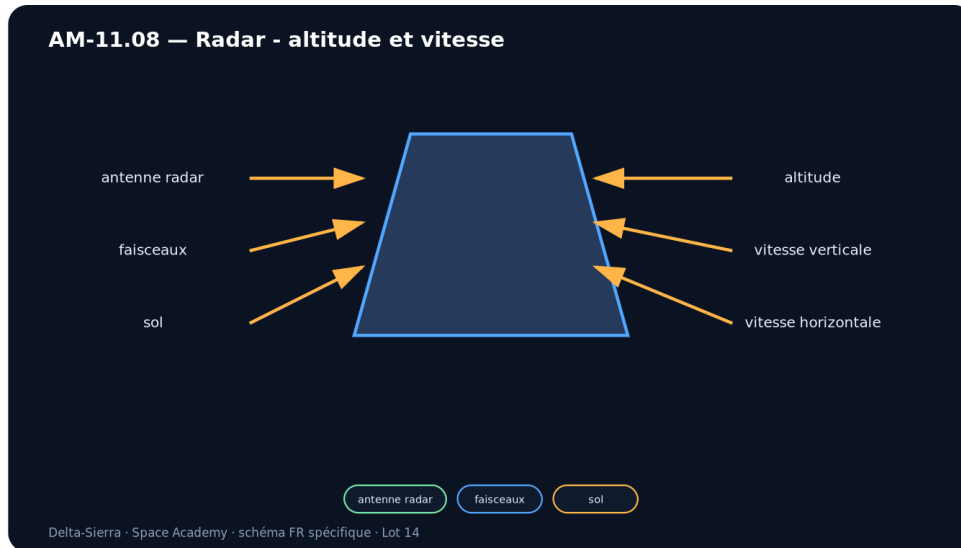


Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol

Question directrice

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



1 — Le phénomène réel

La navigation terminale fusionne plusieurs capteurs : centrale inertielle, radar, parfois lidar, caméra et modèles du terrain. Un altimètre radar mesure un temps aller-retour ou une fréquence modulée ; un radar Doppler peut estimer une vitesse relative. Ces mesures ont des biais, du bruit, des zones d'ombre et des limites de géométrie. La sûreté vient de la fusion, du contrôle de cohérence et de la détection d'une mesure impossible.

La question directrice de ce cours est : Comment un atterrisseur estime-t-il altitude et vitesse quand quelques secondes d'erreur peuvent être fatales ? 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », la frontière retenue précise aussi ce qui serait compté deux fois ou, au contraire, oublié dans un bilan de mission.

altitude, vitesse verticale et horizontale, qualité de mesure, biais et cohérence entre capteurs

un biais commun, un retour sol ambigu, une perte de verrouillage ou une fusion de données qui accepte une mesure fautive

banc capteurs, données enregistrées, terrain représentatif, campagnes hardware-in-the-loop et comparaison à une vérité indépendante

Équation - preuve - décision

$$d = c \times \Delta t / 2 ; v_r \approx c \times \Delta f / (2 f_0)$$

Panne à tester : La panne de référence n'est pas un vague « composant cassé ». Pour « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », on teste notamment un biais commun, un retour sol ambigu, une perte de verrouillage ou une fusion de données qui accepte une mesure fautive. Le diagnostic demande quels symptômes apparaissent d'abord, lesquels sont seulement des conséquences, et quelle action garde le plus d'options ouvertes.

Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol**3 — Schéma propre au cours**

Le schéma ne résume pas tout le module : il isole ce qui est spécifique à « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol ». 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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 : la distance d égale la vitesse de la lumière c fois le temps aller-retour Δt divisé par deux ; la vitesse radiale dépend approximativement du décalage Doppler.

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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol » combine des grandeurs qui n'ont pas toutes le même statut documentaire. Pour « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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

$$\Delta t = 2 \times 10\,000 / 299\,792\,458 \approx 66,7 \mu\text{s}$$

$$v \approx 299\,792\,458 \times 160\,000 / (2 \times 24 \times 10^9) \approx 999,3 \text{ m/s}$$

Une erreur de 5 m sur 1 000 m correspond à 0,5 %

1. 1. Écho à 10 km $\Delta t = 2 \times 10\,000 / 299\,792\,458 \approx 66,7 \mu\text{s}$ Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol ».

2. 2. Doppler pédagogique à 24 GHz $v \approx 299\,792\,458 \times 160\,000 / (2 \times 24 \times 10^9) \approx 999,3 \text{ m/s}$ Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol ».

3. 3. Erreur relative Une erreur de 5 m sur 1 000 m correspond à 0,5 % Interprétation : ce résultat n'est utilisé qu'après comparaison avec les unités, la marge et la frontière du scénario de « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol ».

Tableau opérationnel

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

Relation à relire: $d = c \times \Delta t / 2$; $v_r \approx c \times \Delta f / (2 f_0)$

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.

Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol

6 — Ce que la formule ne contient pas

La relation « $d = c \times \Delta t / 2$; $v_r \approx c \times \Delta f / (2 f_0)$ » ne contient pas à elle seule l'ensemble de « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol ». 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 $\Delta t = 2 \times 10\,000 / 299\,792\,458 \approx 66,7 \mu s$ 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 : altitude, vitesse verticale et horizontale, qualité de mesure, biais et cohérence entre capteurs. On peut alors demander quelle variation modifie réellement le résultat, laquelle reste négligeable et laquelle oblige à changer d'architecture. Pour « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », l'observabilité repose sur altitude, vitesse verticale et horizontale, qualité de mesure, biais et cohérence entre capteurs. 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », on teste notamment un biais commun, un retour sol ambigu, une perte de verrouillage ou une fusion de données qui accepte une mesure fausse. 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:	$d = c \times \Delta t / 2$; $v_r \approx c \times \Delta f / (2 f_0)$
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.

Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol

9 — Cas NASA / cas de référence

Les systèmes de descente doivent distinguer altitude, vitesse et attitude. Une mesure radar ou lidar n'est utile que si sa géométrie, sa validité, son horodatage et son intégration dans le filtre de navigation sont maîtrisés ; un nombre isolé n'est pas encore un état de navigation.

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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol » 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 $v \approx 299\,792\,458 \times 160\,000 / (2 \times 24 \times 10^9) \approx 999,3$ m/s 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol » combine banc capteurs, données enregistrées, terrain représentatif, campagnes hardware-in-the-loop et comparaison à une vérité indépendante. 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 étapes : 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », la démonstration doit reproduire les contraintes qui rendent ce phénomène difficile ; un essai spectaculaire mais hors domaine n'est pas suffisant.

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	9 — Cas NASA / cas de référence ; 10 — Compromis d'architecture ; 11 — Démonstration, essais et critères de réussite
Relation à relire:	$d = c \times \Delta t / 2$; $v_r \approx c \times \Delta f / (2 f_0)$
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.

Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol**12 — Exercice de décision**

Situation : reprenez « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol » 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol » 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 « Radar, altimétrie et vélocimétrie : savoir où l'on est avant le sol », 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 Mars 2020 Perseverance Navigation Filter - <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230005661>

NASA NTRS — Precision Landing & Hazard Avoidance - <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170001719>

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

Tableau opérationnel

Phénomènes / sections:	12 — Exercice de décision ; 13 — À retenir sans généraliser abusivement ; 14 — Sources primaires spécifiques au sujet
Relation à relire:	$d = c \times \Delta t / 2$; $v_r \approx c \times \Delta f / (2 f_0)$
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.