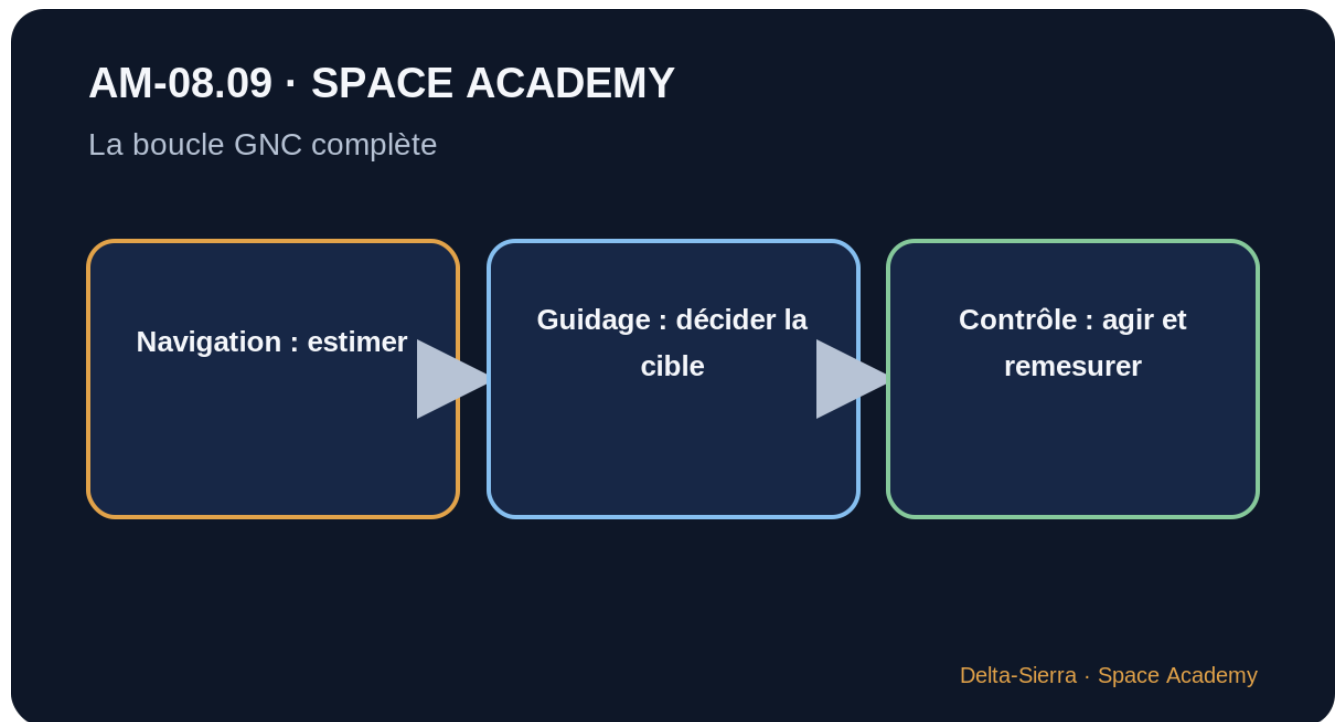


AM-08.09 — GNC : la boucle complète qui observe, décide et agit

Quelle différence y a-t-il entre guidage, navigation et contrôle, et comment ces trois fonctions coopèrent-elles plusieurs fois par seconde ?



Observer, estimer, comparer, commander, puis observer à nouveau : la boucle ne s'arrête pas tant que la mission continue.

1 - Comprendre la scène

Un atterrisseur martien descend vers le sol. Il possède une trajectoire souhaitée, mais des rafales, des erreurs de modèle et des dispersions le déplacent. Le système doit répondre en boucle : où suis-je réellement ? où devrais-je être ? quelle correction faut-il commander ? les moteurs ont-ils produit l'effet attendu ?

Ces questions correspondent aux trois lettres GNC : Guidance, Navigation and Control. La navigation estime l'état ; le guidage construit la consigne ou trajectoire à suivre ; le contrôle transforme l'écart entre état réel et état désiré en commandes aux actionneurs.

2 - Vocabulaire essentiel

Guidage - Fonction qui détermine où le véhicule doit aller ou quelle attitude il doit viser.

Navigation - Fonction qui estime où se trouve le véhicule, comment il bouge et comment il est orienté.

Contrôle / commande - Fonction qui calcule l'action à appliquer pour réduire l'écart entre consigne et état estimé.

État - Ensemble minimal de grandeurs nécessaires au modèle : position, vitesse, attitude, taux de rotation, etc.

Consigne - Valeur désirée : angle, vitesse, trajectoire, altitude ou autre cible.

Boucle de rétroaction - Organisation où le résultat de l'action est remesuré et réinjecté afin de corriger la commande suivante.

3 - Mécanisme pas à pas

1. Mesurer et estimer

Capteurs radio, IMU, étoiles, caméras ou altimètres produisent des observations. Un estimateur les combine pour fournir un état cohérent avec une incertitude.

2. Comparer au besoin de mission

Le guidage fournit une trajectoire ou attitude désirée. Le système calcule un écart : par exemple 2° trop à droite ou 15 m/s trop rapide.

3. Commander puis vérifier

Le contrôleur transforme l'erreur en commande de roues, moteurs, gouvernes ou propulseurs. Le véhicule réagit ; de nouvelles mesures arrivent ; la boucle recommence. La stabilité dépend du bon réglage des délais, gains, modèles et limites.

4 - Formules et lecture

$$e = \text{consigne} - \text{mesure}$$

« e égale consigne moins mesure ». e est l'erreur de commande.

On soustrait l'état estimé à la cible pour connaître le sens et l'amplitude de la correction nécessaire.

$$u = K_p \times e$$

« u égale K p multiplié par e ». u représente une commande et Kp un gain proportionnel simple.

Dans un contrôleur proportionnel élémentaire, une erreur deux fois plus grande produit une commande deux fois plus grande. Les systèmes réels ajoutent limites, dynamique et autres termes.

5 - Unités et vérification

Une boucle GNC peut mélanger des mètres, m/s, degrés, rad/s, newtons et newton-mètres. Les unités doivent être cohérentes avec le gain qui transforme une erreur en commande. Un gain n'est donc pas un nombre arbitraire sans dimension dans tous les cas.

Avant d'utiliser un gain, demandez : « quelle unité entre dans le contrôleur, quelle unité doit en sortir ? ». Cette question détecte beaucoup d'erreurs de modèle.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Pointage proportionnel

Une antenne est 4° à droite de sa cible. Convention : erreur négative. $K_p = 0,5$ unité de commande par degré.

$$e = 0 - 4 = -4^\circ$$

$$u = 0.5 \times (-4)$$

$$u = -2 \text{ unités de commande}$$

Conclusion: La commande agit dans le sens qui réduit l'erreur, si les conventions de signe sont cohérentes.

Exemple 2 — Guidage de vitesse

La vitesse verticale estimée est -65 m/s et la consigne est -50 m/s.

$$e = -50 - (-65)$$

$$e = +15 \text{ m/s}$$

Conclusion: Le véhicule descend 15 m/s plus vite que souhaité ; le contrôleur doit commander une action qui réduit la vitesse de descente.

Exemple 3 — Capteur aberrant

Deux capteurs sont cohérents ; un troisième saute soudainement de 2° à 80°.

test de plausibilité
isoler la mesure aberrante
continuer en mode dégradé si possible

Conclusion: Une boucle robuste ne doit pas transformer automatiquement toute mesure reçue en ordre moteur.

7 - Approfondissement

Stabilité

Un gain trop faible peut rendre la correction lente ; un gain trop fort, associé à des retards et à l'inertie du véhicule, peut provoquer oscillations ou instabilité. Régler une boucle est donc un problème dynamique.

Saturation des actionneurs

Le contrôleur peut demander plus que le moteur, la roue ou la vanne ne peut fournir. Le logiciel doit connaître ces limites et éviter qu'une commande irréalisable ne dégrade l'estimation ou l'intégrateur.

FDIR et modes dégradés

Fault Detection, Isolation and Recovery signifie détecter un défaut, identifier sa source probable et reconfigurer le système. Une mission lointaine doit souvent le faire avant que la Terre puisse répondre.

Guidage autonome

Le guidage peut être une simple consigne constante ou un algorithme qui recalcule en permanence une trajectoire optimale, évite un danger ou choisit un site d'atterrissage compatible avec l'état réel.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

L'EDL martien — entrée, descente, atterrissage — concentre toutes les fonctions GNC dans quelques minutes : estimation rapide, guidage vers une cible, contrôle de l'attitude et de la vitesse, détection des anomalies.

Une base martienne utilisera aussi des boucles GNC dans des drones, rovers, grues, véhicules pressurisés et systèmes d'amarrage. Comprendre la boucle générale permet ensuite de comprendre des machines très différentes.

9 - Pièges fréquents

- Utiliser « guidage » comme synonyme de toute la navigation.
- Brancher un capteur directement sur un actionneur sans estimation ni vérification.
- Ignorer le délai de la boucle.
- Choisir un gain sans regarder les unités et la dynamique.
- Supposer qu'une boucle reste stable quand un actionneur sature ou qu'un capteur tombe en panne.

10 - Exercices guidés

Question: Consigne 10° , mesure 12° . Quelle erreur $e = \text{consigne} - \text{mesure}$?

Réponse: $10 - 12 = -2^\circ$.

Question: Avec $K_p = 0,4 \text{ commande}/^\circ$, quelle commande proportionnelle ?

Réponse: $u = 0,4 \times (-2) = -0,8 \text{ unité de commande}$.

Question: Pourquoi la navigation et le contrôle doivent-ils rester distincts ?

Réponse: La navigation estime la réalité à partir des capteurs ; le contrôle décide comment agir. Mélanger les deux masque les erreurs et complique la sûreté.

11 - À savoir expliquer

- Distinguer clairement guidage, navigation et contrôle.
- Décrire une boucle capteur → estimation → consigne → contrôleur → actionneur → véhicule → capteur.
- Calculer une erreur simple et une commande proportionnelle.
- Expliquer saturation, délai et stabilité en termes ordinaires.
- Donner le rôle de FDIR dans une mission autonome.

12 - Sources NASA / JPL

NASA - State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology, Guidance Navigation and Control
<https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/guidance-navigation-and-control/>

Ressource pédagogique libre : ce cours explique les principes pour un public débutant. Il ne remplace ni la conception de mission, ni les modèles de vol opérationnels, ni les procédures, essais et validations d'une agence spatiale.