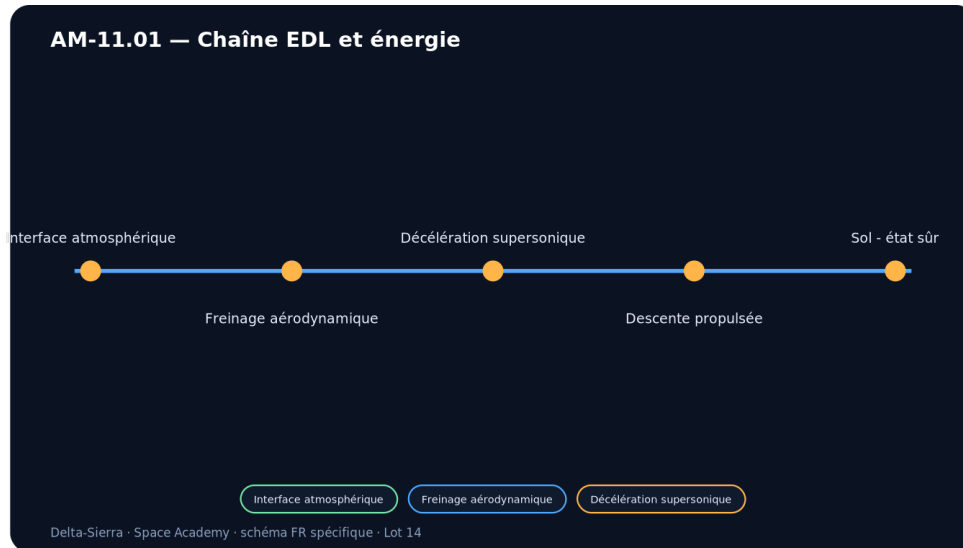


EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper

Question directrice

Concret → vocabulaire → schéma → calcul → limites → mission.



1 — Le phénomène réel

L'EDL est une chaîne d'événements où l'énergie cinétique d'un véhicule arrivant à plusieurs kilomètres par seconde doit être dissipée, convertie ou contrôlée sans perdre la stabilité, la navigation ni la capacité à se poser. Une mission robotique et un futur véhicule humain partagent les mêmes fonctions physiques, mais pas nécessairement les mêmes technologies ni les mêmes masses.

La question directrice de ce cours est : Pourquoi quelques minutes séparent-elles un véhicule interplanétaire d'un atterrisseur posé ? Le raisonnement commence par la fonction physique ou opérationnelle avant d'introduire la relation mathématique. Le but n'est pas d'accumuler des mots, mais de savoir quelle grandeur change, pourquoi elle change et ce qui devient dangereux si elle sort de son domaine. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », ici, la première question est donc de reconnaître le mécanisme propre à ce sujet avant de chercher une formule ou une valeur de référence.

2 — Vocabulaire et frontière du problème

Dans « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », il faut distinguer le phénomène étudié, la mesure disponible, la commande éventuelle, la marge et le critère de réussite. La frontière du calcul précise ce qui est inclus et ce qui ne l'est pas ; sans cette frontière, un pourcentage, une masse ou un temps peut être exact mathématiquement mais faux comme conclusion d'ingénierie. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », la frontière retenue précise aussi ce qui serait compté deux fois ou, au contraire, oublié dans un bilan de mission.

vitesse, énergie cinétique, altitude, décélération et état de chaque événement EDL

une mauvaise estimation d'état, un événement déclenché hors fenêtre ou une réserve de freinage insuffisante
simulation six degrés de liberté, Monte-Carlo de dispersions et répétition de séquences avec défauts injectés

Équation - preuve - décision

$$E_k = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

Panne à tester : La panne de référence n'est pas un vague « composant cassé ». Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », on teste notamment une mauvaise estimation d'état, un événement déclenché hors fenêtre ou une réserve de freinage insuffisante. Le diagnostic demande quels symptômes apparaissent d'abord, lesquels sont seulement des conséquences, et quelle action garde le plus d'options ouvertes.

EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper**3 — Schéma propre au cours**

Le schéma ne résume pas tout le module : il isole ce qui est spécifique à « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper ». On y suit la chaîne cause → grandeur mesurée → décision ou réponse physique → limite. Cette représentation évite précisément de réutiliser le même dessin pour un bouclier thermique, un radar, un filtre à CO₂ ou une procédure d'équipage. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », la lecture graphique doit permettre de retrouver les entrées, les sorties, la grandeur mesurée et la conséquence d'une dérive sans lire le reste du module.

4 — Relation mathématique et lecture des symboles

Lecture orale : E indice k égale un demi multiplié par la masse m et par la vitesse v au carré.

Avant toute substitution numérique, on écrit les unités de chaque terme, on indique si la relation est une loi physique, une approximation ou un indicateur de projet, puis on vérifie l'homogénéité dimensionnelle. Cette discipline est particulièrement importante ici car « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper » combine des grandeurs qui n'ont pas toutes le même statut documentaire. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », le choix de cette relation est justifié par le phénomène étudié ; une autre grandeur dominante conduirait à une autre équation ou à un autre modèle.

5 — Calculs détaillés et interprétation

$$0,5 \times 1\,000 \times 5\,400^2 = 14\,580\,000\,000 \text{ J} = 14,58 \text{ GJ}$$

$$0,5 \times 20\,000 \times 5\,400^2 = 291,6 \text{ GJ}$$

$$(300-1500)/60 = -20 \text{ m/s}^2, \text{ soit environ } 2,04 \text{ g terrestres}$$

1. 1. Masse 1 000 kg à 5 400 m/s $0,5 \times 1\,000 \times 5\,400^2 = 14\,580\,000\,000 \text{ J} = 14,58 \text{ GJ}$ Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper ».

2. 2. Masse 20 000 kg à la même vitesse $0,5 \times 20\,000 \times 5\,400^2 = 291,6 \text{ GJ}$ Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper ».

3. 3. Décélération moyenne pédagogique $(300-1500)/60 = -20 \text{ m/s}^2$, soit environ 2,04 g terrestres Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper ».

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections: 3 — Schéma propre au cours ; 4 — Relation mathématique et lecture des symboles ; 5 — Calculs détaillés et interprétation

Relation à relire: $E_k = 1/2 \times m \times v^2$

Décision attendue: mesurer → comparer à la marge → choisir nominal, dégradé ou arrêté

Contrôle avant de continuer

Expliquez sans relire : 3 — Schéma propre au cours ; 4 — Relation mathématique et lecture des symboles ; 5 — Calculs détaillés et interprétation. Donnez une grandeur mesurée, une marge et une décision possible.

EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper

6 — Ce que la formule ne contient pas

La relation « $E_k = 1/2 \times m \times v^2$ » ne contient pas à elle seule l'ensemble de « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper ». Elle ne dit pas automatiquement si le capteur est valide, si la structure vieillit, si une ressource est accessible, si une commande arrive à temps ou si une panne secondaire retire la marge. L'exemple $0,5 \times 1\,000 \times 5\,400^2 = 14\,580\,000\,000\text{ J} = 14,58\text{ GJ}$ doit donc rester un calcul local et non une architecture complète.

Pour rendre le modèle exploitable, on ajoute explicitement les paramètres qui dominent ce thème : vitesse, énergie cinétique, altitude, décélération et état de chaque événement EDL. On peut alors demander quelle variation modifie réellement le résultat, laquelle reste négligeable et laquelle oblige à changer d'architecture. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », cette limite de modèle indique précisément ce qu'un calcul correct ne permet pas encore d'affirmer sur le système réel.

7 — Instrumentation, observabilité et qualité des données

Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », l'observabilité repose sur vitesse, énergie cinétique, altitude, décélération et état de chaque événement EDL. Chaque donnée reçoit une unité, une fréquence d'acquisition, une incertitude, un horodatage et un domaine de validité. Une valeur qui arrive sans contexte peut être plus dangereuse qu'une absence de mesure parce qu'elle donne une confiance injustifiée.

La cohérence est vérifiée avec au moins une information indépendante lorsque la fonction est critique. Une tendance, un bilan physique ou un second principe de mesure permet de distinguer une vraie évolution du système d'un capteur qui dérive. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », l'instrumentation retenue doit permettre de distinguer une vraie évolution physique d'une dérive de capteur ou d'une mauvaise estimation d'état.

8 — Pannes propres au phénomène et récupération

La panne de référence n'est pas un vague « composant cassé ». Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », on teste notamment une mauvaise estimation d'état, un événement déclenché hors fenêtre ou une réserve de freinage insuffisante. Le diagnostic demande quels symptômes apparaissent d'abord, lesquels sont seulement des conséquences, et quelle action garde le plus d'options ouvertes.

Le mode dégradé doit être défini avant la panne : fonction minimale à conserver, durée admissible, stock consommé, action équipage, condition d'abandon et critère de retour au nominal. Cette séquence est

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	6 — Ce que la formule ne contient pas ; 7 — Instrumentation, observabilité et qualité des données ; 8 — Pannes propres au phénomène et récupération
Relation à relire:	$E_k = 1/2 \times m \times v^2$
Décision attendue:	mesurer → comparer à la marge → choisir nominal, dégradé ou arrêté

Contrôle avant de continuer

Expliquez sans relire : 6 — Ce que la formule ne contient pas ; 7 — Instrumentation, observabilité et qualité des données ; 8 — Pannes propres au phénomène et récupération. Donnez une grandeur mesurée, une marge et une décision possible.

EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper

9 — Cas NASA / cas de référence

Mars 2020 rappelle que l'EDL est une séquence autonome : lorsque le véhicule traverse l'atmosphère, le temps de propagation radio interdit un pilotage depuis la Terre. Le cas réel sert ici à relier énergie initiale, événements et connaissance d'état sans transformer la chronologie de Perseverance en recette universelle.

Ce cas n'est utilisé que dans la limite de ce qu'il démontre. Une mesure de vol, un standard humain, un essai de composant et une étude d'architecture n'ont pas le même niveau de preuve ; le texte indique donc toujours ce qui est observé, calculé, simulé ou encore prospectif. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », le cas NASA cité sert de preuve ciblée pour ce phénomène ; il n'est jamais transformé en architecture martienne universelle.

10 — Compromis d'architecture

Une bonne solution pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper » ne maximise pas un seul indicateur. Elle compare performance nominale, masse, énergie, simplicité, maintenance, temps équipage, dépendances communes et capacité de récupération. L'option qui améliore $0,5 \times 20\,000 \times 5\,400^2 = 291,6$ GJ peut être refusée si elle rend la détection de panne ou la réparation beaucoup plus difficile.

Le compromis est consigné avec ses hypothèses. Si une donnée d'environnement, une masse ou une cadence de mission change, on sait ainsi quelles conclusions doivent être recalculées au lieu de conserver silencieusement un choix devenu obsolète. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », le compromis est donc évalué avec les interfaces réellement touchées par ce thème, plutôt qu'avec une liste générique de qualités souhaitables.

11 — Démonstration, essais et critères de réussite

La stratégie de preuve adaptée à « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper » combine simulation six degrés de liberté, Monte-Carlo de dispersions et répétition de séquences avec défauts injectés. Chaque essai indique le matériel exact, le logiciel, la configuration, l'environnement, les tolérances et le critère de réussite. Une démonstration réussie hors domaine ne remplace pas une qualification dans le domaine de mission.

La preuve grandit par étages : relation analytique, simulation, composant, sous-système, système intégré, durée et panne. Cette hiérarchie évite de présenter un seul essai spectaculaire comme validation de toute la mission. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », la démonstration doit reproduire les contraintes qui rendent ce phénomène difficile ; un essai

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	9 — Cas NASA / cas de référence ; 10 — Compromis d'architecture ; 11 — Démonstration, essais et critères de réussite
Relation à relire:	$E_k = 1/2 \times m \times v^2$
Décision attendue:	mesurer → comparer à la marge → choisir nominal, dégradé ou arrêté

Contrôle avant de continuer

Expliquez sans relire : 9 — Cas NASA / cas de référence ; 10 — Compromis d'architecture ; 11 — Démonstration, essais et critères de réussite. Donnez une grandeur mesurée, une marge et une décision possible.

EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper**12 — Exercice de décision**

Situation : reprenez « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper » en augmentant de 20 % la grandeur la plus pénalisante du premier exemple, tout en déclarant indisponible un moyen de mesure ou de secours.

Situation : reprenez « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper » en augmentant de 20 % la grandeur la plus pénalisante du premier exemple, tout en déclarant indisponible un moyen de mesure ou de secours. Réponse attendue : recalculer la relation, identifier la marge restante, vérifier si l'observabilité suffit encore, puis décider si le mode dégradé reste acceptable. Une simple multiplication par 1,2 ne suffit pas si la variation change aussi les interfaces ou les limites.

13 — À retenir sans généraliser abusivement**14 — Sources primaires spécifiques au sujet**

Ces références documentent directement le phénomène, la technologie ou la contrainte humaine traitée dans ce cours. Elles ne définissent pas à elles seules une architecture martienne officielle. Pour « EDL martien : comprendre l'entrée, la descente, l'atterrissage et l'énergie à dissiper », la bibliographie est volontairement ciblée sur le sujet de cette page afin que le lecteur puisse remonter jusqu'au document primaire pertinent.

Sources primaires spécifiques

NASA NTRS — Entry, Descent and Landing State of the Union and Future Technologies -
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20230012330>

NASA NTRS — Assessment of the Mars 2020 Entry, Descent, and Landing Flight Mechanics Simulation -
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20210024480>

NASA NTRS — Human Mars Entry, Descent, and Landing Architecture Study -
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20160011571>

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	12 — Exercice de décision ; 13 — À retenir sans généraliser abusivement ; 14 — Sources primaires spécifiques au sujet
Relation à relire:	$E_k = 1/2 \times m \times v^2$
Décision attendue:	mesurer → comparer à la marge → choisir nominal, dégradé ou arrêt

Contrôle avant de continuer

Expliquez sans relire : 12 — Exercice de décision ; 13 — À retenir sans généraliser abusivement ; 14 — Sources primaires spécifiques au sujet. Donnez une grandeur mesurée, une marge et une décision possible.