

Thermodynamique, fluides & contrôle thermique

Dans le vide, la chaleur ne disparaît pas: elle doit être conduite à travers la structure puis rayonnée vers l'espace. Dans une conduite, un gaz change de densité, de pression et parfois de température lorsqu'il accélère. Un habitat martien, un réservoir **cryogénique**, un moteur-fusée et une électronique de bord posent donc des problèmes différents, mais reliés par les mêmes principes de conservation. Ce module construit ces principes à partir de bilans concrets.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Thermodynamique, fluides & contrôle thermique: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « température », et quel repère issu de « puissance thermique » permet de vérifier la décision?

Intuition. Une cabine habitée produit chaleur et vapeur d'eau tandis qu'un circuit transporte un fluide vers un radiateur. Il faut suivre l'énergie depuis les personnes et les équipements jusqu'à l'espace.

1

Comprendre avant de calculer

Une cabine habitée produit chaleur et vapeur d'eau tandis qu'un circuit transporte un fluide vers un radiateur.

2

température

Définition sans prérequis.

3

puissance thermique

Définition sans prérequis.

Repère concret. Un boîtier électronique à 330 K dans une cabine à 295 K rejette de la chaleur; le contrôle thermique doit offrir un chemin pour évacuer cette puissance.

- Comprendre avant de calculer — Une cabine habitée produit chaleur et vapeur d'eau tandis qu'un circuit transporte un fluide vers un radiateur.
- température — Définition sans prérequis.
- puissance thermique — Définition sans prérequis.

Avant « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique », utilisez modules 01 à 09 recommandés. Dans « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique », une notation indispensable est redéfinie au moment où elle devient utile au raisonnement.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 18

Comprendre avant de calculer

Une cabine habitée produit chaleur et vapeur d'eau tandis qu'un circuit transporte un fluide vers un radiateur. Il faut suivre l'énergie depuis les personnes et les équipements jusqu'à l'espace.

Progression du module — température; puissance thermique; débit massique; radiateur.

température

Définition sans prérequis. La [température](#) indique l'état thermique d'un système et gouverne le sens spontané des échanges de chaleur: la chaleur se transfère naturellement du plus chaud vers le plus froid.

Scène concrète. Un boîtier électronique à 330 K dans une cabine à 295 K rejette de la chaleur; le contrôle thermique doit offrir un chemin pour évacuer cette puissance.

Contrôle mental. [Température](#) et chaleur ne sont pas synonymes: un petit objet très chaud peut contenir moins d'énergie thermique qu'une grande masse tiède. Vérifiez ce que mesure réellement le capteur.

Piège à éviter. Température et chaleur ne sont pas synonymes: la température est un état, la chaleur est un transfert d'énergie.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [température](#) » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique.

Exercice guidé — température

Situation à reconnaître. Un boîtier électronique à 330 K dans une cabine à 295 K rejette de la chaleur; le contrôle thermique doit offrir un chemin pour évacuer cette puissance.

Vérification demandée. Température et chaleur ne sont pas synonymes: un petit objet très chaud peut contenir moins d'énergie thermique qu'une grande masse tiède. Vérifiez ce que mesure réellement le capteur.

Erreur à écarter. Température et chaleur ne sont pas synonymes: la température est un état, la chaleur est un transfert d'énergie.

Corrigé raisonné

Sens précis

La température indique l'état thermique d'un système et gouverne le sens spontané des échanges de chaleur: la chaleur se transfère naturellement du plus chaud vers le plus froid.

Test du cas

Température et chaleur ne sont pas synonymes: un petit objet très chaud peut contenir moins d'énergie thermique qu'une grande masse tiède. Vérifiez ce que mesure réellement le capteur.

Piège exclu

Température et chaleur ne sont pas synonymes: la température est un état, la chaleur est un transfert d'énergie.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « température » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique.

Termes du corrigé. [Vérification](#)

puissance thermique

Définition sans prérequis. La [puissance thermique](#) est un débit d'énergie: elle indique combien de joules de chaleur doivent être transférés chaque seconde. Son unité est le watt, équivalent à un joule par seconde.

Scène concrète. Un équipement dissipant 500 W transforme chaque seconde environ 500 J d'énergie électrique en chaleur à évacuer.

Contrôle mental. La puissance est une énergie par unité de temps: doubler la durée à puissance constante doit doubler l'énergie totale évacuée ou reçue.

Piège à éviter. Ne multipliez pas une puissance par un temps sans garder les unités: $W \times s$ donne des joules, $W \times h$ donne des wattheures.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [puissance thermique](#) » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique.

Exercice guidé — puissance thermique

Situation à reconnaître. Un équipement dissipant 500 W transforme chaque seconde environ 500 J d'énergie électrique en chaleur à évacuer.

Vérification demandée. La puissance est une énergie par unité de temps: doubler la durée à puissance constante doit doubler l'énergie totale évacuée ou reçue.

Erreur à écarter. Ne multipliez pas une puissance par un temps sans garder les unités: $W \times s$ donne des joules, $W \times h$ donne des wattheures.

Corrigé raisonné

Sens précis

La puissance thermique est un débit d'énergie: elle indique combien de joules de chaleur doivent être transférés chaque seconde. Son unité est le watt, équivalent à un joule par seconde.

Test du cas

La puissance est une énergie par unité de temps: doubler la durée à puissance constante doit doubler l'énergie totale évacuée ou reçue.

Piège exclu

Ne multipliez pas une puissance par un temps sans garder les unités: $W \times s$ donne des joules, $W \times h$ donne des wattheures.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « puissance thermique » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique.

débit massique

Définition sans prérequis. Le **débit massique** mesure la masse de fluide qui traverse une section par unité de temps, souvent en kg/s. Il relie circulation du fluide et capacité à transporter de l'énergie.

Scène concrète. Si un circuit déplace 0,2 kg d'eau par seconde et que l'eau gagne quelques degrés, il peut transporter plusieurs kilowatts selon la capacité thermique du fluide.

Contrôle mental. À **débit massique** constant, doubler la durée doit doubler la masse transférée; ce produit simple permet de détecter une confusion entre kg/s et kg.

Piège à éviter. Un débit volumique en L/min n'est pas un débit massique en kg/s tant que la densité n'a pas été prise en compte.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **débit massique** » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique.

Exercice guidé — débit massique

Situation à reconnaître. Si un circuit déplace 0,2 kg d'eau par seconde et que l'eau gagne quelques degrés, il peut transporter plusieurs kilowatts selon la capacité thermique du fluide.

Vérification demandée. À débit massique constant, doubler la durée doit doubler la masse transférée; ce produit simple permet de détecter une confusion entre kg/s et kg.

Erreur à écarter. Un débit volumique en L/min n'est pas un débit massique en kg/s tant que la densité n'a pas été prise en compte.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le débit massique mesure la masse de fluide qui traverse une section par unité de temps, souvent en kg/s. Il relie circulation du fluide et capacité à transporter de l'énergie.

Test du cas

À débit massique constant, doubler la durée doit doubler la masse transférée; ce produit simple permet de détecter une confusion entre kg/s et kg.

Piège exclu

Un débit volumique en L/min n'est pas un débit massique en kg/s tant que la densité n'a pas été prise en compte.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « débit massique » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique.

radiateur

Définition sans prérequis. Un **radiateur** spatial rejette de l'énergie principalement par rayonnement infrarouge vers l'environnement. Dans le vide, il n'existe pas d'air extérieur pour refroidir par convection.

Scène concrète. La surface, la température, l'émissivité et la vue vers l'espace conditionnent la puissance réellement rayonnée.

Contrôle mental. À environnement et température comparables, augmenter la surface radiative doit augmenter la puissance rejetée; une surface plus grande ne peut pas réduire le rejet sans autre changement.

Piège à éviter. Une grande surface ne garantit pas un bon radiateur si elle voit le Soleil, une planète chaude ou une autre partie du véhicule qui lui renvoie du rayonnement.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **radiateur** » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique.

Exercice guidé — radiateur

Situation à reconnaître. La surface, la température, l'émissivité et la vue vers l'espace conditionnent la puissance réellement rayonnée.

Vérification demandée. À environnement et température comparables, augmenter la surface radiative doit augmenter la puissance rejetée; une surface plus grande ne peut pas réduire le rejet sans autre changement.

Erreur à écarter. Une grande surface ne garantit pas un bon radiateur si elle voit le Soleil, une planète chaude ou une autre partie du véhicule qui lui renvoie du rayonnement.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un radiateur spatial rejette de l'énergie principalement par rayonnement infrarouge vers l'environnement. Dans le vide, il n'existe pas d'air extérieur pour refroidir par convection.

Test du cas

À environnement et température comparables, augmenter la surface radiative doit augmenter la puissance rejetée; une surface plus grande ne peut pas réduire le rejet sans autre changement.

Piège exclu

Une grande surface ne garantit pas un bon radiateur si elle voit le Soleil, une planète chaude ou une autre partie du véhicule qui lui renvoie du rayonnement.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « radiateur » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique.

Termes du corrigé. **radiateur spatial**

Quantification

radiateur: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

radiateur: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Étude intégrée — Thermodynamique, fluides & contrôle thermique

Situation à analyser. Une cabine habitée produit chaleur et vapeur d'eau tandis qu'un circuit transporte un fluide vers un radiateur. Il faut suivre l'énergie depuis les personnes et les équipements jusqu'à l'espace.

- **température:** Un boîtier électronique à 330 K dans une cabine à 295 K rejette de la chaleur; le contrôle thermique doit offrir un chemin pour évacuer cette puissance. Contrôle attendu: Température et chaleur ne sont pas synonymes: un petit objet très chaud peut contenir moins d'énergie thermique qu'une grande masse tiède. Vérifiez ce que mesure réellement le capteur.
- **puissance thermique:** Un équipement dissipant 500 W transforme chaque seconde environ 500 J d'énergie électrique en chaleur à évacuer. Contrôle attendu: La puissance est une énergie par unité de temps: doubler la durée à puissance constante doit doubler l'énergie totale évacuée ou reçue.

- **débit massique:** Si un circuit déplace 0,2 kg d'eau par seconde et que l'eau gagne quelques degrés, il peut transporter plusieurs kilowatts selon la capacité thermique du fluide. Contrôle attendu: À débit massique constant, doubler la durée doit doubler la masse transférée; ce produit simple permet de détecter une confusion entre kg/s et kg.
- **radiateur:** La surface, la température, l'émissivité et la vue vers l'espace conditionnent la puissance réellement rayonnée. Contrôle attendu: À environnement et température comparables, augmenter la surface radiative doit augmenter la puissance rejetée; une surface plus grande ne peut pas réduire le rejet sans autre changement.

Le diagnostic ne doit pas confondre « température » et « puissance thermique ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Un boîtier électronique à 330 K dans une cabine à 295 K rejette de la chaleur; le contrôle thermique doit offrir un chemin pour évacuer cette puissance. Le second doit être contrôlé autrement: La puissance est une énergie par unité de temps: doubler la durée à puissance constante doit doubler l'énergie totale évacuée ou reçue.

Une seconde vérification croise « débit massique » et « radiateur ». Gardez comme alerte « Un débit volumique en L/min n'est pas un débit massique en kg/s tant que la densité n'a pas été prise en compte. »; pour « radiateur », utilisez plutôt ce test: À environnement et température comparables, augmenter la surface radiative doit augmenter la puissance rejetée; une surface plus grande ne peut pas réduire le rejet sans autre changement.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique », classez les indices selon « température » (Température et chaleur ne sont pas synonymes: un petit objet très chaud peut contenir moins d'énergie thermique qu'une grande masse tiède. Vérifiez ce que mesure réellement le capteur.), « puissance thermique » (La puissance est une énergie par unité de temps: doubler la durée à puissance constante doit doubler l'énergie totale évacuée ou reçue.), « débit massique » (À débit massique constant, doubler la durée doit doubler la masse transférée; ce produit simple permet de détecter une confusion entre kg/s et kg.), « radiateur » (À environnement et température comparables, augmenter la surface radiative doit augmenter la puissance rejetée; une surface plus grande ne peut pas réduire le rejet sans autre changement.) Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour température, Dans ce module, une erreur sur « température » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique. Le garde-fou principal est: Température et chaleur ne sont pas synonymes: la température est un état, la chaleur est un transfert d'énergie. Pour puissance thermique, Dans ce module, une erreur sur « puissance thermique » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique. Le garde-fou principal est: Ne multipliez pas une puissance par un temps sans garder les unités: $W \times s$ donne des joules, $W \times h$ donne des wattheures. Pour débit massique, Dans ce module, une erreur sur « débit massique » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique. Le garde-fou principal est: Un débit volumique en L/min n'est pas un débit massique en kg/s tant que la densité n'a pas été prise en compte. Pour radiateur, Dans ce module, une erreur sur « radiateur » peut provoquer surchauffe, gel, cavitation, perte de fluide ou sous-dimensionnement du rejet thermique. Le garde-fou principal est: Une grande surface ne garantit pas un bon radiateur si elle voit le Soleil, une planète chaude ou une autre partie du véhicule qui lui renvoie du rayonnement.

Mini-leçons quantitatives canoniques

Ce bloc constitue la référence quantitative du module; les valeurs d'exercice sont pédagogiques et ne doivent pas être confondues avec des données de mission.

Énergie sensible pour changer une température

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $Q = m \times c_p \times \Delta T$ » dans « Énergie sensible pour changer une température » ?

2 — Intuition sans symboles

Chauffer une masse demande une énergie proportionnelle à la masse, à la capacité thermique et au changement de température.

3 — Grandeurs

Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température

4 — Formule

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

5 — Lecture

Lire « $Q = m \times c_p \times \Delta T$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Q en J; m en kg; c_p en J/(kg·K); ΔT en K

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent décrire le même scénario et leurs unités doivent être compatibles.

12 — Contrôle d'unités

Q en J; m en kg; c_p en J/(kg·K); ΔT en K Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Pour $m=10$ kg, $c_p=900$ J/(kg·K) et $\Delta T=20$ K, $Q=180\,000$ J = 180 kJ.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

15 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver l'autre facteur.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément l'ordre de grandeur de chaque facteur permet de prévoir celui du produit.

17 — Interprétation

La relation suppose une capacité thermique représentative sur la plage de température.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

À facteurs indépendants, une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $m=5$ kg, $c_p=1000$ J/(kg·K), $\Delta T=15$ K.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$m=5$ kg, $c_p=1000$ J/(kg·K), $\Delta T=15$ K. $Q=75\,000$ J = 75 kJ.

Exercice autonome. $m=20$ kg, $c_p=500$ J/(kg·K), $\Delta T=8$ K.

Correction autonome — ouvrir après essai

$m=20$ kg, $c_p=500$ J/(kg·K), $\Delta T=8$ K. $Q=80\,000$ J = 80 kJ.

21 — Décision mission

Dimensionner la source ou le puits thermique sur l'énergie totale et la puissance disponible.

Premier principe sur un système fermé

$$\Delta U = Q_{\text{in}} - W_{\text{out}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\Delta U = Q_{\text{in}} - W_{\text{out}}$ » dans « Premier principe sur un système fermé » ?

2 — Intuition sans symboles

L'énergie interne change selon ce qui entre sous forme de chaleur et ce qui sort sous forme de travail.

3 — Grandeurs

ΔU : variation d'énergie interne; Q_{in} : chaleur nette reçue; W_{out} : travail net fourni par le système

4 — Formule

$$\Delta U = Q_{\text{in}} - W_{\text{out}}$$

5 — Lecture

Lire « $\Delta U = Q_{\text{in}} - W_{\text{out}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

ΔU : variation d'énergie interne; Q_{in} : chaleur nette reçue; W_{out} : travail net fourni par le système

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

tous les termes en J

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La soustraction isole la marge ou la variation entre deux grandeurs exprimées sur la même base.

11 — Hypothèses

Les deux termes doivent utiliser le même repère, la même unité et la même frontière de système.

12 — Contrôle d'unités

tous les termes en J Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $Q_{\text{in}}=500$ kJ et $W_{\text{out}}=120$ kJ, $\Delta U=380$ kJ.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La soustraction isole la marge ou la variation entre deux grandeurs exprimées sur la même base.

15 — Contrôle indépendant

Ajouter la différence au terme retiré doit restituer le terme initial.

16 — Estimation mentale

Comparer les deux termes suffit à prévoir le signe et l'ordre de grandeur de la différence.

17 — Interprétation

Le signe dépend de la convention choisie pour chaleur et travail; elle doit rester constante.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Une hausse du premier terme augmente le résultat; une hausse du second le diminue à pente unitaire.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $Q_{\text{in}}=300$ kJ, $W_{\text{out}}=80$ kJ.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$Q_{\text{in}}=300$ kJ, $W_{\text{out}}=80$ kJ. $\Delta U=220$ kJ.

Exercice autonome. $Q_{\text{in}}=100$ kJ, $W_{\text{out}}=160$ kJ.

Correction autonome — ouvrir après essai

$$Q_{\text{in}}=100 \text{ kJ}, W_{\text{out}}=160 \text{ kJ}, \Delta U=-60 \text{ kJ}.$$

21 — Décision mission

Fermer le bilan avant de conclure sur température ou état thermodynamique.

Pression d'un gaz parfait

$$p = n \times R_{\text{gas}} \times T / V$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $p = n \times R_{\text{gas}} \times T / V$ » dans « Pression d'un gaz parfait » ?

2 — Intuition sans symboles

Pour un gaz suffisamment dilué, pression, quantité, température et volume sont liés par une relation simple.

3 — Grandeurs

p : pression; n : quantité de matière; R_{gas} : constante des gaz; T : température absolue; V : volume

4 — Formule

$$p = n \times R_{\text{gas}} \times T / V$$

5 — Lecture

Lire « $p = n \times R_{\text{gas}} \times T / V$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

p : pression; n : quantité de matière; R_{gas} : constante des gaz; T : température absolue; V : volume

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

p en Pa; n en mol; R_{gas} en J/(mol·K); T en K; V en m³

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La relation met en équation le mécanisme quantitatif décrit par la mini-leçon et permet de vérifier le raisonnement par substitution numérique.

11 — Hypothèses

Les entrées doivent provenir du même scénario, avec unités, signes et conventions explicitement alignés.

12 — Contrôle d'unités

p en Pa; n en mol; R_{gas} en J/(mol·K); T en K; V en m³ Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $n=100$ mol, $R_{\text{gas}}=8,314$ J/(mol·K), $T=300$ K et $V=2$ m³, $p \approx 124\,710$ Pa.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La relation met en équation le mécanisme quantitatif décrit par la mini-leçon et permet de vérifier le raisonnement par substitution numérique.

15 — Contrôle indépendant

Recalculer par la relation inverse ou par une seconde méthode doit retrouver le même ordre de grandeur.

16 — Estimation mentale

Un ordre de grandeur estimé avant la calculatrice permet de détecter les erreurs de facteur, de signe ou d'unité.

17 — Interprétation

Le modèle devient moins précis aux hautes pressions ou près d'un changement de phase.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Faire varier une entrée à la fois permet d'identifier la variable qui pilote le plus la décision.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $n=50$ mol, $T=290$ K, $V=1$ m³.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$n=50$ mol, $T=290$ K, $V=1$ m³. $p=50 \times 8,314 \times 290 \approx 120\,553$ Pa.

Exercice autonome. $n=200$ mol, $T=250$ K, $V=4$ m³.

Correction autonome — ouvrir après essai

$n=200$ mol, $T=250$ K, $V=4$ m³. $p \approx 103\,925$ Pa.

21 — Décision mission

Utiliser une équation d'état qualifiée si le domaine sort du régime gaz parfait.

Débit massique dans une section

$$m_{\dot{}} = \rho \times A \times v$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_{\dot{}} = \rho \times A \times v$ » dans « Débit massique dans une section » ?

2 — Intuition sans symboles

Le débit de masse est le volume traversant la section chaque seconde multiplié par la densité du fluide.

3 — Grandeurs

$m_{\dot{}}$: débit massique; ρ : masse volumique; A : aire de passage; v : vitesse moyenne

4 — Formule

$$m_{\dot{}} = \rho \times A \times v$$

5 — Lecture

Lire « $m_{\dot{}} = \rho \times A \times v$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

$m_{\dot{}}$: débit massique; ρ : masse volumique; A : aire de passage; v : vitesse moyenne

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

$m_{\dot{}}$ en kg/s; ρ en kg/m³; A en m²; v en m/s

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent décrire le même scénario et leurs unités doivent être compatibles.

12 — Contrôle d'unités

$m_{\dot{}}$ en kg/s; ρ en kg/m³; A en m²; v en m/s Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $\rho=995$ kg/m³, $A=1,13 \times 10^{-4}$ m² et $v=0,80$ m/s, $m_{\dot{}} \approx 0,0900$ kg/s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

15 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver l'autre facteur.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément l'ordre de grandeur de chaque facteur permet de prévoir celui du produit.

17 — Interprétation

La formule utilise des valeurs moyennes sur la section et suppose une définition cohérente de densité et vitesse.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

À facteurs indépendants, une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$, $A=0,002 \text{ m}^2$, $v=1,5 \text{ m/s}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$, $A=0,002 \text{ m}^2$, $v=1,5 \text{ m/s}$. $\dot{m}=3,0 \text{ kg/s}$.

Exercice autonome. $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$, $A=0,5 \text{ m}^2$, $v=10 \text{ m/s}$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$, $A=0,5 \text{ m}^2$, $v=10 \text{ m/s}$. $\dot{m}=6,0 \text{ kg/s}$.

21 — Décision mission

Vérifier la compressibilité et le profil d'écoulement avant de l'utiliser pour un dimensionnement fin.

Nombre de Mach

$\text{Mach} = v / a_{\text{sound}}$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Mach} = v / a_{\text{sound}}$ » dans « Nombre de Mach » ?

2 — Intuition sans symboles

Le nombre de Mach compare la vitesse de l'écoulement à la vitesse de propagation acoustique locale.

3 — Grandeurs

Mach: nombre de Mach; v : vitesse de l'écoulement; a_{sound} : vitesse locale du son

4 — Formule

$\text{Mach} = v / a_{\text{sound}}$

5 — Lecture

Lire « $\text{Mach} = v / a_{\text{sound}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

Mach: nombre de Mach; v : vitesse de l'écoulement; a_{sound} : vitesse locale du son

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Mach sans dimension; v et a_{sound} dans la même unité de vitesse

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La division compare une quantité à une référence homogène et produit un indicateur de proportion.

11 — Hypothèses

Les deux quantités doivent appartenir au même périmètre et à la même période.

12 — Contrôle d'unités

Mach sans dimension; v et a_{sound} dans la même unité de vitesse Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $v=680$ m/s et $a_{\text{sound}}=340$ m/s, $\text{Mach}=2,0$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La division compare une quantité à une référence homogène et produit un indicateur de proportion.

15 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit restituer le numérateur.

16 — Estimation mentale

Avant calcul, comparer mentalement le numérateur au dénominateur pour savoir si le résultat doit être inférieur, proche ou supérieur à un.

17 — Interprétation

La vitesse du son dépend de la composition et de la température du gaz; elle n'est pas une constante universelle.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Le résultat augmente si le numérateur augmente et diminue si le dénominateur augmente, toutes choses égales par ailleurs.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $v=255$ m/s, $a_{\text{sound}}=340$ m/s.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$v=255$ m/s, $a_{\text{sound}}=340$ m/s. $\text{Mach}=0,75$.

Exercice autonome. $v=1020$ m/s, $a_{\text{sound}}=340$ m/s.

Correction autonome — ouvrir après essai

$v=1020$ m/s, $a_{\text{sound}}=340$ m/s. $\text{Mach}=3,0$.

21 — Décision mission

Employer les propriétés locales du fluide avant de qualifier un régime subsonique, transsonique ou supersonique.

Conduction thermique stationnaire

$$Q_{\text{dot_cond}} = k \times A \times \Delta T / L$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $Q_{\text{dot_cond}} = k \times A \times \Delta T / L$ » dans « Conduction thermique stationnaire » ?

2 — Intuition sans symboles

La conduction augmente avec la conductivité, la surface et l'écart de température, mais diminue quand le chemin s'allonge.

3 — Grandeurs

$Q_{\text{dot_cond}}$: puissance conduite; k : conductivité; A : aire conductrice; ΔT : différence de température; L : épaisseur

4 — Formule

$$Q_{\text{dot_cond}} = k \times A \times \Delta T / L$$

5 — Lecture

Lire « $Q_{\text{dot_cond}} = k \times A \times \Delta T / L$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

$Q_{\text{dot_cond}}$: puissance conduite; k : conductivité; A : aire conductrice; ΔT : différence de température; L : épaisseur

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

$Q_{\text{dot_cond}}$ en W; k en $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; A en m^2 ; ΔT en K; L en m

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La relation met en équation le mécanisme quantitatif décrit par la mini-leçon et permet de vérifier le raisonnement par substitution numérique.

11 — Hypothèses

Les entrées doivent provenir du même scénario, avec unités, signes et conventions explicitement alignés.

12 — Contrôle d'unités

$Q_{\text{dot_cond}}$ en W; k en $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; A en m^2 ; ΔT en K; L en m Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $k=0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $A=10 \text{ m}^2$, $\Delta T=40 \text{ K}$ et $L=0,20 \text{ m}$, $Q_{\text{dot_cond}}=80 \text{ W}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La relation met en équation le mécanisme quantitatif décrit par la mini-leçon et permet de vérifier le raisonnement par substitution numérique.

15 — Contrôle indépendant

Recalculer par la relation inverse ou par une seconde méthode doit retrouver le même ordre de grandeur.

16 — Estimation mentale

Un ordre de grandeur estimé avant la calculatrice permet de détecter les erreurs de facteur, de signe ou d'unité.

17 — Interprétation

Le modèle suppose un gradient approximativement unidimensionnel et un régime stationnaire.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Faire varier une entrée à la fois permet d'identifier la variable qui pilote le plus la décision.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $k=0,1$, $A=2$, $\Delta T=30$, $L=0,05$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$k=0,1$, $A=2$, $\Delta T=30$, $L=0,05$. $Q_{\text{dot_cond}}=120 \text{ W}$.

Exercice autonome. $k=0,02$, $A=5$, $\Delta T=50$, $L=0,10$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$k=0,02$, $A=5$, $\Delta T=50$, $L=0,10$. $Q_{\text{dot_cond}}=50 \text{ W}$.

21 — Décision mission

Ajouter ponts thermiques et géométrie réelle avant de figer l'isolation.

Rayonnement net entre deux températures

$$Q_{\text{dot_rad}} = \epsilon \times \sigma \times A \times (T_{\text{hot}}^4 - T_{\text{cold}}^4)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $Q_{\text{dot_rad}} = \epsilon \times \sigma \times A \times (T_{\text{hot}}^4 - T_{\text{cold}}^4)$ » dans « Rayonnement net entre deux températures » ?

2 — Intuition sans symboles

Le rayonnement dépend très fortement de la température absolue parce que la puissance varie comme la quatrième puissance.

3 — Grandeurs

$Q_{\text{dot_rad}}$: puissance radiative nette; ϵ : émissivité effective; σ : constante de Stefan-Boltzmann; A : aire; T_{hot} : température chaude; T_{cold} : température froide

4 — Formule

$Q_{\text{dot_rad}} = \epsilon \times \sigma \times A \times (T_{\text{hot}}^4 - T_{\text{cold}}^4)$

5 — Lecture

Lire « $Q_{\text{dot_rad}} = \epsilon \times \sigma \times A \times (T_{\text{hot}}^4 - T_{\text{cold}}^4)$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

$Q_{\text{dot_rad}}$: puissance radiative nette; ϵ : émissivité effective; σ : constante de Stefan-Boltzmann; A : aire; T_{hot} : température chaude; T_{cold} : température froide

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

$Q_{\text{dot_rad}}$ en W; ϵ sans dimension; σ en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A en m^2 ; températures en K

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La relation de puissance traduit une dépendance non linéaire: une petite variation de la variable élevée à une puissance peut fortement déplacer le résultat.

11 — Hypothèses

Les paramètres et températures doivent être exprimés dans les unités absolues exigées par le modèle.

12 — Contrôle d'unités

$Q_{\text{dot_rad}}$ en W; ϵ sans dimension; σ en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A en m^2 ; températures en K Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $\epsilon=0,9$, $A=2 \text{ m}^2$, $T_{\text{hot}}=300 \text{ K}$, $T_{\text{cold}}=200 \text{ K}$ et $\sigma=5,670\text{e-}8$, $Q_{\text{dot_rad}} \approx 663,4 \text{ W}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La relation de puissance traduit une dépendance non linéaire: une petite variation de la variable élevée à une puissance peut fortement déplacer le résultat.

15 — Contrôle indépendant

Recalculer chaque terme de puissance séparément puis refaire la différence fournit un contrôle indépendant.

16 — Estimation mentale

Comparer les puissances avant les coefficients permet de repérer immédiatement un ordre de grandeur impossible.

17 — Interprétation

La géométrie réelle exige aussi des facteurs de vue et parfois plusieurs surfaces radiant.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

La sensibilité est dominée par la variable élevée à la puissance la plus forte.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $\epsilon=0,8$, $A=1 \text{ m}^2$, $T_{\text{hot}}=320 \text{ K}$, $T_{\text{cold}}=250 \text{ K}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$\epsilon=0,8$, $A=1 \text{ m}^2$, $T_{\text{hot}}=320 \text{ K}$, $T_{\text{cold}}=250 \text{ K}$. $Q_{\text{dot_rad}} \approx 298,4 \text{ W}$.

Exercice autonome. $\epsilon=0,9$, $A=3 \text{ m}^2$, $T_{\text{hot}}=280 \text{ K}$, $T_{\text{cold}}=220 \text{ K}$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\epsilon=0,9$, $A=3 \text{ m}^2$, $T_{\text{hot}}=280 \text{ K}$, $T_{\text{cold}}=220 \text{ K}$. $\dot{Q}_{\text{rad}} \approx 582,4 \text{ W}$.

21 — Décision mission

Dimensionner un radiateur avec les températures absolues, propriétés optiques et vues réellement qualifiées.

Progression de maîtrise

1. température: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. puissance thermique: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. débit massique: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. radiateur: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique »: confrontez « température » à « puissance thermique »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 18 — température, puissance thermique, débit massique, radiateur. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Expliquer comment « Comprendre avant de calculer » se manifeste dans thermodynamique, fluides & contrôle thermique.
- Refaire un calcul ou une estimation utile pour « température » et contrôler ses unités.
- Identifier une hypothèse fragile ou un mode dégradé associé à « puissance thermique ».
- Transformer le résultat en décision vérifiable pour « débit massique ».

1. Température, chaleur et énergie interne

La température décrit l'état thermique d'un système; la chaleur désigne un transfert d'énergie provoqué par une différence de température. Mélanger ces deux notions conduit à de faux raisonnements. Un objet peut stocker beaucoup d'énergie sans être à une température extrême s'il possède une grande capacité thermique. Pour un composant spatial, on suit donc l'énergie qui entre, celle qui sort et celle qui s'accumule.

Réflexe d'ingénierie. Pour « température, chaleur et énergie interne », noter d'abord les entrées, les sorties, les unités et la plage de validité. Puis construire un cas nominal et un cas dégradé — « module 18 · Réflexe d'ingénierie ».

2. Premier principe: fermer le bilan énergétique

Sur une durée donnée, variation d'énergie stockée = apports – pertes + travail reçu. Ce bilan s'applique à une batterie, un habitat ou un fluide. Le terme important n'est pas la formule mais la frontière du système: ce que l'on inclut ou exclut. Une frontière mal définie produit des doubles comptes, par exemple lorsque la [puissance électrique](#) dissipée en chaleur est comptée deux fois.

Réflexe d'ingénierie. Pour « premier principe: fermer le bilan énergétique », noter d'abord les entrées, les sorties, les unités et la plage de validité. Puis construire un cas nominal et un cas dégradé — « module 18 · Réflexe d'ingénierie ».

Approfondissement — Entropie et irréversibilité: pourquoi aucune machine thermique n'atteint 100 %

La première loi de la thermodynamique conserve l'énergie; la seconde indique que toutes les conversions ne sont pas réversibles. On introduit l'entropie S , où S est une grandeur d'état mesurant notamment la [dispersion](#) de l'énergie et

l'irréversibilité des transformations. Dans un système isolé réel, l'entropie totale ne diminue pas. Cela explique pourquoi une pompe, un compresseur, un échangeur ou une turbine transforme toujours une partie de l'énergie disponible en chaleur difficilement récupérable.

Pour une base martienne, cette idée empêche les bilans énergétiques irréalistes. Un compresseur qui élève la pression du [dioxyde de carbone](#) consomme de l'électricité; le gaz se réchauffe; il faut ensuite rejeter cette chaleur. Une pile ou un électrolyseur possède un rendement η , lettre grecque êta, défini comme l'énergie utile divisée par l'énergie reçue. Si $\eta = 0,78$, alors 78 % de l'énergie d'entrée devient l'effet utile défini par le calcul et 22 % apparaît sous d'autres formes, souvent de la chaleur. Le système thermique doit être dimensionné sur ces pertes réelles, pas sur la puissance nominale de la seule machine principale.

3. Gaz parfaits et équation d'état

Pour de nombreux calculs préliminaires, la relation $pV=nRT$ ou $p=\rho RT$ relie pression, volume, quantité de matière, densité et température. Elle permet d'estimer la masse de gaz dans un habitat ou la variation de pression après une fuite. Elle reste une approximation: à haute pression, très basse température ou près d'un changement de [phase](#), il faut vérifier sa validité.

Réflexe d'ingénierie. Pour « gaz parfaits et équation d'état », noter d'abord les entrées, les sorties, les unités et la plage de validité. Puis construire un cas nominal et un cas dégradé — « Approfondissement — Entropie et irréversibilité: ». Ce double calcul empêche de confondre une relation mathématique correcte avec une architecture réellement exploitable sur Mars — « Approfondissement — Entropie et irréversibilité: ».

4. Continuité et débit massique

La conservation de masse conduit à $\dot{m}=\rho VA$ dans une section de conduite: [débit massique](#) $\dot{m}$ en kilogrammes par seconde, densité ρ en kilogrammes par mètre cube, [vitesse](#) V en mètres par seconde et aire A en mètres carrés. Le point essentiel est que densité et vitesse peuvent changer. Pour un gaz compressible, augmenter la vitesse ne permet pas toujours d'augmenter indéfiniment le débit.

Réflexe d'ingénierie. Pour « continuité et débit massique », noter d'abord les entrées, les sorties, les unités et la plage de validité. Puis construire un cas nominal et un cas dégradé — « Approfondissement — Entropie et irréversibilité: ». Ce double calcul empêche de confondre une relation mathématique correcte avec une architecture réellement exploitable sur Mars — « Approfondissement — Entropie et irréversibilité: ».

Approfondissement — Réseaux de fluides: pression disponible, pertes de charge et marge de pompe

Un fluide ne traverse pas spontanément dix mètres de tuyauterie, trois filtres et quatre vannes au débit souhaité. Il faut un gradient de pression. La perte de charge Δp , où Δ signifie « variation » et p la pression, représente la différence de pression consommée par les frottements, changements de section, vannes, filtres et équipements. Une pompe ou un compresseur doit fournir au minimum cette différence, plus la pression nécessaire au procédé et une marge. Si le filtre se colmate avec le temps, Δp augmente et le point de fonctionnement se déplace.

Exemple: une pompe peut fournir 220 kPa de hausse de pression au débit prévu. Le réseau propre consomme 140 kPa, le procédé 50 kPa. Il reste $220 - 140 - 50 = 30$ kPa de marge. Si un filtre ajoute progressivement 25 kPa, la marge tombe à 5 kPa et une petite variation de viscosité peut suffire à faire chuter le débit. Sur Mars, un réseau d'eau, d'oxygène, de méthane ou de fluide caloporteur doit donc être instrumenté en pression différentielle. La [maintenance](#) prédictive peut suivre l'évolution de Δp et remplacer un filtre avant que le débit critique ne disparaisse.

5. Nombre de Mach et étranglement

Le [nombre de Mach](#) est le rapport entre vitesse de l'écoulement et vitesse locale du son. Quand un écoulement compressible atteint Mach 1 dans une section minimale, le débit peut devenir [étranglé](#): pour des conditions amont données, l'augmenter exige de changer pression, température ou aire, pas seulement de demander davantage de vitesse. Cette idée est centrale dans les tuyères et les systèmes de gaz sous pression.

Réflexe d'ingénierie. Pour « nombre de mach et étranglement », noter d'abord les entrées, les sorties, les unités et la plage de validité. Puis construire un cas nominal et un cas dégradé — « Approfondissement — Réseaux de fluides: ».

double calcul empêche de confondre une relation mathématique correcte avec une architecture réellement exploitable sur Mars — « Approfondissement — Réseaux de fluides: ».

6. Conduction, convection et rayonnement

La conduction transmet de l'énergie à travers un matériau; la convection l'échange entre une surface et un fluide; le rayonnement transporte de l'énergie électromagnétique et fonctionne dans le vide. Sur un véhicule spatial, le rayonnement est le mécanisme final d'évacuation vers l'espace. Sur Mars, la faible atmosphère peut ajouter des échanges convectifs, mais ils restent très différents de ceux rencontrés sur Terre.

Réflexe d'ingénierie. Pour « conduction, convection et rayonnement », noter d'abord les entrées, les sorties, les unités et la plage de validité. Puis construire un cas nominal et un cas dégradé — « Approfondissement — Réseaux de fluides: ». Ce double calcul empêche de confondre une relation mathématique correcte avec une architecture réellement exploitable sur Mars — « Approfondissement — Réseaux de fluides: ».

7. Radiateurs, isolants et boucles thermiques

Un **radiateur** est une surface conçue pour rejeter de la chaleur. Les isolants multicouches réduisent certains échanges radiatifs; caloducs et boucles fluides transportent l'énergie vers une zone de rejet. Concevoir le thermique revient à gérer les extrêmes chauds et froids: une solution parfaite au Soleil peut devenir mauvaise pendant une longue **période** froide ou quand un équipement voisin tombe en panne.

Réflexe d'ingénierie. Pour « radiateurs, isolants et boucles thermiques », noter d'abord les entrées, les sorties, les unités et la plage de validité. Puis construire un cas nominal et un cas dégradé — « Approfondissement — Réseaux de fluides: ». Ce double calcul empêche de confondre une relation mathématique correcte avec une architecture réellement exploitable sur Mars — « Approfondissement — Réseaux de fluides: ».

8. Transitoires et inertie thermique

Une température d'équilibre ne raconte pas ce qui se passe pendant les premières minutes d'une panne. L'inertie thermique dépend de la masse et de la capacité thermique. Un système volumineux peut laisser du temps à l'équipage avant de franchir une limite, tandis qu'un petit composant électronique peut surchauffer très vite. Il faut donc calculer à la fois états stationnaires et transitoires.

Réflexe d'ingénierie. Pour « transitoires et inertie thermique », noter d'abord les entrées, les sorties, les unités et la plage de validité. Puis construire un cas nominal et un cas dégradé — « Approfondissement — Réseaux de fluides: ». Ce double calcul empêche de confondre une relation mathématique correcte avec une architecture réellement exploitable sur Mars — « Approfondissement — Réseaux de fluides: ».

Approfondissement — Transitoires: démarrage, arrêt et panne sont parfois plus dangereux que le régime établi

Les manuels décrivent souvent un système une fois stabilisé, mais beaucoup de pannes surviennent pendant les transitions. Au démarrage d'une boucle thermique, les **masses** métalliques sont froides, les vannes changent de position, le débit n'est pas encore uniforme et les capteurs peuvent répondre à des vitesses différentes. La constante de temps τ , lettre grecque tau, donne un **ordre de grandeur** du temps nécessaire à une variable pour approcher son nouvel équilibre. Si une température a $\tau = 12$ min, la commander comme si elle répondait en trente secondes crée des oscillations ou des surchauffes locales.

Il faut donc simuler les séquences de démarrage, d'arrêt normal, de perte de puissance et de redémarrage à froid. Une installation martienne peut rester des heures sans énergie après un black-start; l'eau peut geler, les joints se contracter et les réservoirs changer de pression. Le scénario de reprise doit définir un ordre: réchauffer, pressuriser, établir le débit minimal, vérifier les capteurs, puis augmenter la charge. L'ingénierie d'un système habité ne se limite jamais au **rendement** maximal du régime nominal: elle doit démontrer comment le système entre et sort de ce régime sans se détruire.

Exemple calculé pas à pas

La méthode de travail est toujours la même: écrire ce que représente chaque symbole, convertir toutes les unités vers un système cohérent, effectuer l'opération, puis traduire le résultat en phrase — « Approfondissement — Transitoires: démarrage, arrêt ». Enfin, faire un contrôle d'ordre de grandeur. Pour « Approfondissement — Transitoires: démarrage, arrêt », si le résultat change de facteur mille lorsqu'on passe de millimètres à mètres, la conversion doit être visible dans le calcul.

Exercice progressif

1. Choisissez un cas élémentaire de « température », puis dressez les données utiles à « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique », leur origine et leurs unités avant de calculer.
2. Calculer le résultat nominal sans marge.
3. Modifier le paramètre le plus incertain de $\pm 20\%$ et comparer — « Approfondissement — Transitoires: démarrage, arrêt ».
4. Ajouter une panne crédible et expliquer quel indicateur permet de la détecter — « Approfondissement — Transitoires: démarrage, arrêt ».
5. Décider si le système continue, se dégrade ou doit s'arrêter — « Approfondissement — Transitoires: démarrage, arrêt ».

Solution raisonnée

Pour « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique », le résultat final doit être accompagné de son unité, de l'hypothèse qui le domine et de ce qu'il change pour « température ». Elle montre les conversions, la logique de la formule, la sensibilité et la décision — module 18 · Solution raisonnée. Si deux hypothèses différentes conduisent à la même décision opérationnelle, la conception est relativement robuste à cette [incertitude](#). Dans le corrigé de « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique », une variation capable d'inverser la conclusion sur « température » devient une priorité de mesure ou de marge.

Mini-projet de validation

Construisez un dossier de validation consacré à « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique »: il doit rendre vérifiable au moins un choix concernant « température » et expliciter le cas qui ferait rejeter ce choix. Votre note de validation sur « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique » doit rendre auditable les données de départ, la vérification de Comprendre avant de calculer, le traitement de température et le critère d'acceptation de puissance thermique. Le mini-projet sur « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique » est recevable si un autre équipier peut reproduire la vérification de « température » et retrouver la même décision à partir des mêmes données.

Erreurs classiques à détecter

- Attribuer une cause à « température » sans vérifier un indice indépendant du même phénomène.
- Utiliser une valeur de « température » sans indiquer son unité, son origine ou sa plage de validité.
- Conclure sur « puissance thermique » à partir du cas nominal alors qu'un état dégradé change la décision.
- Dans « Thermodynamique, fluides & contrôle thermique », ne laissez jamais une précision numérique masquer l'hypothèse qui commande réellement le résultat.

Sources primaires et passerelles

- NASA — Small Spacecraft Thermal Control
- NASA — Spacecraft Components

Repères lexicaux du module. état dégradé

- www1.grc.nasa.gov — documentation institutionnelle
- www.nasa.gov — documentation institutionnelle
- [Space Academy](#) — parcours complet

Matrice de parité FR ↔ EN

FR	EN
Énergie sensible pour changer une température	Sensible heat for a temperature change
Premier principe sur un système fermé	First law for a closed system
Pression d'un gaz parfait	Ideal-gas pressure
Débit massique dans une section	Mass flow through a section
Nombre de Mach	Mach number
Conduction thermique stationnaire	Steady thermal conduction
Rayonnement net entre deux températures	Net radiative heat transfer between two temperatures