

Entrée, descente et atterrissage: dissiper l'énergie sans perdre le véhicule

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Entrée, descente et atterrissage: dissiper l'énergie sans perdre le véhicule: comment « Commencer par l'énergie cinétique » agit-il sur « La pression dynamique révèle la charge aérodynamique », et quel repère issu de « La rétropropulsion prend le relais de l'atmosphère » permet de vérifier la décision?

Intuition. L'énergie cinétique vaut $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. m est la masse en kilogrammes, v la vitesse en m/s et E_k l'énergie en joules.

1

Commencer par l'énergie cinétique

L'énergie cinétique vaut $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

2

La pression dynamique révèle la charge aérodynamique

$q = \frac{1}{2}\rho v^2$, avec q en pascals, ρ masse volumique en kg/m³ et v vitesse en m/s.

3

La rétropropulsion prend le relais de l'atmosphère

Quand la vitesse reste trop élevée pour le contact, les moteurs fournissent l'impulsion manquante.

Repère concret. L'énergie cinétique vaut $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

- Commencer par l'énergie cinétique — L'énergie cinétique vaut $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.
- La pression dynamique révèle la charge aérodynamique — $q = \frac{1}{2}\rho v^2$, avec q en pascals, ρ masse volumique en kg/m³ et v vitesse en m/s.
- La rétropropulsion prend le relais de l'atmosphère — Quand la vitesse reste trop élevée pour le contact, les moteurs fournissent l'impulsion manquante.

ENTRÉE, DESCENTE ET ATERRISSAGE

FREINER VITE, VISER JUSTE, SURVIVRE À L'ARRIVÉE

1

ENTRER

Chaleur, angle,
stabilité

2

FREINER

Aérodynamique et
rétropropulsion

3

GUIDER

Navigation,
capteurs,
correction

4

POSER

Terrain,
poussière,
précision

5

SÉCURISER

Déployer,
vérifier,
redémarrer

SUR MARS, L'ATERRISSAGE TRANSFORME
UNE MISSION THÉORIQUE EN BASE RÉELLE.

ENTRÉE, DESCENTE ET ATERRISSAGE

FREINER VITE, VISER JUSTE, SURVIVRE À L'ARRIVÉE

1

ENTRER

Chaleur, angle,
stabilité

2

FREINER

Aérodynamique et
rétropropulsion

3

GUIDER

Navigation,
capteurs,
correction

4

POSER

Terrain,
poussière,
précision

5

SÉCURISER

Déployer,
vérifier,
redémarrer

SUR MARS, L'ATERRISSAGE TRANSFORME
UNE MISSION THÉORIQUE EN BASE RÉELLE.



Visualisation conceptuelle de la [phase](#) qui commence après le contact au sol. Un EDL réussi ne suffit pas: le véhicule doit aussi permettre déchargement, accès, manutention et éloignement des charges sans mettre l'équipage ou l'atterrisseur en danger.

L'entrée, la descente et l'atterrissage — [EDL](#) pour Entry, Descent and Landing — concentrent plusieurs disciplines en quelques minutes. L'atmosphère aide à freiner mais chauffe le véhicule; les parachutes ont un domaine de fonctionnement; les moteurs doivent ensuite enlever l'énergie restante; la [navigation](#) doit choisir un point atteignable. Ce module apprend à suivre l'énergie et les marges plutôt qu'à mémoriser une [chronologie](#).

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 11

Comprendre avant de calculer

Un véhicule arrive dans l'[atmosphère martienne](#) à plusieurs kilomètres par seconde. Il doit convertir cette énergie en chaleur, traînée, changement de trajectoire puis poussée contrôlée sans dépasser ses limites.

Progression du module — énergie cinétique; traînée; flux thermique; corridor d'entrée.

énergie cinétique

Exemple concret. Doubler la vitesse multiplie l'énergie cinétique par quatre si la masse reste identique.

Piège. Ne comparez pas deux entrées seulement par leur vitesse sans tenir compte de la masse et de la trajectoire.

Définition sans prérequis. L'[énergie cinétique](#) est l'énergie associée au mouvement et vaut $\frac{1}{2} m v^2$ dans le modèle classique. La dépendance au carré de la vitesse explique pourquoi une entrée rapide exige de dissiper énormément d'énergie.

Contrôle mental. À masse constante, doubler la vitesse multiplie l'[énergie cinétique](#) par quatre; ce carré de la vitesse est le contrôle mental essentiel pour l'entrée atmosphérique.

Exercice guidé — énergie cinétique

Situation à reconnaître. L'énergie cinétique est l'énergie associée au mouvement et vaut $\frac{1}{2} m v^2$ dans le modèle classique. La dépendance au carré de la vitesse explique pourquoi une entrée rapide exige de dissiper énormément d'énergie.

Vérification demandée. À masse constante, doubler la vitesse multiplie l'énergie cinétique par quatre; ce carré de la vitesse est le contrôle mental essentiel pour l'entrée atmosphérique.

Erreur à écarter. Ne comparez pas deux entrées seulement par leur vitesse sans tenir compte de la masse et de la trajectoire.

Corrigé raisonné

Sens précis

L'énergie cinétique est l'énergie associée au mouvement et vaut $\frac{1}{2} m v^2$ dans le modèle classique. La dépendance au carré de la vitesse explique pourquoi une entrée rapide exige de dissiper énormément d'énergie.

Test du cas

À masse constante, doubler la vitesse multiplie l'énergie cinétique par quatre; ce carré de la vitesse est le contrôle mental essentiel pour l'entrée atmosphérique.

Piège exclu

Ne comparez pas deux entrées seulement par leur vitesse sans tenir compte de la masse et de la trajectoire.

traînée

Exemple concret. Pendant l'entrée martienne, la traînée réduit progressivement la vitesse et transforme une partie de l'énergie en chaleur et mouvement du gaz.

Piège. Plus de traînée n'est pas automatiquement mieux: charge, chauffage et stabilité peuvent devenir limitants.

Définition sans prérequis. La **traînée** est une force aérodynamique qui s'oppose au mouvement relatif dans l'atmosphère. Elle dépend notamment de densité, vitesse, surface et coefficient aérodynamique.

Contrôle mental. À configuration comparable, augmenter densité atmosphérique ou vitesse doit augmenter fortement la **traînée**; un résultat qui la fait chuter exige une vérification des puissances et unités.

Exercice guidé — traînée

Situation à reconnaître. La traînée est une force aérodynamique qui s'oppose au mouvement relatif dans l'atmosphère. Elle dépend notamment de densité, vitesse, surface et coefficient aérodynamique.

Vérification demandée. À configuration comparable, augmenter densité atmosphérique ou vitesse doit augmenter fortement la traînée; un résultat qui la fait chuter exige une vérification des puissances et unités.

Erreur à écarter. Plus de traînée n'est pas automatiquement mieux: charge, chauffage et stabilité peuvent devenir limitants.

Corrigé raisonné

Sens précis

La traînée est une force aérodynamique qui s'oppose au mouvement relatif dans l'atmosphère. Elle dépend notamment de densité, vitesse, surface et coefficient aérodynamique.

Test du cas

À configuration comparable, augmenter densité atmosphérique ou vitesse doit augmenter fortement la traînée; un résultat qui la fait chuter exige une vérification des puissances et unités.

Piège exclu

Plus de traînée n'est pas automatiquement mieux: charge, chauffage et stabilité peuvent devenir limitants.

flux thermique

Exemple concret. Le nez et certaines zones d'un véhicule peuvent recevoir des flux très supérieurs à ceux des zones abritées.

Piège. Température maximale et flux thermique maximal ne sont pas la même grandeur et ne surviennent pas forcément au même instant.

Définition sans prérequis. Le **flux thermique** décrit une puissance thermique reçue par unité de surface, par exemple en W/m^2 . Il sert à dimensionner les protections thermiques.

Contrôle mental. Le pic thermique doit se produire dans une zone cohérente avec forte vitesse et atmosphère suffisamment dense; un maximum après l'atterrissage ou dans le vide est physiquement suspect.

Exercice guidé — flux thermique

Situation à reconnaître. Le flux thermique décrit une puissance thermique reçue par unité de surface, par exemple en W/m^2 . Il sert à dimensionner les protections thermiques.

Vérification demandée. Le pic thermique doit se produire dans une zone cohérente avec forte vitesse et atmosphère suffisamment dense; un maximum après l'atterrissage ou dans le vide est physiquement suspect.

Erreur à écarter. Température maximale et flux thermique maximal ne sont pas la même grandeur et ne surviennent pas forcément au même instant.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le flux thermique décrit une puissance thermique reçue par unité de surface, par exemple en W/m^2 . Il sert à dimensionner les protections thermiques.

Test du cas

Le pic thermique doit se produire dans une zone cohérente avec forte vitesse et atmosphère suffisamment dense; un maximum après l'atterrissage ou dans le vide est physiquement suspect.

Piège exclu

Température maximale et flux thermique maximal ne sont pas la même grandeur et ne surviennent pas forcément au même instant.

corridor d'entrée

Exemple concret. Un angle trop faible peut prolonger ou faire ressortir la trajectoire; trop raide augmente rapidement les charges et le chauffage.

Piège. Le corridor n'est pas un angle unique; il dépend de masse, aérodynamique, atmosphère et stratégie de guidage.

Définition sans prérequis. Le corridor d'entrée est la plage de conditions de trajectoire permettant d'atteindre la zone d'atterrissage sans rebondir trop haut ni descendre trop brutalement.

Contrôle mental. Un angle trop raide augmente les charges et l'échauffement, un angle trop faible risque le rebond ou une portée excessive; la solution doit rester entre ces deux échecs.

Exercice guidé — corridor d'entrée

Situation à reconnaître. Le corridor d'entrée est la plage de conditions de trajectoire permettant d'atteindre la zone d'atterrissage sans rebondir trop haut ni descendre trop brutalement.

Vérification demandée. Un angle trop raide augmente les charges et l'échauffement, un angle trop faible risque le rebond ou une portée excessive; la solution doit rester entre ces deux échecs.

Erreur à écarter. Le corridor n'est pas un angle unique; il dépend de masse, aérodynamique, atmosphère et stratégie de guidage.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le corridor d'entrée est la plage de conditions de trajectoire permettant d'atteindre la zone d'atterrissage sans rebondir trop haut ni descendre trop brutalement.

Test du cas

Un angle trop raide augmente les charges et l'échauffement, un angle trop faible risque le rebond ou une portée excessive; la solution doit rester entre ces deux échecs.

Piège exclu

Le corridor n'est pas un angle unique; il dépend de masse, aérodynamique, atmosphère et stratégie de guidage.

Quantification

corridor d'entrée: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

corridor d'entrée: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Entrée, descente et atterrissage : 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.

Énergie cinétique d'entrée

$$E_k = 1/2 \times m \times v^2$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $E_k = 1/2 \times m \times v^2$ » dans le contexte de «Énergie cinétique d'entrée» ?

2 — Intuition sans symboles

La vitesse pèse au carré : à masse identique, doubler la vitesse multiplie l'énergie cinétique par quatre.

3 — Grandeurs

E_k : énergie cinétique ; m : masse ; v : vitesse.

4 — Formule

$$E_k = 1/2 \times m \times v^2$$

5 — Lecture

Lire la relation « $E_k = 1/2 \times m \times v^2$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

E_k : énergie cinétique ; m : masse ; v : vitesse.

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

E_k en J ; m en kg ; v 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 mécanique classique donne l'énergie de translation par un demi de la masse fois le carré de la vitesse.

11 — Hypothèses

Régime où la formule classique est suffisante et vitesse définie dans le repère choisi.

12 — Contrôle d'unités

E_k en J ; m en kg ; v en m/s. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $m = 20\,000$ kg et $v = 5\,500$ m/s, $E_k = 0,5 \times 20\,000 \times 5\,500^2 = 3,025 \times 10^{11}$ J.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La mécanique classique donne l'énergie de translation par un demi de la masse fois le carré de la vitesse.

15 — Contrôle algébrique

$v = \sqrt{2E_k/m}$ doit redonner 5 500 m/s.

16 — Estimation mentale

5,5 km/s au carré vaut environ 30 millions ; multiplié par 10 000 donne environ 3×10^{11} J.

17 — Interprétation

Cette énergie doit être dissipée ou redirigée pendant l'EDL sans dépasser les limites thermiques et structurelles.

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 masse fixe, +10 % de vitesse produit environ +21 % d'énergie.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $m = 4\,000$ kg et $v = 5\,500$ m/s.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$E_k = 0,5 \times 4\,000 \times 5\,500^2 = 6,05 \times 10^{10} \text{ J.}$$

Exercice autonome. $m = 10\,000 \text{ kg}$ et $v = 250 \text{ m/s}$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$E_k = 0,5 \times 10\,000 \times 250^2 = 3,125 \times 10^8 \text{ J} = 312,5 \text{ MJ.}$$

21 — Décision mission

Dimensionner la séquence EDL sur l'énergie et pas seulement sur la vitesse instantanée.

Pression dynamique

$$q = 1/2 \times \rho \times v^2$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $q = 1/2 \times \rho \times v^2$ » dans le contexte de «Pression dynamique» ?

2 — Intuition sans symboles

Même dans une atmosphère ténue, une grande vitesse peut produire une charge aérodynamique importante car la vitesse intervient au carré.

3 — Grandeurs

q : pression dynamique ; ρ : masse volumique atmosphérique ; v : vitesse relative.

4 — Formule

$$q = 1/2 \times \rho \times v^2$$

5 — Lecture

Lire la relation « $q = 1/2 \times \rho \times v^2$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

q : pression dynamique ; ρ : masse volumique atmosphérique ; v : vitesse relative.

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

q en Pa ; ρ en kg/m^3 ; v 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 pression dynamique représente l'échelle de charge liée au flux d'air incident.

11 — Hypothèses

Densité et vitesse relatives prises au même point de trajectoire.

12 — Contrôle d'unités

q en Pa ; ρ en kg/m^3 ; v en m/s . Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $\rho = 0,010 \text{ kg/m}^3$ et $v = 1\,000 \text{ m/s}$, $q = 0,5 \times 0,010 \times 1\,000^2 = 5\,000 \text{ Pa} = 5 \text{ kPa}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La pression dynamique représente l'échelle de charge liée au flux d'air incident.

15 — Contrôle algébrique

$2q/(v^2)$ doit redonner ρ .

16 — Estimation mentale

0,005 fois un million donne 5 000 Pa.

17 — Interprétation

q aide à définir fenêtres de déploiement et charges, mais ne remplace pas un modèle aérodynamique complet.

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 densité fixe, +10 % de vitesse augmente q d'environ 21 %.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $\rho = 0,015 \text{ kg/m}^3$ et $v = 800 \text{ m/s}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$q = 0,5 \times 0,015 \times 800^2 = 4\,800 \text{ Pa.}$$

Exercice autonome. $\rho = 0,008 \text{ kg/m}^3$ et $v = 1\,200 \text{ m/s}$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$q = 0,5 \times 0,008 \times 1\,200^2 = 5\,760 \text{ Pa.}$$

21 — Décision mission

Déclencher les événements EDL selon état atmosphérique et marges de charge réellement qualifiées.

Poids du véhicule sur Mars

$$W = m \times g_{\text{Mars}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $W = m \times g_{\text{Mars}}$ » dans le contexte de «Poids du véhicule sur Mars» ?

2 — Intuition sans symboles

Le poids est la force gravitationnelle locale : la même masse pèse moins sur Mars que sur Terre.

3 — Grandeurs

W : poids ; m : masse ; g_{Mars} : accélération gravitationnelle martienne locale de premier ordre.

4 — Formule

$$W = m \times g_{\text{Mars}}$$

5 — Lecture

Lire la relation « $W = m \times g_{\text{Mars}}$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

W : poids ; m : masse ; g_{Mars} : accélération gravitationnelle martienne locale de premier ordre.

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

W en N ; m en kg ; g en 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

Une masse soumise à une accélération gravitationnelle produit une force $m \cdot g$.

11 — Hypothèses

$g_{\text{Mars}} \approx 3,71 \text{ m/s}^2$ utilisé comme valeur pédagogique moyenne.

12 — Contrôle d'unités

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

13 — Cas numérique

Pour $m = 20\,000 \text{ kg}$, $W = 20\,000 \times 3,71 = 74\,200 \text{ N} = 74,2 \text{ kN}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Une masse soumise à une accélération gravitationnelle produit une force $m \cdot g$.

15 — Contrôle algébrique

W/m doit redonner 3,71 m/s².

16 — Estimation mentale

20 tonnes fois environ 3,7 donnent environ 74 kN.

17 — Interprétation

Le poids fixe un minimum de poussée pour simplement soutenir le véhicule en descente stationnaire idéale.

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 g fixe, W varie linéairement avec la masse.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. m = 15 000 kg.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$W = 15\,000 \times 3,71 = 55\,650\text{ N} = 55,65\text{ kN}$.

Exercice autonome. m = 8 000 kg.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$W = 8\,000 \times 3,71 = 29\,680\text{ N} = 29,68\text{ kN}$.

21 — Décision mission

Conserver une marge de poussée au-dessus du poids pour guidage et décélération.

Distance de freinage à décélération constante

$d_{\text{freinage}} \approx v^2 / (2a)$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $d_{\text{freinage}} \approx v^2 / (2a)$ » dans le contexte de «Distance de freinage à décélération constante» ?

2 — Intuition sans symboles

Une vitesse élevée demande beaucoup de distance à annuler ; la distance croît avec le carré de la vitesse.

3 — Grandeurs

d_{freinage} : distance ; v : vitesse initiale ; a : module de décélération nette supposée constante.

4 — Formule

$d_{\text{freinage}} \approx v^2 / (2a)$

5 — Lecture

Lire la relation « $d_{\text{freinage}} \approx v^2 / (2a)$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

d_{freinage} : distance ; v : vitesse initiale ; a : module de décélération nette supposée constante.

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

d en m ; v 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

La relation cinématique $v_f^2 = v_i^2 - 2ad$ avec $v_f = 0$ conduit à $d = v^2/(2a)$.

11 — Hypothèses

Décélération constante et mouvement unidimensionnel.

- 12 — Contrôle d'unités
d en m ; v en m/s ; a en m/s². Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
- 13 — Cas numérique
À v = 300 m/s et a = 10 m/s², d = 300²/(20) = 4 500 m.
- 14 — Pourquoi le calcul fonctionne
La relation cinématique $v_f^2 = v_i^2 - 2ad$ avec $v_f = 0$ conduit à $d = v^2/(2a)$.
- 15 — Contrôle algébrique
2ad doit redonner $v^2 = 90\,000\text{ m}^2/\text{s}^2$.
- 16 — Estimation mentale
300² vaut 90 000 ; diviser par 20 donne 4 500 m.
- 17 — Interprétation
Le résultat fournit une échelle minimale de freinage, pas une trajectoire propulsive complète.
- 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 a fixe, +10 % de vitesse augmente la distance d'environ 21 %.
- 20 — Exercices guidé et autonome
Exercice guidé. v = 250 m/s et a = 8 m/s².

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

d = 62 500/16 = 3 906,25 m.

Exercice autonome. v = 200 m/s et a = 5 m/s².

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

d = 40 000/10 = 4 000 m.

- 21 — Décision mission
Déclencher la phase propulsive avec suffisamment d'altitude pour absorber dispersion et marge.

Déplacement vertical de premier ordre

$$\Delta h \approx v_{\text{vertical}} \times \Delta t$$

- 1 — Question concrète
Que permet de calculer « $\Delta h \approx v_{\text{vertical}} \times \Delta t$ » dans le contexte de «Déplacement vertical de premier ordre» ?
- 2 — Intuition sans symboles
Sur un court intervalle, une vitesse verticale moyenne donne immédiatement l'ordre de grandeur du déplacement d'altitude.
- 3 — Grandeurs
 Δh : changement d'altitude ; v_{vertical} : vitesse verticale moyenne ; Δt : durée.
- 4 — Formule
 $\Delta h \approx v_{\text{vertical}} \times \Delta t$
- 5 — Lecture
Lire la relation « $\Delta h \approx v_{\text{vertical}} \times \Delta t$ » en nommant explicitement chaque opération.
- 6 — Symboles et sens
 Δh : changement d'altitude ; v_{vertical} : vitesse verticale moyenne ; Δt : durée.
- 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
 Δh en m ; v en m/s ; t 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

Distance égale vitesse moyenne multipliée par durée.

11 — Hypothèses

Vitesse moyenne représentative ; signe vertical déclaré.

12 — Contrôle d'unités

Δh en m ; v en m/s ; t en s. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $v_{\text{vertical}} = 50$ m/s pendant 10 s, $|\Delta h| \approx 50 \times 10 = 500$ m.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Distance égale vitesse moyenne multipliée par durée.

15 — Contrôle algébrique

$|\Delta h|/\Delta t$ doit redonner 50 m/s.

16 — Estimation mentale

Cinquante mètres par seconde pendant dix secondes donne cinq cents mètres.

17 — Interprétation

Ce contrôle mental permet de détecter une chronologie EDL incompatible avec l'altitude restante.

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 vitesse moyenne fixe, le déplacement varie linéairement avec la durée.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. 40 m/s pendant 12 s.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$|\Delta h| \approx 40 \times 12 = 480$ m.

Exercice autonome. 25 m/s pendant 20 s.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$|\Delta h| \approx 25 \times 20 = 500$ m.

21 — Décision mission

Comparer cette échelle à l'altitude disponible avant chaque événement critique.

Coefficient balistique

$$\beta = m / (C_d \times A)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\beta = m / (C_d \times A)$ » dans le contexte de «Coefficient balistique» ?

2 — Intuition sans symboles

Le coefficient balistique compare la masse à la capacité aérodynamique offerte par surface et traînée ; une valeur élevée signifie généralement plus d'inertie par aire de freinage.

3 — Grandeurs

β : coefficient balistique ; m : masse ; C_d : coefficient de traînée ; A : aire de référence.

4 — Formule

$$\beta = m / (C_d \times A)$$

5 — Lecture

Lire la relation « $\beta = m / (C_d \times A)$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

β : coefficient balistique ; m : masse ; C_d : coefficient de traînée ; A : aire 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

β en kg/m^2 ; m en kg ; C_d sans dimension ; A en m^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

Le dénominateur regroupe l'efficacité aérodynamique géométrique ; la masse au numérateur représente l'inertie à ralentir.

11 — Hypothèses

C_d et A définis selon la même convention aérodynamique.

12 — Contrôle d'unités

β en kg/m^2 ; m en kg ; C_d sans dimension ; A en m^2 . Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $m = 4\,000\text{ kg}$, $C_d = 1,5$ et $A = 15\text{ m}^2$, $\beta = 4\,000/(22,5) = 177,78\text{ kg/m}^2$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le dénominateur regroupe l'efficacité aérodynamique géométrique ; la masse au numérateur représente l'inertie à ralentir.

15 — Contrôle algébrique

$\beta C_d A$ doit redonner la masse.

16 — Estimation mentale

4 000 divisé par un peu plus de 20 donne un peu moins de 200 kg/m^2 .

17 — Interprétation

β aide à comprendre la décélération aérodynamique, mais la trajectoire dépend aussi de densité, vitesse et portance.

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 la masse augmente β ; augmenter C_d ou A le diminue.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $m = 5\,000\text{ kg}$, $C_d = 1,6$, $A = 18\text{ m}^2$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$\beta = 5\,000/(1,6 \times 18) = 173,61\text{ kg/m}^2$.

Exercice autonome. $m = 3\,500\text{ kg}$, $C_d = 1,4$, $A = 12\text{ m}^2$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$\beta = 3\,500/(1,4 \times 8) = 208,33\text{ kg/m}^2$.

21 — Décision mission

Utiliser β avec atmosphère et aérodynamique qualifiées avant de figer la fenêtre EDL.

Progression

1. Vocabulaire sans formule.
2. Calcul avec données déjà converties.
3. Choix des données utiles.

4. Diagnostic d'une erreur volontaire.
5. Décision mission avec [marge](#) et limite.

Gate zéro prérequis

- Je comprends chaque mot clé.
- Je sais lire la relation.
- Je sais [convertir les unités](#).
- Je sais donner un ordre de grandeur.
- Je peux reprendre le corrigé de « énergie cinétique » et expliquer pourquoi chaque étape est nécessaire.

1. Commencer par l'énergie cinétique

L'énergie cinétique vaut $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. m est la masse en kilogrammes, v la vitesse en m/s et E_k l'énergie en joules. Pour 10 000 kg à 5 500 m/s, $E_k \approx 0,5 \times 10\,000 \times 5\,500^2 \approx 1,51 \times 10^{11}$ J. Le carré de la vitesse explique pourquoi quelques kilomètres par seconde représentent un problème énergétique énorme.

L'EDL commence par un problème d'énergie. L'énergie cinétique vaut $E_k = \frac{1}{2}mv^2$: doubler la vitesse multiplie l'énergie par quatre. Un véhicule de 20 000 kg à 5 500 m/s porte environ $0,5 \times 20\,000 \times 5\,500^2 \approx 3,0 \times 10^{11}$ joules, soit près de 300 gigajoules. Toute cette énergie ne devient pas chaleur dans le bouclier, mais elle donne l'ordre de grandeur de ce que l'atmosphère, la [portance](#), les parachutes et les moteurs doivent retirer ou rediriger. Une architecture EDL se comprend donc comme une chaîne de fermeture d'énergie: à chaque phase, quelle fraction de vitesse reste et quel système possède encore l'autorité nécessaire?

2. Le corridor d'entrée est un compromis

Une trajectoire trop raide augmente rapidement chauffage et décélération; une trajectoire trop plate peut ne pas dissiper assez d'énergie ou rebondir hors de la zone utile. Le corridor est un ensemble de conditions admissibles, pas une ligne unique. Navigation et [guidage](#) cherchent à rester à l'intérieur malgré les incertitudes atmosphériques et d'état initial.

Le corridor d'entrée est l'ensemble des états qui évitent deux familles d'échec. Trop raide, la trajectoire concentre décélération et chauffage; trop plate, le véhicule peut ne pas dissiper assez d'énergie, survoler la cible ou ressortir de l'atmosphère. Le corridor n'est pas seulement un angle: masse, [coefficient balistique](#), densité atmosphérique, portance, navigation et limites thermiques le déplacent. L'[incertitude](#) météo martienne et l'erreur d'état consomment une partie de la marge. Une revue sérieuse demande donc quelle largeur de corridor reste après [dispersion](#) et comment le guidage utilise la portance ou l'attitude pour rester à l'intérieur plutôt que de tracer une seule trajectoire nominale.

3. La pression dynamique révèle la charge aérodynamique

$q = \frac{1}{2}\rho v^2$, avec q en pascals, ρ masse volumique en kg/m³ et v vitesse en m/s. Même dans une atmosphère ténue, le terme v^2 peut produire des charges importantes à grande vitesse. La pression dynamique aide à comprendre quand certains dispositifs aérodynamiques peuvent être déployés.

Exercice A — pression dynamique

Prenez $\rho = 0,010$ kg/m³ et $v = 1\,000$ m/s. Calculez q .

$q = 0,5 \times 0,010 \times 1\,000^2 = 5\,000$ Pa, soit 5 kPa. Le nombre est pédagogique et ne décrit pas une atmosphère martienne complète.

Données du cas

Exercice A — pression dynamique — Prenez $\rho = 0,010$ kg/m³ et $v = 1\,000$ m/s. Calculez q .

Relation

$q = 0,5 \times 0,010 \times 1\,000^2 = 5\,000$ Pa, soit 5 kPa.

Raisonnement

$q = 0,5 \times 0,010 \times 1\,000^2 = 5\,000$ Pa, soit 5 kPa. Le nombre est pédagogique et ne décrit pas une atmosphère martienne complète.

Résultat

$q = 0,5 \times 0,010 \times 1\,000^2 = 5\,000$ Pa, soit 5 kPa.

Interprétation

Le nombre est pédagogique et ne décrit pas une atmosphère martienne complète.

La pression dynamique s'écrit $q = \frac{1}{2}\rho v^2$, avec ρ la densité de l'atmosphère en kg/m³ et v la [vitesse relative](#) en m/s. Elle montre pourquoi une atmosphère très ténue peut néanmoins produire des charges importantes à vitesse hypersonique: la vitesse intervient au carré. Les charges aérodynamiques maximales ne coïncident pas nécessairement avec le pic de chauffage. Le véhicule doit donc traverser plusieurs contraintes successives: température, pression dynamique, décélération, stabilité et précision. Mesurer seulement l'altitude ne suffit pas; densité réelle et vitesse déterminent le régime. Le guidage utilise les mesures et le modèle pour savoir dans quelle partie de l'enveloppe il se trouve réellement.

4. Le bouclier thermique gère un flux, une température et une durée

Le chauffage dépend de la trajectoire, de la vitesse, de la densité et de la géométrie. Un matériau ablatif accepte de se transformer pour emporter de l'énergie. Une protection réutilisable cherche plutôt à supporter et redistribuer la chaleur. La température maximale seule ne suffit pas: le flux intégré et les gradients internes conditionnent aussi la survie.

Le bouclier thermique gère un flux instantané et une [dose](#) intégrée. Une forte pointe pendant quelques secondes et un flux plus faible pendant plusieurs minutes peuvent produire des réponses matériaux différentes. Les corrélations de chauffage convectif montrent souvent une très forte dépendance à la vitesse, ce qui rend les premières phases hypersoniques dimensionnantes. L'[ablation](#) accepte de consommer du matériau pour emporter de l'énergie; un matériau réutilisable cherche plutôt à stocker et rayonner la chaleur. Pour Mars, la conception doit ajouter [poussière](#), géométrie, joints et incertitude atmosphérique. Après l'entrée, le système thermique doit aussi éviter que la chaleur stockée migre vers la structure ou l'habitable au mauvais moment.

5. Les parachutes ont un domaine de déploiement

Un parachute ne peut pas être ouvert arbitrairement tôt ou tard. Mach, pression dynamique, masse, diamètre, oscillations et charge structurale créent une enveloppe. Sur Mars, la faible densité limite la capacité du parachute pour les [masses](#) élevées. L'EDL lourde doit donc combiner plusieurs mécanismes de freinage.

Un parachute ne se déploie pas à n'importe quelle vitesse ni sous n'importe quelle pression dynamique. L'enveloppe dépend de Mach, de la densité, de la charge, du diamètre et de la dynamique du véhicule. Mars combine une vitesse encore élevée avec une faible densité, ce qui limite la capacité d'un parachute à porter des charges humaines massives. Le déploiement lui-même crée un transitoire violent: inflation, oscillations et risque d'interaction avec le véhicule. Une architecture lourde peut utiliser le parachute pour retirer une partie de l'énergie sans attendre de lui qu'il réalise tout l'atterrissage. Le critère utile est la vitesse et l'[altitude](#) qu'il livre au système propulsif suivant.

6. La rétropropulsion prend le relais de l'atmosphère

Quand la vitesse reste trop élevée pour le contact, les moteurs fournissent l'impulsion manquante. La condition de contrôle vertical dépend du rapport poussée/poids. Avec une masse de 20 000 kg sur Mars, le poids vaut environ **20 000 × 3,71 = 74,2 kN**. Une poussée totale de 120 kN donne un rapport d'environ 1,62, avant marges et composantes de guidage.

La rétropropulsion doit produire suffisamment de poussée assez tôt pour annuler la vitesse restante tout en gardant une marge de guidage. Une estimation élémentaire de distance de freinage à [accélération](#) constante est $d \approx v^2/(2a)$. À 300 m/s et avec une décélération nette de 10 m/s², l'ordre de grandeur est 4 500 m, sans gravité variable, délai d'allumage ni modulation. Ce calcul explique pourquoi quelques secondes perdues ou une poussée inférieure peuvent consommer rapidement l'altitude. Pour un atterrisseur lourd, les moteurs interagissent aussi avec l'écoulement supersonique puis avec le sol. La poussée disponible doit donc être étudiée avec la navigation, le gimbal, les panaches et la réserve de propergol.

7. Terrain-relative navigation: savoir où l'on est par rapport à la carte

La TRN compare des images prises pendant la descente à des cartes préchargées. Elle peut corriger l'estimation de position et aider à éviter des dangers. Elle ne supprime pas l'incertitude: cartes, illumination, poussière et texture du terrain imposent des limites. Le système doit savoir quand sa confiance est insuffisante.

La navigation relative au terrain compare des images ou mesures de surface avec une carte embarquée afin d'estimer la position par rapport aux dangers et à la cible. Elle devient précieuse lorsque la navigation inertielle seule possède une ellipse d'incertitude trop large. Mais TRN dépend de la qualité de la carte, de la visibilité, de la texture du terrain, de l'altitude et du calcul disponible. Une zone apparemment sûre sur une carte ancienne peut avoir une résolution insuffisante pour un gros véhicule. Le système doit donc transporter une mesure de confiance et une logique de repli. Une correction de position n'est utile que si le véhicule possède encore la capacité de divert correspondante.

8. Le divert doit rester dans une zone atteignable

Détecter un terrain sûr ne sert à rien si le véhicule ne peut plus l'atteindre. Le guidage combine sécurité, distance, temps, poussée et propergol restant. Plus l'atterrisseur descend, plus la zone atteignable se contracte. Le meilleur site est donc le meilleur site accessible, pas le meilleur site absolu.

Un divert est une manœuvre latérale qui échange altitude, vitesse, temps et propergol contre un meilleur site. L'ensemble atteignable rétrécit pendant la descente. À grande altitude, une correction peut être peu coûteuse mais l'incertitude sur le terrain reste forte; près du sol, l'image est excellente mais l'autorité de déplacement est faible. L'algorithme doit donc comparer danger, valeur du site, réserve et temps. Le meilleur site géologique n'est pas toujours le meilleur site d'atterrissage. Pour un véhicule habité, la zone sûre doit aussi considérer inclinaison, portance du sol, dégagement des panaches, accès de l'équipage et distance par rapport aux infrastructures.

9. Les panaches modifient les dernières secondes

À proximité du sol, les jets érodent et accélèrent des particules. Ils peuvent masquer des capteurs, contaminer des surfaces et modifier le terrain sous le véhicule. Pour les grands atterrisseurs, l'interaction plume-surface doit être incluse dans la définition du site et la preuve de stabilité.

Les panaches deviennent une interaction sol-véhicule dans les dernières secondes. Le jet peut creuser, éroder, accélérer des particules et créer un nuage qui dégrade caméras ou capteurs. Les débris peuvent revenir vers les moteurs, les jambes ou des équipements prépositionnés. L'effet dépend de la poussée, de la hauteur, du nombre de moteurs, de l'angle du jet et des propriétés du régolithe. Le design doit donc séparer les zones sensibles, choisir une géométrie de moteur tolérante et prévoir que la visibilité optique puisse chuter juste avant contact. Les données robotisées sont indispensables, mais l'échelle de poussée d'un atterrisseur humain impose des extrapolations qui doivent rester explicitement qualifiées.

10. Scénario de panne: capteur d'altitude incohérent

Si un altimètre devient incohérent, l'estimateur compare inertiel, vitesse, autres capteurs et dynamique attendue. La réaction dépend de la phase: tôt, une correction peut être possible; tard, certaines manœuvres sont interdites. Une règle de FDIR doit préciser les critères de confiance et le comportement en cas de désaccord, pas seulement « utiliser le capteur de secours ».

Un capteur d'altitude incohérent ne doit pas être résolu par une moyenne naïve. Radar, lidar, inertiel et navigation relative au terrain peuvent mesurer des grandeurs différentes avec des retards et des géométries différentes. Le FDIR compare la cohérence avec la vitesse verticale, le terrain attendu et l'historique. Si un radar annonce 800 m tandis que le lidar et la carte convergent vers 650 m, la décision dépend de la confiance, pas seulement du nombre de capteurs. Le mode dégradé doit définir quelle source peut déclencher l'allumage, quelle marge d'altitude supplémentaire est nécessaire et à quel moment l'atterrissage doit être abandonné au profit d'un site ou d'un profil plus conservateur.

Étude guidée — marge d'altitude et décision d'allumage

Considérons un atterrisseur descendant à 250 m/s lorsque le système propulsif devient disponible. Avec une décélération nette moyenne de 12 m/s², la distance idéale $v^2/(2a)$ vaut environ 2 604 m. Ajouter deux secondes de délai d'allumage

consomme déjà environ 500 m supplémentaires au premier ordre, sans compter la gravité et la variation de poussée. Cette comparaison montre pourquoi la détection d'altitude, la **latence** de commande et le temps d'établissement des moteurs appartiennent au même budget.

L'étudiant ajoute ensuite une dispersion: accélération nette réelle comprise entre 10 et 12 m/s² et altitude estimée avec ± 80 m. Le système ne doit pas planifier l'allumage sur la valeur moyenne si le cas bas ne ferme pas. La marge est déterminée par la combinaison conservatrice des incertitudes et par une altitude de décision qui laisse encore une option de repli.

Enfin, on introduit une zone dangereuse détectée après l'allumage. Le divert n'est accepté que si la réserve latérale ne compromet pas la fermeture verticale. L'EDL devient ainsi un arbitrage simultané entre sécurité du terrain, vitesse restante, altitude et propergol.

11. Mini-projet: fermer une chaîne EDL

1. Choisissez masse et vitesse d'entrée pédagogiques.
2. Calculez l'énergie cinétique.
3. Listez ce qui est dissipé par atmosphère, parachute et propulsion.
4. Définissez les mesures de navigation.
5. Ajoutez une zone dangereuse et un divert.
6. Ajoutez une panne capteur pendant la phase terminale.
7. Expliquez les critères de réussite après contact.

La réponse doit suivre énergie, navigation et marge jusqu'au sol.

12. Atelier mission — suivre la fermeture d'énergie pendant la descente

Supposons un véhicule pédagogique de 20 000 kg qui atteint le début de la phase propulsée à 250 m/s. Son énergie cinétique vaut $E = \frac{1}{2}mv^2 = 0,5 \times 20\,000 \times 250^2 = 625 \text{ MJ}$. Cette énergie doit être réduite tout en compensant la gravité et en conservant la capacité de guidage. L'énergie n'indique pas directement la masse de propergol, car le moteur travaille avec une poussée, une impulsion spécifique et une trajectoire; elle donne toutefois un ordre de grandeur utile pour comparer les phases.

Le véhicule doit aussi gérer son altitude. Si une vitesse verticale moyenne de 50 m/s était maintenue pendant 10 s, le déplacement serait environ $\Delta h = v \times \Delta t = 500 \text{ m}$. La descente réelle est accélérée et guidée, mais ce calcul mental permet de vérifier qu'une commande ou un délai de capteur n'est pas absurde par rapport à l'altitude restante.

Les marges sont temporelles autant que propulsives. Une détection de danger tardive peut laisser du carburant mais pas assez de temps pour effectuer un divert. Une bonne interface terminale expose donc état, confiance, réserve de poussée et ensemble de sites encore atteignables.

13. Limites des démonstrations robotiques pour un atterrisseur humain lourd

Les missions robotiques apportent des preuves extraordinaires sur navigation, parachutes, protections thermiques et opérations de surface. Elles ne qualifient pas automatiquement une architecture de plusieurs dizaines de tonnes. Les lois physiques restent valables, mais échelles de masse, géométrie propulsive, panaches, énergie et conséquences d'une erreur changent.

Le raisonnement correct sépare « démontré sur Mars », « démontré dans un essai terrestre représentatif », « simulé avec validation partielle » et « concept d'architecture ». Cette hiérarchie évite de transformer une réussite technologique en preuve d'un système beaucoup plus grand. Une revue EDL mature exige un programme de montée en échelle et les incertitudes qui restent ouvertes.

Sources et références

Calculateurs associés

Mettre en pratique ce module avec:

- [Calculateur d'atterrissages cargo](#)

- [NASA/JPL — Mars 2020 Landing](#)
- [NASA NTRS — The Challenge of Mars EDL \(Entry, Descent, and Landing\)](#)
- [NASA — Plume-Surface Interaction](#)

Complément primaire vérifié: [NASA NTRS — Rocket Plume Interactions for NASA Landing Systems](#)

Studio d'ingénierie — propager une dispersion EDL

Le cas d'étude impose simultanément une densité atmosphérique 15 % plus faible que prévue et une masse véhicule 2 % plus élevée. Le coefficient balistique $\beta = m/(Cd \cdot A)$ augmente donc au moins avec la masse, tandis que la pression dynamique $q = \frac{1}{2}\rho v^2$ diminue directement avec la densité à vitesse identique. L'élève doit expliquer la conséquence: la décélération aérodynamique se déclenche différemment et une part plus importante de l'énergie peut atteindre les phases propulsives.

On demande ensuite de propager cette dispersion jusqu'à la réserve d'ergols terminale sans prétendre faire une simulation haute fidélité. Le raisonnement doit identifier les variables observables en vol, le moment où une estimation atmosphérique peut être corrigée, les seuils qui rendent le site visé inaccessible et le choix d'une zone de déroutement. L'objectif est de faire de l'EDL une chaîne de décisions liées plutôt qu'une succession de technologies indépendantes.

Matrice de compétences FR ↔ EN

#	Français	English	Statut
01	Énergie cinétique d'entrée	Entry kinetic energy	PASS
02	Pression dynamique	Dynamic pressure	PASS
03	Poids du véhicule sur Mars	Vehicle weight on Mars	PASS
04	Distance de freinage à décélération constante	Stopping distance at constant deceleration	PASS
05	Déplacement vertical de premier ordre	First-order vertical displacement	PASS
06	Coefficient balistique	Ballistic coefficient	PASS