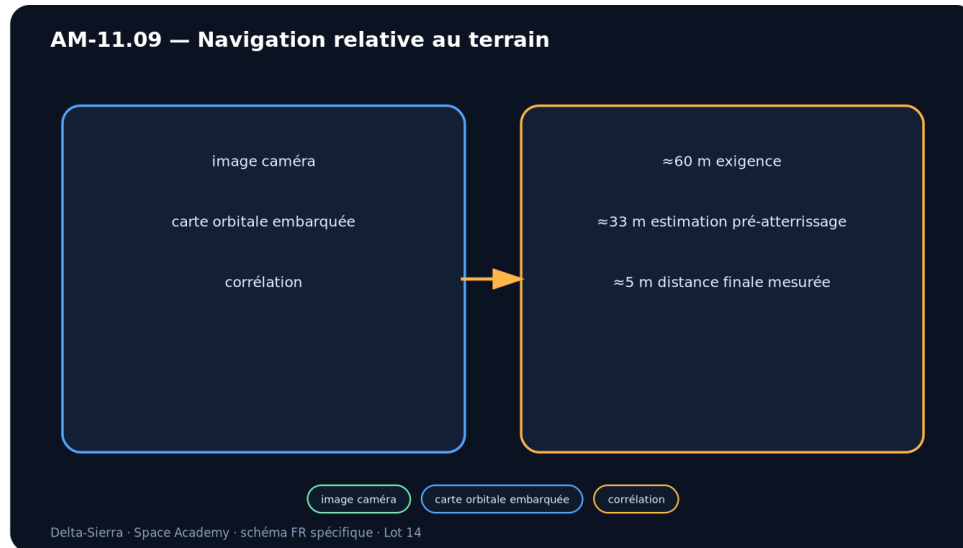


Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position

Question directrice

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



1 — Le phénomène réel

La navigation relative au terrain compare des images prises pendant la descente à une carte embarquée ou à des repères prévus. Elle produit une correction de position qui peut être fusionnée avec l'inertiel. Perseverance a démontré cette logique avec la Terrain-Relative Navigation et le Lander Vision System. Pour un véhicule futur, le principe reste utile, mais les altitudes, capteurs, cartes et marges dépendent de l'architecture.

La question directrice de ce cours est : Comment une caméra peut-elle aider un atterrisseur à savoir où il se trouve réellement ? 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », la frontière retenue précise aussi ce qui serait compté deux fois ou, au contraire, oublié dans un bilan de mission.

images de descente, position estimée, qualité de corrélation, carte de référence et distance à la cible sûre
une scène pauvre en relief, une carte mal géoréférencée, un éclairage défavorable ou une solution de corrélation erronée

rejeu d'images, scènes synthétiques, campagnes terrain et mesure de l'erreur de localisation par rapport à une vérité connue

Équation - preuve - décision

$e = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}$; échelle = distance / pixels

Panne à tester : La panne de référence n'est pas un vague « composant cassé ». Pour « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », on teste notamment une scène pauvre en relief, une carte mal géoréférencée, un éclairage défavorable ou une solution de corrélation erronée. Le diagnostic demande quels symptômes apparaissent d'abord, lesquels sont seulement des conséquences, et quelle action garde le plus d'options ouvertes.

Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position

3 — Schéma propre au cours

Le schéma ne résume pas tout le module : il isole ce qui est spécifique à « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position ». 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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 : l'erreur e est la racine carrée de Δx au carré plus Δy au carré ; l'échelle associe une distance réelle à un nombre de pixels.

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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position » combine des grandeurs qui n'ont pas toutes le même statut documentaire. Pour « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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

250 m / 1 000 pixels = 0,25 m/pixel

20 m/s pendant 25 s → environ 500 m si la vitesse latérale pouvait être maintenue

1. 1. Erreur cartographique $\sqrt{(30^2 + 40^2)} = 50$ m Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position ».
2. 2. Échelle d'image 250 m / 1 000 pixels = 0,25 m/pixel Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position ».
3. 3. Capacité de déport pédagogique 20 m/s pendant 25 s → environ 500 m si la vitesse latérale pouvait être maintenue Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position ».

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	3 — Schéma propre au cours ; 4 — Relation mathématique et lecture des symboles ; 5 — Calculs détaillés et interprétation
Relation à relire:	$e = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}$; échelle = distance / pixels
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.

Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position

6 — Ce que la formule ne contient pas

La relation « $e = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}$; échelle = distance / pixels » ne contient pas à elle seule l'ensemble de « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position ». 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 $\sqrt{(30^2+40^2)} = 50$ m 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 : images de descente, position estimée, qualité de corrélation, carte de référence et distance à la cible sûre. On peut alors demander quelle variation modifie réellement le résultat, laquelle reste négligeable et laquelle oblige à changer d'architecture. Pour « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », l'observabilité repose sur images de descente, position estimée, qualité de corrélation, carte de référence et distance à la cible sûre. 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », on teste notamment une scène pauvre en relief, une carte mal géoréférencée, un éclairage défavorable ou une solution de corrélation erronée. 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:	$e = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}$; échelle = distance / pixels
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.

Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position

9 — Cas NASA / cas de référence

Le retour d'expérience Mars 2020 permet de chiffrer ce cours : l'analyse de performance TRN publiée par la NASA indique une exigence de précision de localisation d'environ 60 m, une estimation pré-atterrissage d'environ 33 m et une distance finale mesurée d'environ 5 m par rapport à la cible sélectionnée. Ces trois nombres décrivent des étapes et métriques distinctes ; ils ne doivent pas être fusionnés en une « précision TRN » unique.

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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position » 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 250 m / 1 000 pixels = 0,25 m/pixel 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position » combine rejou d'images, scènes synthétiques, campagnes terrain et mesure de l'erreur de localisation par rapport à une vérité connue. 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », la

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	9 — Cas NASA / cas de référence ; 10 — Compromis d'architecture ; 11 — Démonstration, essais et critères de réussite
Relation à relire:	$e = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}$; échelle = distance / pixels
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.

Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position

12 — Exercice de décision

Situation : reprenez « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position » 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position » 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 « Navigation relative au terrain : reconnaître Mars pour corriger la position », 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 — The Lander Vision System for Mars 2020 EDL - <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190025658>

NASA NTRS — Mars 2020 Terrain-Relative Navigation performance - <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230007014>

NASA NTRS — The Mars 2020 Perseverance Navigation Filter - <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230005661>

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	12 — Exercice de décision ; 13 — À retenir sans généraliser abusivement ; 14 — Sources primaires spécifiques au sujet
Relation à relire:	$e = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}$; échelle = distance / pixels
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.