

Comment un premier étage Falcon 9 revient-il et se pose-t-il ?

Version PDF de travail - contenu du cours HTML canonique

Boussole du cours

Question directrice : Quelles fonctions doivent coopérer pour transformer un premier étage lancé à grande vitesse en véhicule posé verticalement ?

Repères : MESURÉ · CONVENTION · CALCULÉ · HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE · DONNÉE DE MISSION · DONNÉE CONSTRUCTEUR · APPROXIMATION

Objectifs :

- décrire la séquence de retour
- comprendre le rôle des grid fins
- comprendre les rallumages moteur
- relier navigation et TVC
- distinguer faits publics et contrôle propriétaire

Réponse essentielle

Comment un premier étage Falcon 9 revient-il et se pose-t-il ? La question à résoudre est la suivante : Quelles fonctions doivent coopérer pour transformer un premier étage lancé à grande vitesse en véhicule posé verticalement ? Repères : MESURÉ · CONVENTION · CALCULÉ · HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE · DONNÉE DE MISSION · DONNÉE CONSTRUCTEUR · APPROXIMATION Objectifs : décrire la séquence de retour comprendre le rôle des grid fins comprendre les rallumages moteur relier navigation et TVC distinguer faits publics et contrôle propriétaire ? La récupération n'est pas un "freinage au dernier moment". SpaceX publie des séquences où le premier étage se sépare, se retourne, effectue éventuellement un boostback burn, puis un entry burn et enfin un landing burn. La suite du cours montre comment passer de cette idée à un raisonnement contrôlable : unités explicites, hypothèses annoncées, calculs reproductibles, ordre de grandeur et limites d'interprétation. Le résultat n'est utile que si l'on peut expliquer ce qu'il mesure, d'où viennent les nombres et quelle décision d'ingénierie il éclaire.

Synthèse de départ : les démonstrations, exemples, limites et sources sont développés dans le corps du cours.

Mots clés avant de commencer

propergol · poussée · unité · ordre de grandeur · hypothèse

1 — Le retour commence avant l'atterrissage

La récupération n'est pas un "freinage au dernier moment". SpaceX publie des séquences où le premier étage se sépare, se retourne, effectue éventuellement un boostback burn, puis un entry burn et enfin un landing burn.

Chaque étape modifie énergie, trajectoire et orientation afin que la phase suivante reste possible.

2 — Pourquoi un boostback burn ?

Pour certaines missions, le premier étage doit modifier fortement sa trajectoire horizontale afin de revenir vers une zone d'atterrissage. Un allumage moteur fournit le delta-v correspondant.

Il existe un compromis : l'ergol réservé au retour n'est plus disponible pour accélérer la charge utile. La réutilisation se paie donc dans l'architecture de performance.

3 — Entry burn : gérer vitesse et environnement

Le premier étage rentre dans une atmosphère de plus en plus dense. Un allumage peut réduire la vitesse et donc certaines charges thermiques/aérodynamiques avant la traversée la plus exigeante.

Le guidage doit tenir compte du vent, de la densité atmosphérique et de l'état réel du véhicule, pas seulement d'une trajectoire idéale calculée au sol.

4 — Ailettes de grille : orienter l'aérodynamique

SpaceX indique que Falcon 9 possède quatre grid fins hypersoniques qui orientent la fusée pendant la rentrée en déplaçant le centre de pression.

Elles ne remplacent pas le moteur : elles fournissent une autorité aérodynamique lorsque l'atmosphère est suffisamment dense. Plus tard, le moteur reprend un rôle central pour la décélération finale.

5 — Landing burn : contrôler vitesse verticale et position

L'objectif est de réduire la vitesse jusqu'à une valeur compatible avec le contact au sol, au bon endroit et dans la bonne orientation. Le moteur peut être orienté par TVC et sa poussée modulée dans les limites disponibles.

La commande est automatique : capteurs, navigation et calculateur de vol estiment position, vitesse et attitude, puis adaptent les commandes. Un opérateur humain ne "pilote" pas à vue la descente seconde par seconde.

6 — Pourquoi les moteurs bougent-ils ?

En orientant l'axe de poussée, le système crée une composante latérale et un couple. Il peut donc corriger attitude et trajectoire tout en freinant.

L'actionneur doit déplacer et maintenir le moteur malgré de grandes charges. C'est un problème de mécanique, hydraulique/électromécanique, capteurs et commande, pas uniquement de logiciel.

7 — Ce que nous ne savons pas publiquement

Les détails exacts des lois de guidage, gains, filtres, tolérances et stratégies d'optimisation SpaceX ne sont pas entièrement publics. Le cours présente donc les fonctions démontrées et les principes de contrôle généraux, sans inventer un algorithme Falcon 9.

Cette distinction entre architecture observable et détails propriétaires est une règle de méthode de Space Academy.

8 — Atterrir consiste surtout à gérer l'énergie restante

Après séparation, le premier étage possède encore une vitesse, une altitude, une orientation et une quantité de propergol limitée. Le retour consiste à redistribuer cette énergie au fil de plusieurs phases : manœuvrer l'étage, utiliser l'atmosphère lorsque c'est utile, freiner par propulsion et arriver avec une vitesse verticale compatible avec le contact au sol ou sur une barge.

Cette lecture énergétique évite de croire que la fusée « vise » simplement la plateforme. La navigation estime l'état, le guidage choisit une trajectoire réalisable et le contrôle fait suivre cette trajectoire tout en respectant les limites aérodynamiques, thermiques, mécaniques et propulsives.

9 — Pourquoi l'automatisation est indispensable

Les événements importants du retour se déroulent trop vite et demandent trop de corrections pour être pilotés manuellement depuis le sol. Le véhicule embarque donc des ordinateurs, des capteurs et des logiciels capables de fermer les boucles localement. Les équipes humaines définissent l'architecture, vérifient les logiciels, surveillent la mission et décident des règles ; mais la correction instantanée doit être effectuée à bord.

Cette automatisation n'est pas l'absence d'humain : c'est une transformation du rôle humain. Au lieu de déplacer directement une commande en vol, les équipes conçoivent le système qui saura mesurer, décider dans ses limites et agir automatiquement. C'est exactement la logique que l'on retrouvera dans un atterrisseur lunaire ou martien.

Exercices et corrigés

Séquence

Placez dans l'ordre : landing burn, stage flip, entry burn.

Trade-off

Pourquoi réserver du carburant au retour réduit-il la performance de mission ?

Automatisation

Pourquoi un humain ne commande-t-il pas directement chaque correction ?

Sources primaires et techniques

- SpaceX — Falcon 9
- SpaceX — Falcon 9 launch, landing and deployment sequence
- NASA Glenn — Rocket Control
- NASA NTRS — Considerations for TVC in-flight load predictions