

AM-04.26 · SPACE ACADEMY

Orienter la poussée : gimbal, vérins et contrôle vectoriel

De l'ailette dans le jet de la V-2
à la tuyère orientable :
comprendre comment quelques
degrés de mouvement
produisent le couple qui pilote
un lanceur.

Boussole du cours

Question directrice : Comment déplacer une poussée gigantesque sans déplacer toute la fusée comme un gouvernail ?

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

Objectifs :

- définir TVC et gimbal
- relier angle de poussée et couple
- comprendre le rôle des actionneurs
- comparer hydraulique et électromécanique
- identifier les charges supportées par la structure de cardan

Ressource pédagogique libre : ce contenu ne constitue ni une formation professionnelle, ni un diplôme, ni une certification, ni une habilitation. Les exemples de conception sont pédagogiques et ne remplacent pas l'ingénierie, les essais et la **qualification** INFO réglementaire d'un système spatial réel.

Réponse essentielle

ORIENTER LA TUYÈRE : LE GIMBAL ET LE CONTRÔLE DE LA POUSSÉE
En orientant la tuyère, on oriente la poussée et on dirige la fusée.

1 Situation réelle
Un lanceur réalisable se pose sur Mars. Il doit garder sa trajectoire verticale et atterrir en douceur.

2 Le principe
Si la poussée est parfaitement correcte, la fusée reste bien droite.
Si la tuyère s'incline, le vecteur de poussée s'incline aussi.
→ Cela crée un couple qui fait tourner la fusée et corrige sa direction.

3 Comprendre le schéma
Axe central de la fusée
Vecteur de poussée (P)
Angle (θ)
Cet axe central est la fusée et corrige sa trajectoire.

4 Exemple concret
Le lanceur commence à pencher vers la droite.
→ L'ordinateur incline la tuyère vers la gauche.
→ Le vecteur de poussée se décale et ramène la fusée bien droite.

5 C'est automatique et très rapide !
Des actionneurs mesurent en permanence la position et la vitesse de la fusée.
Le calcul des corrections est automatisé et se fait en quelques millisecondes.
Des commandes sont envoyées par seconde pour corriger la position et la vitesse.

6 Comment bouge la tuyère ?
Point de pivot (axe de rotation)
Actionneur hydraulique ou électromécanique
Cylindre de poussée
Cylindre de poussée

7 Se lit ainsi
Vecteur de poussée (P)
Angle (θ)
Angle (θ) : l'angle entre l'axe central de la fusée et le vecteur de poussée.

8 À retenir
En orientant la tuyère, on oriente la poussée.
Le principe permet de garder la trajectoire et d'atterrir en douceur, même dans des conditions difficiles !

★ Science • Compréhension • Maîtrise : c'est la clé de chaque atterrissage réussi. Delta-Sierra • Space Academy

Gimbal et contrôle vectoriel de poussée

Orienter la poussée : gimbal, vérins et contrôle vectoriel. La question à résoudre est la suivante : Comment déplacer une poussée gigantesque sans déplacer toute la fusée comme un gouvernail ? Repères : MESURÉ · CONVENTION · CALCULÉ · HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE · DONNÉE DE MISSION · DONNÉE CONSTRUCTEUR · APPROXIMATION

Objectifs : définir TVC et gimbal relier angle de poussée et couple comprendre le rôle des actionneurs comparer hydraulique et électromécanique identifier les charges supportées par la structure de cardan ? TVC signifie Thrust Vector Control, contrôle vectoriel de poussée. Au lieu de modifier seulement l'intensité de la force, on modifie légèrement sa direction. 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

poussée [INFO](#) · gimbal [INFO](#) · unité [INFO](#) ·
ordre de grandeur [INFO](#) · hypothèse [INFO](#)

1 — TVC : contrôler la direction du vecteur poussée

LE GIMBAL : COMMENT ORIENTER LA POUSSÉE

Un petit mouvement pour le moteur, un grand contrôle pour la fusée.

1 POURQUOI INCLINER LE MOTEUR ?

Sans gimbal
Le moteur est fixe, la poussée est alignée avec l'axe de la fusée.

Avec gimbal
Le moteur est mobile, la poussée est déviée dans la direction du lancement.

→ Incliner le moteur permet d'aligner l'axe de la poussée sur l'axe de la fusée, ce qui permet de contrôler la direction de la fusée.

2 UN COUPLE QUI FAIT PIVOTER LA FUSÉE

Le moteur de poussée dévié ne passe plus par le centre de masse (CM). Cette déviation crée un couple qui fait tourner la fusée.

Couple (C) = Force × Bras de levier
 $C = F \times d$

F = poussée déviée
d = distance perpendiculaire entre la ligne de poussée et le CM

→ Plus l'angle d'inclinaison est grand, plus le couple et la rotation sont forts.

3 ACTIONNEURS ET CONTRÔLE

Des actionneurs hydrauliques ou électro-mécaniques permettent de contrôler précisément la position du bras de levier.

→ Contrôle du bras de levier : actionneurs, vérins, etc.

→ Actionneurs du gimbal : mouvement précis, rapide et répétable.

4 CONTRÔLE : TANGAGE ET LACET

Tangage (Pitch)
Inclinaison avant / arrière. Le moteur s'incline dans le plan vertical.

Lacet (Yaw)
Rotation gauche / droite. Le moteur s'incline dans le plan horizontal.

→ Contrôler ces mouvements permet de contrôler la trajectoire de la fusée.

5 POURQUOI LE GIMBAL EST ESSENTIEL

- Stabilité** : Contrôle des oscillations et maintien de la trajectoire.
- Manœuvres** : Permet de corriger les corrections orbitales et les erreurs de lancement.
- Atterrissage** : Contrôle la trajectoire pour un atterrissage précis.
- Sécurité & charge utile** : Permet de charger plus de charge utile en réduisant les marges de sécurité.

6 EXEMPLE CONCRET : FALCON 9 / STARSHIP

Falcon 9 (Dérivé)

- ✓ Les 9 moteurs Merlin s'inclinent jusqu'à 10°.
- ✓ Contrôle du tangage et du lacet pendant l'ascension et l'atterrissage.

Starship (Nouvelles versions)

- ✓ Les moteurs Raptor s'inclinent jusqu'à 120°.
- ✓ Contrôle du tangage et du lacet pendant l'ascension et l'atterrissage.

→ Résultat : des atterrissages précis et réutilisables.

Delta-Sierra • Space Academy

Gimbal — orienter la poussée

TVC signifie Thrust Vector Control, contrôle vectoriel de poussée. Au lieu de modifier seulement l'intensité de la force, on modifie légèrement sa direction.

Si la ligne de poussée ne passe plus par le centre de masse, elle crée un couple qui fait tourner le véhicule.

Schéma pédagogique 1 : 1 — TVC :
contrôler la direction du vecteur
poussée — Orienter la poussée :
gimbal, vérins et contrôle vectoriel

1 — TVC : contrôler la direction du
vecteur poussée

Delta-Sierra • Space Academy • 3 / 9

2 — Pourquoi quelques degrés suffisent

La force du moteur est énorme et le bras de levier jusqu'au centre de masse peut mesurer plusieurs mètres. Une petite composante latérale peut donc créer un moment important.

Pour un modèle simple, la composante latérale vaut environ $F \cdot \sin(\delta)$, où δ est l'angle de gimbal. Pour les petits angles, $\sin(\delta)$ reste petit mais F peut être gigantesque.

Schéma pédagogique 2 : 2 —
Pourquoi quelques degrés suffisent
— Orienter la poussée : gimbal,
vérins et contrôle vectoriel

2 — Pourquoi quelques degrés suffisent

3 — Exemple pédagogique de couple

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE : $F = 1\,000\text{ kN}$, angle $\delta = 2^\circ$, distance effective $r = 15\text{ m}$. $\sin(2^\circ) \approx 0,0349$.
Force latérale $\approx 1\,000\,000 \times 0,0349 = 34\,900\text{ N}$.

Moment simplifié $\tau \approx r \times F_{\text{lat}} = 15 \times 34\,900 \approx 523\,500\text{ N}\cdot\text{m}$. Ce calcul illustre la sensibilité ; ce n'est pas le modèle de charge d'un lanceur réel.

Schéma pédagogique 3 : 3 —
Exemple pédagogique de couple —
Orienter la poussée : gimbal, vérins
et contrôle vectoriel

3 — Exemple pédagogique de couple

4 — Qui pousse physiquement le moteur ?

Un actionneur convertit une commande en mouvement mécanique. Selon le système, l'énergie peut être hydraulique ou électromécanique. ESA décrit sur Vulcain une chaîne où de petits moteurs pilotent des valves hydrauliques, puis le fluide déplace le moteur beaucoup plus massif.

Le système doit non seulement bouger le moteur mais aussi le maintenir contre les efforts générés par la poussée, les accélérations, les flexions et les frottements du cardan.

Schéma pédagogique 4 : 4 — Qui pousse physiquement le moteur ? —
Orienter la poussée : gimbal, vérins et contrôle vectoriel

4 — Qui pousse physiquement le moteur ?

5 — Deux axes : tangage et lacet

Deux actionneurs disposés selon des directions différentes permettent de produire des rotations autour de deux axes. NASA documente par exemple des architectures SLS avec actionneurs et gimbal block/bearing.

La commande doit coordonner plusieurs moteurs : orienter chacun de la même manière n'est pas toujours la meilleure stratégie si le véhicule possède plusieurs propulseurs.

Schéma pédagogique 5 : 5 — Deux axes : tangage et lacet — Orienter la poussée : gimbal, vérins et contrôle vectoriel

5 — Deux axes : tangage et lacet

6 — Pourquoi ce problème nécessite un modèle 3D

La charge de l'actionneur dépend de la géométrie réelle, de l'angle, de la position du centre de rotation, des frottements et des efforts dynamiques. NASA publie aujourd'hui des méthodes de prédiction de charges TVC en trois dimensions.

La formule simple du cours montre le principe ; la certification exige un modèle mécanique complet et des essais sous charge.

Schéma pédagogique 6 : 6 — Pourquoi ce problème nécessite un modèle 3D — Orienter la poussée : gimbal, vérins et contrôle vectoriel

6 — Pourquoi ce problème nécessite un modèle 3D

7 — Transformer un petit angle en rotation du véhicule

Incliner un moteur ne tourne pas instantanément toute la fusée. La poussée crée un moment autour du centre de masse ; ce moment produit une accélération angulaire ; l'attitude commence à

changer ; les capteurs détectent ce changement ; puis la commande évolue. Il existe donc une chaîne temporelle entre ordre, action mécanique et réponse du véhicule.

C'est précisément pourquoi une représentation par simple flèche est utile pour commencer mais insuffisante pour piloter. La masse, le moment d'inertie, la position du moteur, la souplesse de la structure et la vitesse de l'actionneur modifient tous la réponse. Le contrôle vectoriel est un problème de dynamique, pas un simple problème géométrique.

8 — Pourquoi la saturation de l'actionneur compte autant que la loi de commande

Les actionneurs de gimbal

Faire pivoter le moteur pour diriger la poussée

Les actionneurs de gimbal permettent d'incliner légèrement la tuyère ou le moteur entier autour de deux axes. Cette inclinaison change la direction de la poussée et aide à contrôler l'attitude du lanceur.

Axe de tangage (avant ↔ arrière)
Axe de roulis (gauche ↔ droite)
Axe de lacet (avant ↔ arrière)

Inclinaison gauche, Inclinaison droite, Inclinaison avant, Inclinaison arrière

Exemple : se redresser en vol

Le lanceur se penche vers la droite. Le gimbal incline le moteur vers la gauche. La poussée se décale vers la gauche. Le lanceur se redresse et reprend sa trajectoire.

Pourquoi cela aide ?

- Corrècteur d'attitude : oriente la poussée pour tourner, incliner ou se stabiliser.
- Vol efficace : corrige les perturbations (vent, asymétries) et garde la trajectoire voulue.
- Atterrissage précis : permet des corrections fines pour se poser en douceur à la verticale.

Angle de gimbal

Petit angle suffisant pour dévier la poussée. 0° à 10° typiquement (selon le lanceur).

Effet sur la trajectoire

Une poussée inclinée crée une composante latérale.

Poussée totale (F)

F_y = composante verticale
 F_x = composante latérale

À retenir

- Le gimbal ne change pas la quantité de poussée, seulement sa direction.
- De petits angles peuvent produire de grands effets.
- Indépendante du lancement à l'atterrissage !

Delta-Sierra - Space Academy

Actionneurs de gimbal : transmettre un effort mécanique précis sous forte charge.

Un logiciel peut demander une correction que la mécanique ne peut pas fournir : angle trop grand, vitesse de déplacement trop élevée ou effort supérieur aux capacités de l'actionneur. On parle alors de saturation. Une bonne loi de contrôle doit connaître ces limites et éviter de construire une commande qui suppose un actionneur idéal.

Cette idée permet de comprendre pourquoi mécanique, électronique et logiciel doivent être conçus ensemble. La meilleure équation de guidage

du monde devient inutile si elle exige un mouvement physiquement impossible. À l'inverse, surdimensionner massivement l'actionneur ajoute masse, puissance et complexité. Le compromis doit donc être bouclé au niveau système.

Exercices et corrigés

Composante

$F = 500 \text{ kN}$ et $\sin \delta = 0,02$. Quelle composante latérale simplifiée ?

Corrigé : $500\,000 \times 0,02 = 10\,000 \text{ N}$.

Couple

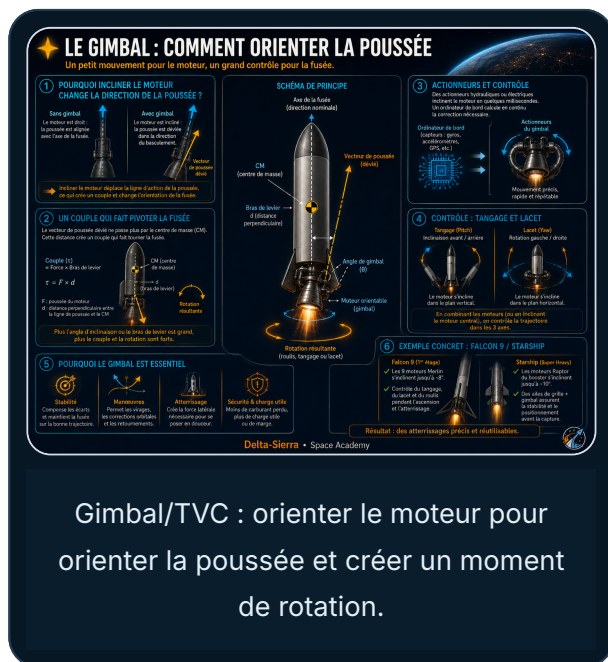
$10\,000 \text{ N}$ appliqués avec un bras de 8 m .

Corrigé : $\tau = 8 \times 10\,000 = 80\,000 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Limite

Pourquoi ce couple ne donne-t-il pas directement l'angle de rotation du lanceur ?

Corrigé : Il faut aussi connaître moment d'inertie, flexibilité, autres forces, durée de commande et dynamique du véhicule.



Gimbal/TVC : orienter le moteur pour orienter la poussée et créer un moment de rotation.

Sources primaires et techniques

- NASA Glenn — Rocket Control
- NASA NTRS — Considerations for TVC in-flight load predictions
- NASA NTRS — SLS core-stage thrust vector control performance
- ESA — Ariane 5 Vulcain engine
- ESA — Low Liquid Thrust Vector Actuation System for Ariane 6