimation mentale

Une seconde d'erreur à 1 km/s vaut déjà environ 1 km.

17 — Interprétation

Ce contrôle mental montre pourquoi horloge et estimation d'état sont critiques au rendez-vous.

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

L'erreur de position croît linéairement avec la vitesse relative et avec l'erreur temporelle.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $v = 0,8$ km/s et $\Delta t = 45$ s.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$\Delta x \approx 0,8 \times 45 = 36 \text{ km.}$$

Exercice autonome. $v = 1,2$ km/s et $\Delta t = 20$ s.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$\Delta x \approx 1,2 \times 20 = 24 \text{ km.}$$

21 — Décision mission

Norme d'une correction vectorielle

$$||\Delta v|| = \sqrt{(\Delta v_1^2 + \Delta v_2^2)}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $||\Delta v|| = \sqrt{(\Delta v_1^2 + \Delta v_2^2)}$ » dans le contexte de «Norme d'une correction vectorielle» ?

2 — Intuition sans symboles

Deux composantes perpendiculaires se combinent par Pythagore pour donner la taille totale du vecteur de correction.

3 — Grandeurs

$||\Delta v||$: norme totale ; Δv_1 et Δv_2 : composantes orthogonales.

4 — Formule

$$||\Delta v|| = \sqrt{(\Delta v_1^2 + \Delta v_2^2)}$$

5 — Lecture

Lire la relation « $||\Delta v|| = \sqrt{(\Delta v_1^2 + \Delta v_2^2)}$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

$||\Delta v||$: norme totale ; Δv_1 et Δv_2 : composantes orthogonales.

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

Toutes les composantes et la norme en m/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

La norme euclidienne d'un vecteur orthogonal est la racine de la somme des carrés.

11 — Hypothèses

Composantes exprimées dans le même repère orthonormal.

12 — Contrôle d'unités

Toutes les composantes et la norme en m/s. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec 4 m/s et 2 m/s, $||\Delta v|| = \sqrt{4^2 + 2^2} = \sqrt{20} = 4,47$ m/s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La norme euclidienne d'un vecteur orthogonal est la racine de la somme des carrés.

15 — Contrôle algébrique

La norme doit être au moins aussi grande que la plus grande composante, ici 4 m/s.

16 — Estimation mentale

4 et 2 forment un résultat un peu supérieur à 4 mais inférieur à 6.

17 — Interprétation

La norme mesure le coût total, tandis que la direction détermine l'effet orbital.

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 une composante augmente la norme, mais pas linéairement lorsque l'autre reste non nulle.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Composantes 3 m/s et 4 m/s.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$||\Delta v|| = \sqrt{9+16} = 5,00 \text{ m/s.}$$

Exercice autonome. Composantes 5 m/s et 12 m/s.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$||\Delta v|| = \sqrt{25+144} = 13,0 \text{ m/s.}$$

21 — Décision mission

Réserver la norme totale tout en conservant la direction nécessaire à la correction.

Condition d'interception à l'arrivée

$$||r_{\text{véhicule}}(t_{\text{arrivée}}) - r_{\text{Lune}}(t_{\text{arrivée}})|| \leq \varepsilon_{\text{navigation}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $||r_{\text{véhicule}}(t_{\text{arrivée}}) - r_{\text{Lune}}(t_{\text{arrivée}})|| \leq \varepsilon_{\text{navigation}}$ » dans le contexte de «Condition d'interception à l'arrivée» ?

2 — Intuition sans symboles

Une interception n'exige pas seulement d'être au bon endroit : véhicule et cible doivent être suffisamment proches au même instant.

3 — Grandeurs

$r_{\text{véhicule}}$ et r_{Lune} : positions au même instant ; $t_{\text{arrivée}}$: instant d'arrivée commun auquel les deux positions sont évaluées ; $\varepsilon_{\text{navigation}}$: tolérance de séparation admissible.

4 — Formule

$$||r_{\text{véhicule}}(t_{\text{arrivée}}) - r_{\text{Lune}}(t_{\text{arrivée}})|| \leq \varepsilon_{\text{navigation}}$$

5 — Lecture

Lire la relation « $||r_{\text{véhicule}}(t_{\text{arrivée}}) - r_{\text{Lune}}(t_{\text{arrivée}})|| \leq \varepsilon_{\text{navigation}}$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

$r_{\text{véhicule}}$ et r_{Lune} : positions au même instant ; $t_{\text{arrivée}}$: instant d'arrivée commun auquel les deux positions sont évaluées ; $\varepsilon_{\text{navigation}}$: tolérance de séparation admissible.

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

Positions et tolérance dans la même unité de distance.

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 norme de la différence de position mesure directement la séparation au rendez-vous.

11 — Hypothèses

Même repère, même époque et tolérance définie avant le test.

12 — Contrôle d'unités

Positions et tolérance dans la même unité de distance. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Si la séparation prédite à l'arrivée est de 4 km pour une tolérance de 5 km, la marge vaut $5 - 4 = 1 \text{ km}$: le critère géométrique est satisfait.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La norme de la différence de position mesure directement la séparation au rendez-vous.

15 — Contrôle algébrique

Une séparation supérieure à la tolérance doit faire échouer le test, même si les temps d'arrivée sont proches.

16 — Estimation mentale

4 km face à une tolérance de 5 km laisse 1 km de marge géométrique.

17 — Interprétation

Ce critère est une porte de décision ; il ne remplace pas les contraintes de vitesse relative et d'attitude.

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

Réduire ϵ rend le critère plus strict ; une erreur d'état plus grande augmente la séparation prédite.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Séparation prédite 6 km, tolérance 5 km.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

La séparation dépasse la tolérance de $6 - 5 = 1$ km : critère non satisfait ; il faut corriger trajectoire ou calendrier.

Exercice autonome. Séparation 2,5 km, tolérance 3 km.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

La marge géométrique vaut $3 - 2,5 = 0,5$ km : critère satisfait.

21 — Décision mission

Ne poursuivre le rendez-vous terminal que si position, vitesse relative et navigation satisfont leurs portes respectives.

Entraînement progressif

1. Expliquez sans équation quatre notions réellement utilisées dans « De la Terre à la Lune: énergie, fenêtres et rendez-vous », 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 06 · Entraînement progressif.
4. Diagnostiquer un résultat volontairement faux.
5. Prendre une décision dans la scène mission en explicitant marge et limite — module 06 · Entraînement progressif.

Gate zéro prérequis

- Avant tout calcul de « De la Terre à la Lune: énergie, fenêtres et rendez-vous », 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 06 ».
- Je sais faire un ordre de grandeur.
- Je sais expliquer une erreur fréquente.
- Je peux refaire un exercice sans copier le résultat — « module 06 ».

1. Pourquoi viser la Lune demande une fenêtre géométrique

La Lune se déplace pendant le vol. Le véhicule doit donc quitter son orbite au moment où la trajectoire de transfert et la position future de la Lune se rencontrent. « Pointer vers la Lune » au départ serait insuffisant: le mouvement orbital impose une **phase**. La fenêtre est plus fréquente que pour Mars, mais elle reste une contrainte de géométrie, de site de lancement, de plan orbital et d'éclairage à l'arrivée.

Le premier réflexe d'ingénierie est de distinguer **position actuelle**, **position visée à l'arrivée** et **temps de vol**. Ces trois grandeurs sont couplées.

Une fenêtre lunaire n'est pas seulement une date de calendrier: elle fixe la géométrie entre le plan de l'orbite de parking, la position future de la Lune et la direction de l'injection. La Terre tourne sous le plan orbital et la Lune avance pendant les trois jours typiques d'un transfert direct. Une mission doit donc raisonner en état futur: où sera la cible à l'arrivée, non où elle est au départ. Une erreur d'angle de quelques dixièmes de degré au moment de l'injection peut devenir des centaines de kilomètres de décalage au voisinage lunaire. La vérification consiste à propager l'état, annoncer le repère utilisé et comparer plusieurs heures de tir possibles avant de parler de « fenêtre ».

2. Lire un budget de delta-v

Le symbole Δv , « delta-v », désigne une variation de vitesse exprimée en m/s ou km/s. Il ne représente pas directement la vitesse du véhicule: c'est un budget d'impulsions nécessaires pour modifier l'orbite. Une mission additionne plusieurs contributions: injection translunaire, corrections, insertion autour de la Lune, rendez-vous et marges.

Exercice A — fermer un budget

Une mission simplifiée prévoit 3,15 km/s d'injection, 0,12 km/s de corrections et 0,90 km/s d'insertion. Ajoutez une marge de 8 % au total nominal.

Total nominal = 3,15 + 0,12 + 0,90 = 4,17 km/s. Marge = 4,17 × 0,08 = 0,3336 km/s. Budget = 4,5036 km/s, soit environ 4,50 km/s. La marge doit être attribuée à des incertitudes identifiées dans une vraie mission.

Données du cas

Exercice A — fermer un budget — Une mission simplifiée prévoit 3,15 km/s d'injection, 0,12 km/s de corrections et 0,90 km/s d'insertion. Ajoutez une marge de 8 % au total nominal.

Relation

Total nominal = 3,15 + 0,12 + 0,90 = 4,17 km/s.

Raisonnement

Total nominal = 3,15 + 0,12 + 0,90 = 4,17 km/s. Marge = 4,17 × 0,08 = 0,3336 km/s. Budget = 4,5036 km/s, soit environ 4,50 km/s. La marge doit être attribuée à des incertitudes identifiées dans une vraie mission.

Résultat

Total nominal = 3,15 + 0,12 + 0,90 = 4,17 km/s.

Contrôle

Marge = 4,17 × 0,08 = 0,3336 km/s.

Interprétation

La marge doit être attribuée à des incertitudes identifiées dans une vraie mission.

Un budget de delta-v est un registre de changements de vitesse, chacun associé à une manœuvre et à une marge. Pour une mission lunaire pédagogique, l'injection translunaire depuis une orbite basse est de l'ordre de quelques kilomètres par seconde, tandis que les corrections de trajectoire se comptent souvent en dizaines de mètres par seconde ou moins. Additionner les valeurs ne suffit pas: une manœuvre exécutée avec le mauvais vecteur peut dépenser le bon delta-v et produire le mauvais résultat. Chaque ligne du budget doit donc préciser le repère, la direction, le moment, la dispersion attendue et la réserve. Cette discipline prépare directement les budgets beaucoup plus complexes d'une campagne martienne.

3. Comprendre l'équation de Tsiolkovski sans la transformer en magie

L'équation idéale des fusées s'écrit $\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$. v_e est la vitesse effective d'éjection en m/s; m_0 la masse avant combustion; m_f la masse après combustion; $\ln$ le logarithme naturel. Elle montre que le delta-v augmente logarithmiquement avec le rapport de masse.

Elle ne contient ni gravité variable, ni pertes de trajectoire, ni durée de poussée, ni contraintes structurales. C'est une loi idéale très puissante pour raisonner sur les ordres de grandeur.

L'équation de Tsiolkovski relie le delta-v idéal à la vitesse d'éjection et au rapport de masse: $\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$. Le logarithme naturel, noté $\ln$, signifie que le coût en propergol croît très vite lorsque l'on exige davantage de delta-v avec la même propulsion. Si v_e vaut 3 200 m/s et que $m_0/m_f = 2$, le delta-v idéal vaut environ $3\,200 \times 0,693 = 2\,218$ m/s. Ce calcul ignore la gravité, les pertes, les allumages finis et les réserves. Il sert à vérifier la cohérence d'une architecture, puis à expliquer pourquoi une marge de quelques centaines de mètres par seconde peut entraîner une hausse de masse disproportionnée.

4. La durée de vol est un choix d'architecture

Un transfert plus rapide peut demander davantage d'énergie; un transfert plus lent modifie les fenêtres, l'exposition radiative, la durée de fonctionnement des systèmes et la géométrie d'arrivée. Pour la Lune, des missions habitées historiques ont utilisé des vols de l'ordre de quelques jours. Le bon enseignement n'est pas de mémoriser « trois jours », mais de comprendre que temps et énergie se négocient.

Le temps de vol échange propulsion contre opérations. Un transfert rapide réduit l'exposition et la durée pendant laquelle les systèmes doivent fonctionner, mais peut demander davantage d'énergie ou des contraintes de lancement plus fortes. Un transfert de faible énergie peut économiser du delta-v tout en augmentant la durée, les corrections, la [navigation](#) et l'exposition aux défaillances. Pour une mission habitée, chaque jour supplémentaire consomme aussi eau, [oxygène](#), nourriture, énergie et [disponibilité](#) d'équipage. La bonne comparaison convertit donc le temps en ressources physiques et en risques. Une trajectoire n'est pas « lente » ou « rapide » en soi: elle est acceptable si l'ensemble propulsion, survie, navigation et retour reste fermé.

5. Les corrections de trajectoire achètent de la précision

Une petite erreur de vitesse au départ devient une grande erreur de position après des centaines de milliers de kilomètres. Les corrections sont prévues parce que lancement, poussée et connaissance de l'état ne sont jamais parfaits. Une correction tôt dans le vol est souvent plus efficace qu'une correction tardive, mais la décision attend parfois que les mesures aient suffisamment réduit l'[incertitude](#).

Une correction de trajectoire est d'autant plus utile qu'elle est décidée avec une bonne estimation de l'état. Une erreur de vitesse de 1 m/s maintenue pendant 24 h correspond, dans une approximation rectiligne très simplifiée, à 86,4 km d'écart de position. La dynamique gravitationnelle réelle est plus complexe, mais l'ordre de grandeur montre pourquoi les petites erreurs deviennent importantes. Corriger très tôt réduit souvent l'amplitude nécessaire; attendre peut offrir de meilleures mesures mais augmenter le coût. Le compromis se décide avec la [covariance](#) de navigation, le temps avant l'événement suivant et les contraintes de propulsion. Après la correction, une nouvelle mesure doit prouver l'effet obtenu: la commande n'est pas la preuve du résultat.

6. Arriver ne signifie pas être capturé

À proximité de la Lune, un véhicule hyperbolique ne s'arrête pas spontanément. Pour rester en orbite, il doit réduire son énergie relative par propulsion ou utiliser une trajectoire conçue avec d'autres mécanismes. Une insertion orbitale est donc un événement critique: poussée, orientation, navigation et timing doivent fermer ensemble.

Exercice B — ordre de grandeur d'une manœuvre

Un moteur fournit 20 kN à un véhicule de 10 000 kg. Quelle [accélération](#) moyenne donne-t-il en négligeant la variation de masse? Combien de secondes pour produire 800 m/s si cette accélération restait constante?

$a = F/m = 20\,000/10\,000 = 2\text{ m/s}^2$. Durée idéale = $\Delta v/a = 800/2 = 400\text{ s}$. Le calcul simplifie fortement la combustion réelle mais relie poussée, masse, temps et variation de vitesse.

Données du cas

Exercice B — ordre de grandeur d'une manœuvre — Un moteur fournit 20 kN à un véhicule de 10 000 kg. Quelle accélération moyenne donne-t-il en négligeant la variation de masse? Combien de secondes pour produire 800 m/s si cette accélération restait constante?

Relation

$$a = F/m = 20\,000/10\,000 = 2\text{ m/s}^2.$$

Raisonnement

$a = F/m = 20\,000/10\,000 = 2\text{ m/s}^2$. Durée idéale = $\Delta v/a = 800/2 = 400\text{ s}$. Le calcul simplifie fortement la combustion réelle mais relie poussée, masse, temps et variation de vitesse.

Résultat

$$a = F/m = 20\,000/10\,000 = 2\text{ m/s}^2.$$

Interprétation

Le calcul simplifie fortement la combustion réelle mais relie poussée, masse, temps et variation de vitesse.

À l'approche de la Lune, le véhicule possède une vitesse relative qui ne disparaît pas parce qu'il atteint la bonne distance. Sans manœuvre ou trajectoire naturellement liée, il peut simplement survoler la Lune et repartir. L'insertion orbitale retire une partie de cette énergie à un instant précis, souvent près du périastre lunaire où l'effet d'une impulsion est important. Une sous-performance peut produire une orbite plus haute ou une trajectoire d'échappement; une sur-performance peut abaisser dangereusement le périastre. Le plan doit donc définir avant l'arrivée les limites de durée de poussée, les critères d'arrêt, les [orbites](#) de repli et la façon de confirmer l'état après la manœuvre.

7. Rendez-vous: se rejoindre exige d'abord d'être dans la bonne orbite

Deux véhicules en orbite ne se rejoignent pas en « tournant vers l'autre ». Le véhicule poursuivant modifie son orbite pour faire évoluer sa phase relative, puis réduit vitesse et distance à mesure que le rendez-vous approche. La navigation change d'échelle: kilomètres, puis centaines de mètres, puis mètres. Les capteurs et règles de sécurité changent avec cette échelle.

Le [rendez-vous orbital](#) est un problème de position et de vitesse relatives. Deux véhicules peuvent passer au même point à des vitesses incompatibles et ne pas être en rendez-vous. La séquence commence par mettre les orbites dans des plans compatibles, puis régler la phase pour que la cible et le poursuivant arrivent au même voisinage au bon moment. À courte distance, les mouvements relatifs deviennent contre-intuitifs: accélérer dans le sens de la marche peut d'abord modifier l'altitude et la période plutôt que simplement « rattraper ». La formation doit donc séparer navigation relative, planification des impulsions, zones d'approche et règles d'abandon. Un rendez-vous sûr possède toujours une trajectoire de fuite qui ne dépend pas d'une dernière commande parfaite.

8. Une erreur de temps devient une erreur de position

Si une vitesse relative vaut 1 600 m/s, une erreur temporelle de 1 s correspond naïvement à 1,6 km le long de la trajectoire. Ce calcul $\Delta x \approx v \times \Delta t$ n'est pas un propagateur orbital, mais il montre pourquoi l'horloge et l'estimation d'état sont des fonctions de navigation. Δx est un déplacement en mètres, v une vitesse en m/s, Δt un temps en secondes.

Une erreur de temps se transforme en erreur de géométrie. Si une séquence critique est décalée de 30 s et que la vitesse orbitale locale vaut 1,6 km/s, le déplacement le long de la trajectoire représente déjà environ 48 km. Ce produit simple, distance $\approx$ vitesse $\times$ temps, n'est pas une [propagation orbitale](#) complète mais donne immédiatement l'échelle du problème. Les horloges, l'estimation d'état et les commandes doivent partager une référence temporelle cohérente. Les logiciels doivent aussi distinguer l'heure à laquelle une donnée a été mesurée de celle à laquelle elle a été reçue. Cette discipline devient encore plus importante vers Mars, où les échanges avec la Terre arrivent avec plusieurs minutes de retard.

9. Scénario de panne: la manœuvre d'insertion est interrompue

Une coupure précoce de moteur peut laisser le véhicule sur une orbite différente ou sur une trajectoire de survol. La procédure ne doit pas supposer qu'une seule solution existe. Elle estime l'état obtenu, la réserve de propulsion, les contacts de communication, les risques de collision et les fenêtres de correction. La priorité est de connaître la trajectoire réelle avant de commander une seconde combustion.

Une interruption d'insertion lunaire doit être traitée comme un arbre de futurs possibles, pas comme un échec binaire. L'équipe estime d'abord l'impulsion réellement délivrée, puis propage la trajectoire obtenue: orbite lunaire elliptique, survol, impact ou retour vers la sphère d'influence terrestre. La priorité est d'éviter une seconde manœuvre improvisée avant de connaître l'état. Les options dépendent du propergol restant, de la visibilité depuis la Terre, de l'énergie électrique et du temps avant le prochain périastre. Une architecture robuste prévoit des commandes de terminaison, des modes de pointage sûrs et des trajectoires qui conservent du temps de décision. La [récupération](#) est d'abord un problème de navigation, ensuite un problème de propulsion.

10. Comparer la Lune et Mars sans confondre les échelles

Le trajet lunaire est un excellent laboratoire pédagogique parce que le délai de communication reste court et les fenêtres sont fréquentes. Mars ajoute une géométrie héliocentrique, des délais de plusieurs minutes, des fenêtres espacées et des durées de vol beaucoup plus longues. Les principes — budget de delta-v, navigation, corrections, arrivée, modes de panne — restent toutefois les mêmes.

La Lune est un excellent laboratoire parce qu'elle expose rapidement aux mêmes familles de problèmes que Mars tout en restant beaucoup plus proche. Mais les échelles changent profondément: délai radio d'environ une seconde vers la Lune contre plusieurs minutes vers Mars, absence d'atmosphère lunaire contre [atmosphère martienne](#) ténue, trajectoires de quelques jours contre plusieurs mois, possibilités de secours et de ravitaillement très différentes. Il faut donc transférer des principes — marges, navigation, rendez-vous, [autonomie](#), [maintenance](#) — et non copier des architectures. Le bon exercice final consiste à prendre une décision valide près de la Lune et à expliquer quelles hypothèses deviennent fausses lorsqu'on l'étend à Mars.

Étude guidée — de la dispersion d'injection à l'arrivée lunaire

Supposons une injection translunaire nominale suivie d'une estimation révélant +4 m/s dans l'axe de vol et -2 m/s transversal. Il ne faut pas additionner 4 + 2 comme si les erreurs étaient colinéaires. La norme du [vecteur](#) vaut environ $\sqrt{4^2+2^2}=4,47$ m/s, mais le coût de correction dépend surtout de la manière dont chaque composante déforme l'arrivée. Une composante transversale peut déplacer le plan d'arrivée davantage qu'une composante axiale de même valeur. La navigation propage donc plusieurs solutions et le [guidage](#) choisit une correction qui minimise le risque futur plutôt que la simple norme instantanée.

Le contrôle de mission réserve ensuite une seconde fenêtre de correction. Si la première manœuvre est exécutée très tôt, une petite erreur d'exécution peut être observée pendant plusieurs heures avant la correction suivante. Cette stratégie sépare 'corriger beaucoup tôt' de 'corriger finement tard'. La réserve de delta-v doit couvrir les deux, mais aussi l'incertitude de navigation et une éventuelle manœuvre d'évitement. Le mini-projet peut demander d'allouer 30 m/s de réserve entre trois corrections possibles et de justifier pourquoi on ne dépense pas tout au premier écart.

Enfin, l'étudiant décrit ce qui prouve la réussite: non pas le temps de combustion, mais un état estimé post-manœuvre avec une incertitude compatible avec le corridor lunaire. Cette distinction entre commande, mesure et état sera réutilisée dans tous les modules [GNC](#) et [EDL](#).

11. Mini-projet: écrire un plan de vol justifié

1. Choisissez une orbite terrestre de départ.
2. Listez injection, corrections et insertion avec un budget de Δv .
3. Ajoutez une marge et expliquez ce qu'elle couvre.
4. Décrivez les mesures utilisées pour savoir où se trouve le véhicule.
5. Définissez un mode de panne pour une combustion incomplète.
6. Expliquez ce qui doit être décidé automatiquement, par l'équipage et depuis la Terre.

Le résultat attendu n'est pas une trajectoire certifiée, mais un raisonnement dont toutes les hypothèses sont visibles.

12. Atelier mission — corriger une injection translunaire imparfaite

Supposons qu'après l'injection, la navigation estime une erreur de vitesse de 6 m/s sur la composante la plus pénalisante. La réaction rationnelle n'est pas de brûler immédiatement 6 m/s en sens inverse. Il faut d'abord estimer comment cette erreur se projette au temps de rencontre avec la Lune, quelle incertitude porte la mesure et si une correction légèrement différée réduit mieux l'erreur finale. La navigation construit une covariance — une représentation mathématique des incertitudes et de leurs corrélations — puis le guidage choisit une manœuvre qui réduit l'erreur d'arrivée sans gaspiller la réserve.

Dans un exercice simplifié, si une correction de 6 m/s est exécutée par un moteur donnant une accélération moyenne de 0,30 m/s², la durée idéale vaut $\Delta t = \Delta v/a = 6/0,30 = 20$ s. Δt est le temps de poussée, Δv la variation de vitesse et a l'accélération moyenne. Le calcul ne tient pas compte de la rotation du vecteur de poussée, du délai d'allumage ni de la variation de masse; il sert à vérifier l'ordre de grandeur d'une commande.

Après la correction, la mission ne déclare pas « trajectoire réparée » sur la seule base de la commande. Elle refait de la navigation: mesures radio, dynamique propagée, éventuellement imagerie, puis comparaison entre état attendu et état estimé. La boucle n'est fermée que lorsque la preuve montre que la trajectoire réelle est redevenue compatible avec le corridor d'arrivée.

13. Limites, alternatives et questions de revue

Une trajectoire lunaire peut être directe, utiliser une énergie plus faible au prix d'un vol plus long, viser différentes familles d'orbites ou s'inscrire dans une architecture avec rendez-vous. La meilleure option dépend de la masse, de la propulsion, de la durée acceptable, des communications, des exigences de retour et de l'objectif de surface. Le mot « optimal » n'a donc de sens qu'avec un critère: minimiser le delta-v, le temps, le risque, la masse ou une combinaison pondérée.

Avant de valider un plan, posez quatre questions. Quelle mesure prouve l'état après chaque manœuvre? Quelle réserve reste si la manœuvre est sous-performante? Quelle trajectoire existe si l'insertion ne se termine pas? Quelles décisions doivent être autonomes en cas de perte de communication? La mécanique orbitale devient alors une discipline opérationnelle et non un dessin de trajectoire.

Sources et références

- [NASA — Apollo 11 Mission Overview](#)
- [NASA Science — Moon](#)
- [NASA Glenn — Ideal Rocket Equation](#)

Complément primaire vérifié: [NASA — Moon to Mars Architecture](#) · [NASA — Artemis](#)

Studio d'ingénierie — fermer un budget Terre–Lune

Pour un exercice volontairement simplifié, on additionne 3 150 m/s pour l'injection translunaire, 60 m/s de corrections et 900 m/s pour une insertion/descente choisie dans le scénario. Le besoin nominal vaut 4 110 m/s. Une réserve de 8 % conduit à $4\,110 \times 1,08 = 4\,438,8$ m/s, soit environ 4 439 m/s. Le symbole Δv représente la somme des variations de vitesse que le véhicule doit pouvoir produire; l'unité est le mètre par seconde. La réserve n'est pas une « vitesse réellement dépensée »: c'est une allocation de capacité contre les erreurs de navigation, dispersions de propulsion et retards de décision.

Le cas dégradé retire la moitié de la réserve après une correction plus coûteuse que prévu. L'élève doit recalculer ce qui reste, identifier quelles opérations sont obligatoires pour la sécurité et quelles opérations peuvent être simplifiées. Il doit également expliquer pourquoi un budget de Δv ne suffit pas à certifier la mission: poussée disponible, durée de combustion, éclairage, communications et capacité thermique peuvent rendre une manœuvre impossible au moment où elle est pourtant abordable en énergie.

Matrice de compétences FR ↔ EN

#	Français	English	Statut
01	Budget Δv avec réserve	Delta-v budget with reserve	PASS
02	Capacité idéale d'un étage	Ideal stage capability	PASS
03	Accélération moyenne pendant une poussée	Average acceleration during thrust	PASS
04	Durée idéale d'une correction	Ideal correction duration	PASS
05	Erreur de position due au temps	Position error from timing	PASS
06	Norme d'une correction vectorielle	Magnitude of a vector correction	PASS
07	Condition d'interception à l'arrivée	Arrival interception condition	PASS