

Pourquoi une paroi de fusée a-t-elle cette épaisseur ?

### Réponse essentielle

Pourquoi une paroi de fusée a-t-elle cette épaisseur ? Une pression interne pousse sur toutes les parois. Dans un cylindre mince, cette pression tend notamment à ouvrir le réservoir selon sa circonférence. Le matériau doit développer une contrainte opposée.

L'objectif est d'identifier la grandeur ou le mécanisme réellement étudié avant d'appliquer une formule. Le cours explicite les unités, les hypothèses, le calcul et les limites afin que le résultat puisse être vérifié et relié à une décision concrète de mission.

Synthèse de départ : le raisonnement complet, les exemples et les sources sont développés ci-dessous.

## Mots clés avant de commencer

propergol INFO ·

poussée INFO · unité INFO ·

hypothèse INFO ·

approximation INFO

Pression, rayon, contrainte admissible, flambement, soudures, température et marges : comprendre le raisonnement sans prétendre dimensionner un lanceur de vol.

## Boussole du cours

**Question directrice :** Comment relier une pression interne à une première estimation d'épaisseur, puis comprendre pourquoi la vraie pièce demande beaucoup plus ?

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

### Objectifs :

- lire la contrainte circonférentielle
- utiliser un modèle de paroi mince
- expliquer chaque symbole et unité
- comprendre marge et contrainte admissible
- identifier les limites : flambement, soudure, dynamique, cryogénie

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

# 1 — Première question : qu'est-ce qui essaie de déchirer le réservoir ?

### Les ergols cryogéniques

Les carburants du spatial à très basse température

Les ergols cryogéniques sont des couples carburant + comburant stockés à très basse température. Ils offrent de hautes performances mais demandent une gestion thermique rigoureuse.

#### LES PRINCIPAUX ERGOLS CRYOGÉNIQUES

| Composant       | Carburant       | Comburant      |
|-----------------|-----------------|----------------|
| Oxygène (LOX)   | Hydrogène (LH2) | Méthane (LCH4) |
| Hydrogène (LH2) | Méthane (LCH4)  | Oxygène (LOX)  |

#### COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS CLÉS (valeurs typiques à 1 bar)

|                                  | OXYGÈNE LIQUIDE (LOX) | HYDROGÈNE LIQUIDE (LH2) | MÉTHANE LIQUIDE (LCH4) |
|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Température d'ébullition         | -183 °C               | -253 °C                 | -162 °C                |
| Densité (kg/m³)                  | +1140                 | +71                     | +423                   |
| Pression de stockage             | +10 à +15 bar         | +10 à +15 bar           | +10 à +15 bar          |
| Stabilité chimique               | Stable                | Très réactif            | Stable                 |
| Impact sur l'environnement       | Non polluant          | Non polluant            | Non polluant           |
| Coût                             | Faible                | Très élevé              | Moyen                  |
| Complexité de stockage           | Faible                | Très élevée             | Moyenne                |
| Compatibilité avec les matériaux | Stable                | Très réactif            | Stable                 |
| Impact sur la santé              | Non toxique           | Très toxique            | Non toxique            |
| Impact sur l'environnement       | Non polluant          | Non polluant            | Non polluant           |

#### POURQUOI LE MÉTHANE + LOX POUR LES MISSIONS VERS MARS ?

CO<sub>2</sub> + 4 H<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub> + 2 H<sub>2</sub>O

La réaction d'oxydation du méthane par l'oxygène libère de l'eau et du dioxyde de carbone. Ces deux produits sont stockés à l'état solide dans le réservoir de la fusée. Le méthane est un carburant à haute performance et le dioxyde de carbone est un produit de combustion non toxique. Le méthane est également un produit de la réaction de Sabatier, qui permet de produire du méthane à partir de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub>.

#### À RETENIR

- Plus froid, plus stable, plus facile à stocker. L'H<sub>2</sub> demande une isolation thermique et une pression de stockage très élevée.
- Le méthane (LCH4) offre les meilleures performances pour les missions vers Mars.
- Le méthane (LCH4) est un carburant à haute performance et le dioxyde de carbone est un produit de combustion non toxique.
- Le méthane (LCH4) est un carburant à haute performance et le dioxyde de carbone est un produit de combustion non toxique.

#### MINI-DICTIONNAIRE

- Cryogénique : art et science des températures très basses, généralement < -150 °C.
- Isolation : empêcher la transmission de la chaleur.
- Stabilité : capacité à résister aux perturbations.
- Compatibilité : capacité à fonctionner avec un autre matériau.
- Impact : effet d'un facteur sur un autre.
- Stabilité : capacité à résister aux perturbations.
- Compatibilité : capacité à fonctionner avec un autre matériau.

Delta-Sierra • Space Academy

## Ergols cryogéniques

Une pression interne pousse sur toutes les parois. Dans un cylindre mince, cette pression tend notamment à ouvrir le réservoir selon sa circonférence. Le matériau doit développer une contrainte opposée.

Plus le rayon est grand, plus la même pression crée un effort global important. Voilà pourquoi un gigantesque réservoir ne peut pas être extrapolé naïvement à partir d'une petite bouteille.

Schéma pédagogique 1 : 1 —  
Première question : qu'est-ce qui essaie de déchirer le réservoir ? —  
Pourquoi une paroi de fusée a-t-elle cette épaisseur ?

1 — Première question : qu'est-ce qui essaie de déchirer le réservoir ?

Delta-Sierra • Space Academy • 3 / 11

---

## 2 — Un premier modèle pédagogique : $t \approx p \cdot r / \sigma_{\text{allow}}$

---

Le symbole  $t$  désigne l'épaisseur.  $p$  est la pression interne relative.  $r$  est le rayon.  $\sigma_{\text{allow}}$  — « sigma admissible » — représente une contrainte que l'on accepte de ne pas dépasser dans notre modèle.

La formule de paroi mince n'est pas une recette de fabrication. Elle sert à comprendre les dépendances : si  $p$  double,  $t$  augmente ; si  $r$  double,  $t$  augmente ; si le matériau admissible est plus résistant, l'épaisseur théorique peut diminuer.

Schéma pédagogique 2 : 2 — Un premier modèle pédagogique :  $t \approx p \cdot r / \sigma_{\text{allow}}$  — Pourquoi une paroi de fusée a-t-elle cette épaisseur ?

2 — Un premier modèle pédagogique :  $t \approx p \cdot r / \sigma_{\text{allow}}$

---

## 3 — Exemple volontairement simple

---

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE :  $p = 0,30$  MPa,  $r = 2,0$  m,  $\sigma_{\text{allow}} = 120$  MPa. Les deux pressions sont exprimées dans la même unité, le mégapascal, donc le rapport est cohérent.

$t \approx (0,30 \times 2,0) \div 120 = 0,005$  m = 5 mm. Cette valeur n'est PAS une épaisseur de vol recommandée. Elle montre seulement la logique du modèle.

Schéma pédagogique 3 : 3 —  
Exemple volontairement simple —  
Pourquoi une paroi de fusée a-t-elle  
cette épaisseur ?

3 — Exemple volontairement simple

## 4 — Pourquoi le vrai réservoir ne s'arrête pas à « 5 mm »

La structure subit accélération longitudinale, flexion, vibrations, charges aérodynamiques, imperfections géométriques, concentrations de contrainte, cycles de pression et écarts de fabrication. Un réservoir très mince peut aussi flamber sous compression avant même que le matériau ne casse en traction.

Les dômes, jonctions, soudures, ouvertures, supports et zones de poussée ont des états de contrainte différents. La vraie fusée devient une structure variable, raidie et vérifiée localement.

Schéma pédagogique 4 : 4 —  
Pourquoi le vrai réservoir ne s'arrête  
pas à « 5 mm » — Pourquoi une  
paroi de fusée a-t-elle cette  
épaisseur ?

4 — Pourquoi le vrai réservoir ne  
s'arrête pas à « 5 mm »

---

## 5 — Pourquoi choisir une contrainte « admissible » inférieure à la rupture

---

Une pièce certifiée n'est pas conçue pour atteindre sa rupture théorique à chaque vol. L'ingénierie applique facteurs de sécurité, marges, effets de température et dispersions de matériau/process.

Une valeur admissible doit être reliée à une norme, un état métallurgique, un type de chargement et une température. Copier une résistance trouvée sur Internet sans ces conditions serait dangereux.

Schéma pédagogique 5 : 5 —  
Pourquoi choisir une contrainte  
« admissible » inférieure à la rupture  
— Pourquoi une paroi de fusée a-t-elle cette épaisseur ?

5 — Pourquoi choisir une contrainte  
« admissible » inférieure à la rupture

---

## 6 — Cryogénie et fabrication changent le matériau réel

---

NASA a étudié des alliages d'aluminium soudables spécifiquement pour les réservoirs cryogéniques. Plus récemment, l'Al-Li 2195 a été étudié pour réduire la masse tout en conservant des propriétés mécaniques élevées.

La NASA précise aussi que les épaisseurs nécessaires dépendent de la configuration exacte. Le matériau « meilleur » sur une fiche n'est pas automatiquement le meilleur si sa mise en forme, sa soudabilité, son inspection ou son coût deviennent prohibitif.

Schéma pédagogique 6 : 6 —  
Cryogénie et fabrication changent le  
matériau réel — Pourquoi une paroi  
de fusée a-t-elle cette épaisseur ?

6 — Cryogénie et fabrication changent  
le matériau réel

## 7 — Le bon réflexe d'ingénieur

Un calcul simple est une boussole. Ensuite viennent  
modèle de charges, éléments finis, essais  
matériaux, coupons soudés, tests de pression,  
dynamique et qualification.

La question n'est donc pas « quelle épaisseur faut-il  
mettre ? », mais « quels modes de défaillance  
devons-nous empêcher, avec quelles marges  
vérifiées ? »

## 8 — Pourquoi l'épaisseur n'est pas un nombre unique sur toute la fusée

Même dans un réservoir cylindrique, les  
solllicitations ne sont pas uniformes. Une jonction,  
une ouverture, une attache, un dôme ou une zone  
proche d'un moteur peuvent concentrer des efforts.  
La pression interne n'est qu'un chargement parmi  
d'autres : accélération, flexion, vibrations,  
température et manipulation au sol participent aussi  
au dimensionnement.

C'est pourquoi notre petite relation de paroi mince  
sert uniquement à comprendre une tendance. Elle  
ne permet pas de dessiner une fusée certifiée. Le  
vrai travail consiste à identifier tous les cas de  
charge, construire des modèles, vérifier les modes  
de ruine possibles, puis confronter ces modèles aux

essais. La bonne question n'est donc pas « quelle épaisseur faut-il ? », mais « quels mécanismes peuvent faire perdre la fonction et quelles marges avons-nous contre chacun ? ».

---

## 9 — Masse gagnée, robustesse perdue : le compromis permanent

---

Réduire une paroi de quelques pourcents peut économiser beaucoup de masse sur une grande surface, mais cette économie n'a de sens que si la pièce reste fabricable, inspectable et suffisamment tolérante aux défauts. À l'inverse, épaissir partout « pour être sûr » alourdit le véhicule, augmente les efforts à accélérer et peut obliger à transporter davantage de propergol.

L'ingénierie spatiale cherche donc rarement un maximum absolu. Elle cherche un compromis vérifié. C'est une leçon générale que nous retrouverons en thermique, en redondance, en énergie et en support-vie : une marge a un coût, et le coût d'une marge peut lui-même créer un nouveau risque.

---

## 8 — Trois exemples complets : voir la sensibilité du modèle

---

### Exemple A — cas volontairement simple

Nous reprenons  $p = 0,30 \text{ MPa}$ ,  $r = 2,0 \text{ m}$  et  $\sigma_{\text{allow}} = 120 \text{ MPa}$ . La relation pédagogique donne  $t \approx (0,30 \times 2,0) \div 120 = 0,005 \text{ m}$ , soit 5 mm. Pourquoi multiplier pression et rayon ? Parce que, dans ce modèle de cylindre mince, un rayon plus grand donne à la pression une plus grande géométrie sur laquelle créer l'effort circonférentiel. Pourquoi diviser par  $\sigma_{\text{allow}}$  ? Parce qu'un matériau capable d'accepter davantage de contrainte peut, toutes choses égales par ailleurs, fournir la même résistance avec moins de section.



🎓 **HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE** : ces valeurs servent à comprendre la dépendance ; elles ne constituent pas un dimensionnement de vol.

## Exemple B — le rayon double

Gardons  $p = 0,30 \text{ MPa}$  et  $\sigma_{\text{allow}} = 120 \text{ MPa}$ , mais prenons  $r = 4,0 \text{ m}$ . Alors  $t \approx (0,30 \times 4,0) \div 120 = 0,010 \text{ m}$ , soit  $10 \text{ mm}$ . Le rayon a doublé et le résultat de ce modèle double lui aussi. Ce cas montre pourquoi agrandir un réservoir n'est pas une simple opération graphique : les efforts changent avec l'échelle.

🧮 **CALCULÉ** :  $10 \text{ mm}$  est le résultat du modèle simplifié, pas une épaisseur certifiée.

## Exemple C — matériau admissible plus élevé

Revenons à  $p = 0,30 \text{ MPa}$  et  $r = 2,0 \text{ m}$ , mais prenons  $\sigma_{\text{allow}} = 200 \text{ MPa}$ .  $t \approx 0,60 \div 200 = 0,003 \text{ m}$ , soit  $3 \text{ mm}$ . La valeur théorique baisse parce que le dénominateur augmente. Mais un matériau plus résistant peut être plus difficile à souder, plus sensible à certains défauts ou moins favorable à basse température : le calcul ne décide donc pas seul du matériau.

⚠️ **APPROXIMATION** : la vraie conception doit considérer flambement, soudures, charges dynamiques, fatigue et procédés.

## Calcul inverse — épaisseur imposée

Supposons maintenant  $p = 0,30 \text{ MPa}$ ,  $r = 2,0 \text{ m}$  et une épaisseur conceptuelle  $t = 6 \text{ mm} = 0,006 \text{ m}$ . Nous voulons la contrainte admissible correspondante dans le même modèle :  $\sigma_{\text{allow}} \approx p \cdot r / t = (0,30 \times 2,0) \div 0,006 = 100 \text{ MPa}$ . "Isoler"  $\sigma_{\text{allow}}$  signifie simplement réorganiser la relation pour que cette inconnue soit seule. Le résultat permet de comparer le besoin conceptuel aux propriétés admissibles réellement justifiées par données et essais.

Le calcul inverse n'autorise toujours pas à fabriquer : il sert à vérifier la cohérence d'une hypothèse.

## Exercices et corrigés

### Sensibilité à la pression

Si  $p$  double dans le même modèle et que tout le reste reste identique, que devient  $t$  ?

Corrigé : Elle double.

### Sensibilité au rayon

Même pression et matériau, mais rayon divisé par deux.

Corrigé : L'épaisseur de ce modèle est divisée par deux.

### Piège

Pourquoi le résultat 5 mm ne peut-il pas devenir un plan de fabrication ?

Corrigé : Parce que le modèle ignore de nombreux modes de charge et de défaillance, les détails géométriques, le procédé, les facteurs réglementaires et la qualification.

---

## Sources primaires et techniques

---

- [NASA NTRS — New weldable high-strength aluminum alloys for cryogenic service](#)
- [NASA NTRS — Aluminum-Lithium 2195 goes for SLS](#)
- [NASA NTRS — Structural analysis, design and development of an S-IC titanium skin panel](#)
- [NASA Glenn — Model Rockets and Real Rockets](#)