

Atmosphère martienne, météo, poussière et opérations

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Atmosphère martienne, météo, poussière et opérations: comment « Construire une station météo de colonie » agit-il sur « Mini-projet de validation », et quel repère issu de « Pression, densité et température » permet de vérifier la décision?

Intuition. Une station utile mesure pression, température, vent, rayonnement, opacité de poussière et éventuellement humidité locale. La valeur n'est pas seulement scientifique.

1

Construire une station météo de colonie

Une station utile mesure pression, température, vent, rayonnement, opacité de poussière et éventuellement humidité locale.

2

Mini-projet de validation

Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise après tempête.

3

Pression, densité et température

Objectif du module — comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

Repère concret. Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et quelles charges seront délestées en premier.

- Construire une station météo de colonie — Une station utile mesure pression, température, vent, rayonnement, opacité de poussière et éventuellement humidité locale.
- Mini-projet de validation — Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise...
- Pression, densité et température — Objectif du module — comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

CARTE DE MAÎTRISE · MODULE 25

Quatre repères à maîtriser — Atmosphère martienne, météo, poussière et opérations

Comprendre le problème avant les équations

Définition

Question de départ — Atmosphère martienne, météo, poussière et opérations: comment « Construire une station météo de colonie » agit-il sur « Mini-projet de validation », et quel repère issu de « Pression, densité et température » permet de vérifier la décision?

Intuition ou cas concret

Intuition.

Repère quantitatif

Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise après tempête.
Limite ou critère de vigilance
Repère concret.

Exercice guidé — Comprendre le problème avant les équations

Cas « Comprendre le problème avant les équations » — Intuition. Repère: Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de... Réserve: Repère concret.

Corrigé raisonné — Comprendre le problème avant les équations

Point de départ

Avant toute équation météo, il faut identifier la décision visée: sortie EVA, route rover, production solaire, fermeture d'un sas ou mise en sécurité d'un équipement.

Indice du cas

Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise après tempête.

Réserve à appliquer

Une mesure locale ne représente pas nécessairement la situation à distance; relief, heure locale, poussière et défaut de capteur imposent redondance géographique et marge.

Conclusion

La station météo n'est utile que si chaque variable mesurée débouche sur un seuil d'action, une incertitude connue et une règle de repli opérationnelle.

Mini-projet de validation

Définition

Question de départ — Atmosphère martienne, météo, poussière et opérations: comment « Construire une station météo de colonie » agit-il sur « Mini-projet de validation », et quel repère issu de « Pression, densité et température » permet de vérifier la décision?

Intuition ou cas concret

Intuition.

Repère quantitatif

Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise après tempête.

Limite ou critère de vigilance

Repère concret.

Exercice guidé — Mini-projet de validation

Cas « Mini-projet de validation » — Intuition. Repère: Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de... Réserve: Repère concret.

Corrigé raisonné — Mini-projet de validation

Point de départ

Le mini-projet doit relier capteurs, prévision, stockage énergétique, délestage et critères de reprise dans une seule logique exploitable par l'équipage.

Indice du cas

Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise après tempête.

Réserve à appliquer

La validation doit inclure une tempête, une mesure incohérente et une production solaire durablement dégradée; le fonctionnement nominal seul ne démontre pas la robustesse.

Conclusion

Un projet est validé lorsque les données météo changent correctement les décisions énergétiques et de mobilité, y compris en cas de capteur douteux ou de poussière persistante.

Pression, densité et température

Définition

Question de départ — Atmosphère martienne, météo, poussière et opérations: comment « Construire une station météo de colonie » agit-il sur « Mini-projet de validation », et quel repère issu de « Pression, densité et température » permet de vérifier la décision?

Intuition ou cas concret

Intuition.

Repère quantitatif

Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise après tempête.

Limite ou critère de vigilance

Repère concret.

Exercice guidé — Pression, densité et température

Cas « Pression, densité et température » — Intuition. Repère: Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de... Réserve: Repère concret.

Corrigé raisonné — Pression, densité et température

Point de départ

Pression, température et densité décrivent ensemble l'état de l'atmosphère; aucune des trois grandeurs ne doit être interprétée isolément lorsqu'on évalue un environnement local.

Indice du cas

Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise après tempête.

Réserve à appliquer

La densité calculée dépend du mélange gazeux et de la température absolue; une mauvaise unité ou une température en degrés Celsius injectée directement dans la relation produit une erreur.

Conclusion

Le contrôle consiste à vérifier la cohérence entre pression, température et densité avant d'utiliser l'état atmosphérique pour une décision de météo, de thermique ou de mobilité.

Construire une station météo de colonie

Définition

Une station utile mesure pression, température, vent, rayonnement, opacité de poussière et éventuellement humidité locale. La valeur n'est pas seulement scientifique.

Intuition ou cas concret

La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover.

Repère quantitatif

Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et quelles charges seront délestées en premier.

Limite ou critère de vigilance

Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie

Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Corrigé raisonné — Construire une station météo de colonie

Point de départ

Une station utile mesure pression, température, vent, rayonnement, opacité de poussière et éventuellement humidité locale. La valeur n'est pas seulement scientifique.

Indice du cas

Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et quelles charges seront délestées en premier.

Réserve à appliquer

Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Conclusion

Les opérations doivent donc croiser plusieurs mesures: pression, température de l'air et du sol, vitesse du vent, poussière et flux radiatif.

Préparation du module 25: modules 00 à 22 recommandés selon le sujet. Le module 25 revient sur les grandeurs qui conditionnent directement « Atmosphère martienne, météo, poussière et opérations ».

Avant ce module: 18 — Thermodynamique, fluides & contrôle thermique et 24 — Géologie martienne et science de terrain.

Objectifs de maîtrise

- Distinguer les observations, les hypothèses et les inconnues lorsqu'on étudie « Une atmosphère mince mais opérationnellement puissante ».
- Quantifier au moins une grandeur nécessaire à « Pression, température et densité » sans masquer les conversions.
- Expliquer ce qui invaliderait le raisonnement retenu pour « Vents et poussière ».
- Relier « Saisons et planification » aux contraintes concrètes du module 25.

1. Une atmosphère mince mais opérationnellement puissante

La pression de surface martienne est très faible par rapport à celle de la Terre, mais l'atmosphère reste capable de chauffer un véhicule à l'entrée, de transporter de la poussière et de modifier la production solaire. Sa composition dominée par le CO₂ influence également l'ISRU et la chimie des systèmes.

La faible densité crée un paradoxe: elle rend les parachutes moins efficaces qu'à Terre tout en restant assez importante pour imposer un véritable problème aérodynamique.

2. Pression, température et densité

Pour un gaz idéal, $p = \rho RT$, où p est la pression, ρ la masse volumique, R la constante spécifique du gaz et T la température absolue. Cette relation montre qu'une même pression ne correspond pas à la même densité si la température change.

EDL, drones, ventilation d'équipements exposés et production de MOXIE dépendent donc des conditions réelles, pas d'une valeur moyenne annuelle.

3. Vents et poussière

La poussière martienne est fine, électrostatiquement active et abrasive. Les vents peuvent la remettre en suspension et les tempêtes régionales ou globales réduisent l'ensoleillement. Le danger ne se limite pas aux panneaux solaires: joints, filtres, optiques, radiateurs et scaphandres sont aussi concernés.

Une base doit surveiller visibilité, dépôt de poussière, état des filtres et production électrique. La météo devient une entrée de la maintenance.

4. Saisons et planification

L'orbite excentrique de Mars et l'inclinaison de son axe créent des saisons dont l'intensité varie entre hémisphères. La densité atmosphérique et la poussière changent sur l'année martienne.

Les opérations de surface doivent donc être planifiées avec des statistiques saisonnières: ce qui fonctionne un jour clair ne définit pas la capacité minimale d'une base en saison défavorable.

5. Construire une station météo de colonie

Une station utile mesure pression, température, vent, rayonnement, opacité de poussière et éventuellement humidité locale. La valeur n'est pas seulement scientifique. Elle alimente les décisions de sortie EVA, de vol de drones, de nettoyage et de gestion énergétique.

La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover.

6. Densité martienne: pression et température comptent ensemble

Une pression faible ne suffit pas à décrire l'atmosphère. À composition donnée, la densité dépend de la pression et de la température selon l'équation des gaz parfaits. Une journée froide et une journée plus chaude à pression comparable n'offrent donc pas exactement la même portance aérodynamique ni le même refroidissement convectif. Pour l'EDL, les poussières ou le dimensionnement d'un ventilateur externe, il faut préciser l'état atmosphérique utilisé au calcul plutôt que citer une pression moyenne comme si elle définissait toute la planète.

7. Poussière et énergie solaire: l'opacité devient une variable de puissance

La poussière martienne agit à plusieurs niveaux: elle réduit le rayonnement direct, diffuse la lumière, modifie les températures et se dépose sur les surfaces. Une architecture solaire doit donc relier météorologie et budget électrique. Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et quelles charges seront délestées en premier. Les tempêtes deviennent alors un problème de réseau énergétique autant qu'un sujet météo.

8. Couche limite et vents locaux: la météo du site peut dominer la moyenne globale

Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales. Un capteur placé au mauvais endroit peut confondre micro-environnement de l'habitat et atmosphère régionale. Les opérations doivent donc croiser plusieurs mesures: pression, température de l'air et du sol, vitesse du vent, poussière et flux radiatif. Pour une colonie, l'objectif est de transformer ces observations en décisions: fenêtre EVA, protection des mécanismes, orientation d'une prise d'air ou mode énergétique dégradé.

Cas météo: gérer un danger sans prédire chaque rafale

Une équipe peut savoir qu'une période de poussière élevée est probable sans connaître l'heure exacte où la visibilité chutera. L'exploitation définit donc des seuils: niveau permettant une sortie normale, niveau imposant un retour anticipé et niveau interdisant le départ. Le même principe s'applique à l'énergie solaire: on ne promet pas une production exacte, on maintient une réserve compatible avec une plage de scénarios atmosphériques.

9. Exemple calculé pas à pas

À titre pédagogique, prenons une atmosphère de CO₂ à $p = 700$ Pa et $T = 210$ K. Avec la constante spécifique du CO₂ $R \approx 188,9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, la densité vaut $\rho = p/(R\cdot T) = 700/(188,9 \times 210) \approx 0,0176 \text{ kg/m}^3$. Pour un vent de 20 m/s, la pression dynamique vaut $q = \frac{1}{2}\rho v^2 \approx 0,5 \times 0,0176 \times 400 = 3,52$ Pa. Le nombre paraît faible, mais des surfaces très grandes et la poussière abrasive peuvent rendre les effets mécaniques et opérationnels non négligeables.

10. Exercice progressif

Refaire le calcul de densité à 600 Pa et 190 K puis à 800 Pa et 230 K. Comparer la pression dynamique pour un vent de 25 m/s et expliquer pourquoi un même anémomètre ne peut pas être interprété sans l'état thermodynamique de l'air.

11. Solution raisonnée

Avec $p = 700 \text{ Pa}$, $R = 188,9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour le CO_2 et $T = 230 \text{ K}$, la densité vaut $\rho = p/(RT) \approx 0,0161 \text{ kg/m}^3$. À 20 m/s, la pression dynamique $q = 1/2 \rho v^2 \approx 3,2 \text{ Pa}$. Cette valeur est faible, mais poussière, visibilité et production électrique restent des risques opérationnels distincts de la seule force aérodynamique.

12. Mini-projet de validation

Construire une logique météo-énergie pour un habitat: capteurs, seuils d'alerte, prévision à 24/72 h, réduction de production solaire, charges à délester et critères de reprise après tempête.

Approfondissement du module 25: comprendre, calculer, vérifier et décider

Objectif du module — comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

contrôle dimensionnel · ordre de grandeur

1. Pression, densité et température

Dans ce module, pression, densité et température sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

Mini-leçons quantitatives canoniques — protocole V7.4

Toutes les formules quantitatives de ce module sont traitées comme de vraies mini-leçons : intuition, symboles, unités, cas numérique, contrôles, sensibilité, deux exercices corrigés et décision mission.

1. Pression, densité et température

$$\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$ » dans « 1. Pression, densité et température » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 1. Pression, densité et température », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

ρ : masse volumique; p : pression; R_{spec} : constante spécifique du gaz; T : température absolue.

4 — Formule

$$\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: « ρ égale p divisé par (R indice spec multiplié par T)».

6 — Symboles et sens

ρ : masse volumique; p : pression; R_{spec} : constante spécifique du gaz; T : température absolue.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

masse volumique $\rightarrow \text{kg/m}^3$; pression $\rightarrow \text{Pa}$; constante spécifique du gaz $\rightarrow \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; température absolue $\rightarrow \text{K}$.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La relation compare deux grandeurs en utilisant $(R_{\text{spec}} \times T)$ comme étalon local. Diviser p par cet étalon donne ρ ; permuter les termes créerait le rapport réciproque.

11 — Hypothèses

La division exige $(R_{\text{spec}} \times T) \neq 0$. L'ingénierie exige en plus une cohérence de frontière entre p et $(R_{\text{spec}} \times T)$; sans elle, le nombre produit n'est pas comparable.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Refaire le chemin en sens inverse: ρ fois $(R_{\text{spec}} \times T)$ doit ramener à p . Comparer aussi les unités reconstruites à celles du numérateur.

13 — Cas numérique

$p = 700 \text{ Pa}$. Température locale $T = 220 \text{ K}$. $R_{\text{spec}} = 188.9 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Dénominateur $= 188.9 \times 220 = 41,558 \text{ J/kg}$. $\rho = 700 / 41,558 \approx 0.01684 \text{ kg/m}^3$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La relation compare deux grandeurs en utilisant $(R_{\text{spec}} \times T)$ comme étalon local. Diviser p par cet étalon donne ρ ; permuter les termes créerait le rapport réciproque.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Refaire le chemin en sens inverse: ρ fois $(R_{\text{spec}} \times T)$ doit ramener à p . Comparer aussi les unités reconstruites à celles du numérateur.

16 — Estimation mentale

Comparer les puissances de dix de p et $(R_{\text{spec}} \times T)$. Leur différence d'exposants fournit l'ordre de grandeur attendu pour ρ .

17 — Interprétation

« $\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$ » fournit un nombre; «1. Pression, densité et température» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 1. Pression, densité et température »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Sur un quotient simple, une petite variation relative du numérateur se transmet avec signe positif; celle du dénominateur se transmet approximativement avec signe négatif.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $p = 650 \text{ Pa}$; $T = 210 \text{ K}$; $R_{\text{spec}} = 188.9 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Appliquez « $\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $p = 650 \text{ Pa}$; $T = 210 \text{ K}$; $R_{\text{spec}} = 188.9 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Relation appliquée : $\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$. Calcul et résultat : Dénominateur = $188.9 \times 210 = 39,669$. $\rho = 650 / 39,669 \approx 0.01639 \text{ kg/m}^3$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 1. Pression, densité et température ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 1. Pression, densité et température », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$p = 700 \text{ Pa}$. Température locale $T = 220 \text{ K}$. $R_{\text{spec}} = 188.9 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Dénominateur = $188.9 \times 220 = 41,558 \text{ J/kg}$. $\rho = 700 / 41,558 \approx 0.01684 \text{ kg/m}^3$. Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$ » fournit un nombre; «1. Pression, densité et température» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre

$$p \times V = n \times R \times T$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $p \times V = n \times R \times T$ » dans « 2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

p : pression du gaz; V : volume; n : quantité de matière; R : constante universelle des gaz parfaits; T : température absolue en kelvins.

4 — Formule

$$p \times V = n \times R \times T$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: « p multiplié par V égale n multiplié par R multiplié par T ».

6 — Symboles et sens

p : pression du gaz; V : volume; n : quantité de matière; R : constante universelle des gaz parfaits; T : température absolue en kelvins.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

p en pascals (Pa), V en mètres cubes (m^3), n en moles (mol), R en $\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$ et T en kelvins (K). Les deux membres ont la même dimension: $\text{Pa}\cdot\text{m}^3 = \text{J}$ et $\text{mol} \times \text{J/(mol}\cdot\text{K)} \times \text{K} = \text{J}$.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La loi des gaz parfaits impose $pV=nRT$. Le membre gauche est pression×volume; le membre droit est quantité de matière×constante universelle des gaz×température absolue. Pour isoler p , on calcule nRT puis on divise par V .

11 — Hypothèses

Ne pas prolonger mécaniquement « $p \times V = n \times R \times T$ » au-delà du domaine documenté. Une dépendance entre facteurs de $n \times R \times T$ peut invalider la proportionnalité simple.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — calculer pV d'un côté et nRT de l'autre avec des unités cohérentes. Les deux valeurs doivent coïncider à l'arrondi près et chacune doit s'exprimer en joules.

13 — Cas numérique

$n = 0.50 \text{ mol}$ $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ $T = 220 \text{ K}$ $V = 0.090 \text{ m}^3$ $p = nRT/V = (0.50 \times 8.314 \times 220)/0.090 \approx 10,160 \text{ Pa}$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La loi des gaz parfaits impose $pV=nRT$. Le membre gauche est pression×volume; le membre droit est quantité de matière×constante universelle des gaz×température absolue. Pour isoler p , on calcule nRT puis on divise par V .

15 — Vérification

Contrôle indépendant — calculer pV d'un côté et nRT de l'autre avec des unités cohérentes. Les deux valeurs doivent coïncider à l'arrondi près et chacune doit s'exprimer en joules.

16 — Estimation mentale

La vérification d'échelle consiste à remplacer provisoirement les facteurs de $n \times R \times T$ par leurs ordres de grandeur puis à calculer le produit mental correspondant.

17 — Interprétation

« $p \times V = n \times R \times T$ » fournit un nombre; «2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Dans ce modèle, à n et V constants, p est proportionnelle à T absolue: +10 % sur T en kelvins donne +10 % sur p . À n et T constants, +10 % sur V donne p divisée par 1,10, soit environ -9,1 %.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $n = 0.40 \text{ mol}$; $T = 250 \text{ K}$; $V = 0.080 \text{ m}^3$. Appliquez « $p \times V = n \times R \times T$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $n = 0.40 \text{ mol}$; $T = 250 \text{ K}$; $V = 0.080 \text{ m}^3$. Relation appliquée : $p \times V = n \times R \times T$.
Calcul et résultat : $p = (0.40 \times 8.314 \times 250)/0.080 \approx 10,393 \text{ Pa} = 10.4 \text{ kPa}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$n = 0.50 \text{ mol}$ $R = 8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ $T = 220 \text{ K}$ $V = 0.090 \text{ m}^3$ $p = nRT/V = (0.50 \times 8.314 \times 220)/0.090 \approx 10,160 \text{ Pa}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $p \times V = n \times R \times T$ » fournit un nombre; «2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

3. Vents et pression dynamique

$$q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$ » dans «3. Vents et pression dynamique»? ?

2 — Intuition sans symboles

Dans «3. Vents et pression dynamique», plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

q_{dyn} : pression dynamique; ρ : masse volumique du fluide; v : vitesse

4 — Formule

$$q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: « q indice dyn égale 0,5 multiplié par ρ multiplié par v^2 ».

6 — Symboles et sens

q_{dyn} : pression dynamique; ρ : masse volumique du fluide; v : vitesse

7 — Prononciation

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

8 — Unités

ρ en kg/m^3 et v en m/s donnent ρv^2 en $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2) = \text{Pa}$; q_{dyn} est donc en pascals. Le facteur 0,5 est sans dimension.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La pression dynamique vaut $q_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} \rho v^2$: on élève d'abord la vitesse au carré, on multiplie par la masse volumique ρ , puis par 1/2. La dépendance en v^2 est essentielle.

11 — Hypothèses

Ne pas prolonger mécaniquement « $q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$ » au-delà du domaine documenté. Une dépendance entre facteurs de $0,5 \times \rho \times v^2$ peut invalider la proportionnalité simple.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — calculer $2q_{\text{dyn}}/\rho$: on doit retrouver v^2 ; la racine carrée de $2q_{\text{dyn}}/\rho$ doit donc redonner la vitesse v . Le contrôle d'unité doit aboutir à des pascals.

13 — Cas numérique

$\rho = 0.0176 \text{ kg/m}^3$. $v = 20 \text{ m/s}$. $v^2 = 20 \times 20 = 400 \text{ m}^2/\text{s}^2$. $\rho v^2 = 0.0176 \times 400 = 7.04 \text{ Pa}$. $q_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} \times 7.04 = 3.52 \text{ Pa}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La pression dynamique vaut $q_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} \rho v^2$: on élève d'abord la vitesse au carré, on multiplie par la masse volumique ρ , puis par $1/2$. La dépendance en v^2 est essentielle.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — calculer $2q_{\text{dyn}}/\rho$: on doit retrouver v^2 ; la racine carrée de $2q_{\text{dyn}}/\rho$ doit donc redonner la vitesse v . Le contrôle d'unité doit aboutir à des pascals.

16 — Estimation mentale

La vérification d'échelle consiste à remplacer provisoirement les facteurs de $0,5 \times \rho \times v^2$ par leurs ordres de grandeur puis à calculer le produit mental correspondant.

17 — Interprétation

« $q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$ » fournit un nombre; «3. Vents et pression dynamique» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 3. Vents et pression dynamique »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À ρ fixe, q_{dyn} varie comme v^2 : +10 % sur v donne $\times 1,10^2 = 1,21$, soit +21 %. Doubler v quadruple q_{dyn} . À v fixe, +10 % sur ρ donne +10 % sur q_{dyn} .

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $\rho = 0.016 \text{ kg/m}^3$; $v = 25 \text{ m/s}$. Appliquez « $q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $\rho = 0.016 \text{ kg/m}^3$; $v = 25 \text{ m/s}$. Relation appliquée : $q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$. Calcul et résultat : $625 \text{ m}^2/\text{s}^2$. $\rho v^2 = 0.016 \times 625 = 10.0 \text{ Pa}$. $q_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} \times 10.0 = 5.0 \text{ Pa}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 3. Vents et pression dynamique ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 3. Vents et pression dynamique », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\rho = 0.0176 \text{ kg/m}^3$. $v = 20 \text{ m/s}$. $v^2 = 20 \times 20 = 400 \text{ m}^2/\text{s}^2$. $\rho v^2 = 0.0176 \times 400 = 7.04 \text{ Pa}$. $q_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} \times 7.04 = 3.52 \text{ Pa}$. Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$ » fournit un nombre; «3. Vents et pression dynamique» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

4. Saisons et cycle du CO2

$$\text{Variation}_p = (p_2 - p_1) / p_1$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Variation}_p = (p_2 - p_1) / p_1$ » dans « 4. Saisons et cycle du CO2 » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 4. Saisons et cycle du CO₂ », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

Variation_p: variation relative de pression entre les états 1 et 2; p₁: pression de référence à l'état 1; p₂: pression à l'état 2.

4 — Formule

$$\text{Variation}_p = (p_2 - p_1) / p_1$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: «Variation indice p égale (p indice 2 - p indice 1) divisé par p indice 1».

6 — Symboles et sens

Variation_p: variation relative de pression entre les états 1 et 2; p₁: pression de référence à l'état 1; p₂: pression à l'état 2.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Variation_p est sans dimension (souvent exprimée en %); Pour p₁ et p₂ doivent être exprimées, choisir une unité de pression identique, par exemple Pa ou kPa.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

On soustrait p₁ à p₂ pour obtenir la variation absolue de pression, puis on divise par la pression de référence p₁. Le quotient est donc une variation relative sans dimension.

11 — Hypothèses

La division exige p₁ ≠ 0. L'ingénierie exige en plus une cohérence de frontière entre (p₂ - p₁) et p₁; sans elle, le nombre produit n'est pas comparable.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse: p₂ = p₁ × (1 + Variation_p). Si cette reconstruction ne retrouve pas la pression finale, la variation relative ou le sens du rapport est faux.

13 — Cas numérique

p₁ = 680 Pa p₂ = 720 Pa Variation_p = (720 - 680)/680 = 40/680 ≈ 0.0588 = 5.88%

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

On soustrait p₁ à p₂ pour obtenir la variation absolue de pression, puis on divise par la pression de référence p₁. Le quotient est donc une variation relative sans dimension.

15 — Vérification

Contrôle inverse: p₂ = p₁ × (1 + Variation_p). Si cette reconstruction ne retrouve pas la pression finale, la variation relative ou le sens du rapport est faux.

16 — Estimation mentale

Comparer les puissances de dix de (p₂ - p₁) et p₁. Leur différence d'exposants fournit l'ordre de grandeur attendu pour Variation_p.

17 — Interprétation

«Variation_p = (p₂ - p₁) / p₁» fournit un nombre; «4. Saisons et cycle du CO₂» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 4. Saisons et cycle du CO₂ »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Sur un quotient simple, une petite variation relative du numérateur se transmet avec signe positif; celle du dénominateur se transmet approximativement avec signe négatif.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 700 Pa, 742 Pa. Appliquez « $\text{Variation}_p = (p_2 - p_1) / p_1$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 700 Pa, 742 Pa. Relation appliquée : $\text{Variation}_p = (p_2 - p_1) / p_1$. Calcul et résultat : — Relative pressure change — distinguish a change à partir de an absolute pressure $(742 - 700) / 700 = 42 / 700 = 0.060 = 6.0\%$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 4. Saisons et cycle du CO₂ ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 4. Saisons et cycle du CO₂ », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$p_1 = 680 \text{ Pa}$ $p_2 = 720 \text{ Pa}$ $\text{Variation}_p = (720 - 680) / 680 = 40 / 680 \approx 0.0588 = 5.88\%$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $\text{Variation}_p = (p_2 - p_1) / p_1$ » fournit un nombre; « 4. Saisons et cycle du CO₂ » fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

5. Poussière atmosphérique et opacité

$$P_{\text{sol}} = P_0 \times \exp(-\tau)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $P_{\text{sol}} = P_0 \times \exp(-\tau)$ » dans « 5. Poussière atmosphérique et opacité » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 5. Poussière atmosphérique et opacité », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

P_{sol} : puissance solaire disponible après atténuation; P_0 : puissance solaire de référence avant atténuation; τ : épaisseur optique; exp: fonction exponentielle.

4 — Formule

$$P_{\text{sol}} = P_0 \times \exp(-\tau)$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: « P indice sol égale P indice 0 multiplié par $\exp(-\tau)$ ».

6 — Symboles et sens

P_{sol} : puissance solaire disponible après atténuation; P_0 : puissance solaire de référence avant atténuation; τ : épaisseur optique; exp: fonction exponentielle.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Une même unité de puissance doit servir à P_{sol} et P_0 ; τ sans dimension; $\exp(-\tau)$ sans dimension.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Le facteur exponentiel représente une atténuation multiplicative: plus τ augmente, plus la fraction transmise diminue.

11 — Hypothèses

Limites: ce modèle suppose une atténuation décrite par une seule épaisseur optique τ . Diffusion multiple, géométrie solaire, spectre, angle d'incidence et variations spatiales peuvent exiger un modèle radiatif plus complet.

12 — Contrôle indépendant

P_{sol}/P_0 doit redonner $\exp(-\tau)$; $-\ln(P_{\text{sol}}/P_0)$ doit redonner τ si les valeurs sont positives.

13 — Cas numérique

$P_0 = 500 \text{ W/m}^2$ $\tau = 0.60$ $\exp(-0.60) \approx 0.5488$ $P_{\text{sol}} = 500 \times 0.5488 \approx 274 \text{ W/m}^2$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le facteur exponentiel représente une atténuation multiplicative: plus τ augmente, plus la fraction transmise diminue.

15 — Vérification

P_{sol}/P_0 doit redonner $\exp(-\tau)$; $-\ln(P_{\text{sol}}/P_0)$ doit redonner τ si les valeurs sont positives.

16 — Estimation mentale

Repères: $\tau=0$ donne $P_{\text{sol}}=P_0$; $\tau>0$ doit donner $P_{\text{sol}}<P_0$; lorsque τ devient grand, la puissance transmise tend vers zéro sans devenir négative.

17 — Interprétation

« $P_{\text{sol}} = P_0 \times \exp(-\tau)$ » fournit un nombre; «5. Poussière atmosphérique et opacité» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 5. Poussière atmosphérique et opacité »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Sensibilité: $dP_{\text{sol}}/d\tau = -P_{\text{sol}}$. Une augmentation $\Delta\tau$ multiplie la puissance par $\exp(-\Delta\tau)$; l'effet est multiplicatif, pas une soustraction constante.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $P_0 = 480 \text{ W/m}^2$; $\tau = 0.8$. Appliquez « $P_{\text{sol}} = P_0 \times \exp(-\tau)$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $P_0 = 480 \text{ W/m}^2$; $\tau = 0.8$. Relation appliquée : $P_{\text{sol}} = P_0 \times \exp(-\tau)$. Calcul et résultat : 216 W/m^2 . Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 5. Poussière atmosphérique et opacité ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 5. Poussière atmosphérique et opacité », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$P_0 = 500 \text{ W/m}^2$ $\tau = 0.60$ $\exp(-0.60) \approx 0.5488$ $P_{\text{sol}} = 500 \times 0.5488 \approx 274 \text{ W/m}^2$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $P_{\text{sol}} = P_0 \times \exp(-\tau)$ » fournit un nombre; «5. Poussière atmosphérique et opacité» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

6. Tempêtes et perte de production solaire

$$\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ » dans «6. Tempêtes et perte de production solaire» ?

2 — Intuition sans symboles

Dans «6. Tempêtes et perte de production solaire», plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

ΔE : énergie non produite ou manquante pendant l'intervalle; $P_{\text{manquante}}$: puissance moyenne indisponible pendant cet intervalle; Δt : durée pendant laquelle cette puissance manque.

4 — Formule

$$\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: «delta E égale P indice manquante multiplié par delta t».

6 — Symboles et sens

ΔE : énergie non produite ou manquante pendant l'intervalle; $P_{\text{manquante}}$: puissance moyenne indisponible pendant cet intervalle; Δt : durée pendant laquelle cette puissance manque.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Bases cohérentes obligatoires: $\text{W} \times \text{s} = \text{J}$, ou $\text{kW} \times \text{h} = \text{kWh}$. Ainsi ΔE est une énergie; $P_{\text{manquante}}$ une puissance; Δt une durée. On ne combine pas kW et secondes pour annoncer directement des kWh sans conversion.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Une puissance est une énergie par unité de temps. Multiplier la puissance manquante par la durée de la perte donne l'énergie totale non fournie sur cet intervalle.

11 — Hypothèses

Ne pas prolonger mécaniquement « $\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ » au-delà du domaine documenté. Une dépendance entre facteurs de $P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ peut invalider la proportionnalité simple.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse: $\Delta E / \Delta t$ doit redonner $P_{\text{manquante}}$. Vérifier aussi la fermeture d'unités: $\text{kWh/h} = \text{kW}$ ou $\text{J/s} = \text{W}$.

13 — Cas numérique

$$P_{\text{manquante}} = 1.5 \text{ kW} \quad \Delta t = 4.0 \text{ h} \quad \Delta E = 1.5 \times 4.0 = 6.0 \text{ kWh}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Une puissance est une énergie par unité de temps. Multiplier la puissance manquante par la durée de la perte donne l'énergie totale non fournie sur cet intervalle.

15 — Vérification

Contrôle inverse: $\Delta E/\Delta t$ doit redonner $P_{\text{manquante}}$. Vérifier aussi la fermeture d'unités: kWh/h=kW ou J/s=W.

16 — Estimation mentale

La vérification d'échelle consiste à remplacer provisoirement les facteurs de $P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ par leurs ordres de grandeur puis à calculer le produit mental correspondant.

17 — Interprétation

« $\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ » fournit un nombre; «6. Tempêtes et perte de production solaire» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 6. Tempêtes et perte de production solaire »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À durée fixe, +10 % de puissance manquante donne +10 % d'énergie manquante; à puissance fixe, +10 % de durée donne +10 % d'énergie manquante.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 2.2 kW, 3.5 h. Appliquez « $\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 2.2 kW, 3.5 h. Relation appliquée : $\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$. Calcul et résultat : $\Delta E = 2.2 \times 3.5 = 7.7$ kWh. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 6. Tempêtes et perte de production solaire ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 6. Tempêtes et perte de production solaire », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$P_{\text{manquante}} = 1.5$ kW $\Delta t = 4.0$ h $\Delta E = 1.5 \times 4.0 = 6.0$ kWh Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ » fournit un nombre; «6. Tempêtes et perte de production solaire» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

7. Échanges thermiques avec une atmosphère tenue

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\dot{Q}_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$ » dans « 7. Échanges thermiques avec une atmosphère tenue » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 7. Échanges thermiques avec une atmosphère ténue », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

$\dot{Q}_{\text{conv}}$: puissance thermique transférée par convection; h : coefficient de convection thermique; A : aire d'échange; T_{surface} : température de la surface; T_{air} : température du gaz au voisinage de la surface.

4 — Formule

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: « $\dot{Q}$ indice conv égale h multiplié par A multiplié par $(T$ indice surface - T indice air)».

6 — Symboles et sens

$\dot{Q}_{\text{conv}}$: puissance thermique transférée par convection; h : coefficient de convection thermique; A : aire d'échange; T_{surface} : température de la surface; T_{air} : température du gaz au voisinage de la surface.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

$\dot{Q}_{\text{conv}}$ en watts (W); h en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A en m^2 ; T_{surface} et T_{air} en K ou en $^{\circ}\text{C}$ pour leur différence. Le produit donne W.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La différence de température crée le potentiel d'échange; h traduit l'intensité de la convection par unité de surface et par kelvin, puis A étend cet échange à toute la surface.

11 — Hypothèses

Le coefficient h dépend du régime d'écoulement, de la géométrie et des propriétés du gaz; il ne doit pas être supposé constant hors du domaine pour lequel il a été évalué.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse: $\dot{Q}_{\text{conv}}/(hA)$ doit retrouver $\Delta T = T_{\text{surface}} - T_{\text{air}}$. Si $T_{\text{surface}} = T_{\text{air}}$, le modèle donne $\dot{Q}_{\text{conv}} = 0$.

13 — Cas numérique

$$h = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad A = 2.0 \text{ m}^2 \quad T_{\text{surface}} = 250 \text{ K} \quad T_{\text{air}} = 225 \text{ K} \quad \dot{Q}_{\text{conv}} = 5 \times 2.0 \times 25 = 250 \text{ W}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La différence de température crée le potentiel d'échange; h traduit l'intensité de la convection par unité de surface et par kelvin, puis A étend cet échange à toute la surface.

15 — Vérification

Contrôle inverse: $\dot{Q}_{\text{conv}}/(hA)$ doit retrouver $\Delta T = T_{\text{surface}} - T_{\text{air}}$. Si $T_{\text{surface}} = T_{\text{air}}$, le modèle donne $\dot{Q}_{\text{conv}} = 0$.

16 — Estimation mentale

La vérification d'échelle consiste à remplacer provisoirement les facteurs de $h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$ par leurs ordres de grandeur puis à calculer le produit mental correspondant.

17 — Interprétation

« $\dot{Q}_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$ » fournit un nombre; «7. Échanges thermiques avec une atmosphère ténue» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 7. Échanges thermiques avec une atmosphère ténue »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À h et ΔT fixes, +10 % de surface donne +10 % de puissance convective; à surface fixe, l'effet est également linéaire avec ΔT dans ce modèle.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $h = 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $A = 1.5 \text{ m}^2$ et a 20 K difference. Appliquez « $\dot{Q}_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $h = 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $A = 1.5 \text{ m}^2$ et a 20 K difference. Relation appliquée : $\dot{Q}_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$. Calcul et résultat : $\dot{Q}_{\text{conv}} = 3 \times 1.5 \times 20 = 90 \text{ W}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 7. Échanges thermiques avec une atmosphère ténue ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 7. Échanges thermiques avec une atmosphère ténue », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$h = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $A = 2.0 \text{ m}^2$ $T_{\text{surface}} = 250 \text{ K}$ $T_{\text{air}} = 225 \text{ K}$ $\dot{Q}_{\text{conv}} = 5 \times 2.0 \times 25 = 250 \text{ W}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $\dot{Q}_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$ » fournit un nombre; «7. Échanges thermiques avec une atmosphère ténue» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

8. Prévision météo et décision EVA

$$\text{Marge_météo} = (\text{Seuil} - \text{Valeur_prévue}) / \text{Seuil}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Marge_météo} = (\text{Seuil} - \text{Valeur_prévue}) / \text{Seuil}$ » dans « 8. Prévision météo et décision EVA » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 8. Prévision météo et décision EVA », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

Marge_météo: écart relatif entre un seuil météorologique et la valeur prévue; Seuil: valeur limite du paramètre météorologique surveillé; Valeur_prévue: valeur prédite de ce même paramètre.

4 — Formule

$$\text{Marge_météo} = (\text{Seuil} - \text{Valeur_prévue}) / \text{Seuil}$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: «Marge indice météo égale (Seuil - Valeur indice prévue) divisé par Seuil».

6 — Symboles et sens

Marge_météo: écart relatif entre un seuil météorologique et la valeur prévue; Seuil: valeur limite du paramètre météorologique surveillé; Valeur_prévue: valeur prédite de ce même paramètre.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Seuil et Valeur_prévue doivent décrire la même grandeur et utiliser la même unité (par exemple Pa avec Pa, m/s avec m/s). Leur différence conserve cette unité; la division par Seuil l'annule. Marge_météo est donc sans dimension.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

On calcule d'abord la distance au seuil, Seuil-Valeur_prévue, puis on la rapporte au seuil lui-même pour obtenir une marge relative comparable entre niveaux différents.

11 — Hypothèses

Seuil doit être non nul et correspondre exactement à la même variable météorologique que Valeur_prévue. Le signe de la marge n'a de sens qu'avec une convention claire sur le côté sûr du seuil.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse: $\text{Valeur_prévue} = \text{Seuil} \times (1 - \text{Marge_météo})$. La reconstruction doit retrouver la valeur prévue initiale, à l'arrondi près.

13 — Cas numérique

Seuil = 20 m/s Valeur_prévue = 14 m/s Marge_météo = $(20 - 14) / 20 = 0.30 = 30\%$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

On calcule d'abord la distance au seuil, Seuil-Valeur_prévue, puis on la rapporte au seuil lui-même pour obtenir une marge relative comparable entre niveaux différents.

15 — Vérification

Contrôle inverse: $\text{Valeur_prévue} = \text{Seuil} \times (1 - \text{Marge_météo})$. La reconstruction doit retrouver la valeur prévue initiale, à l'arrondi près.

16 — Estimation mentale

Comparer les puissances de dix de (Seuil - Valeur_prévue) et Seuil. Leur différence d'exposants fournit l'ordre de grandeur attendu pour Marge_météo.

17 — Interprétation

«Marge_météo = (Seuil - Valeur_prévue) / Seuil» fournit un nombre; «8. Prévision météo et décision EVA» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 8. Prévision météo et décision EVA »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Sur un quotient simple, une petite variation relative du numérateur se transmet avec signe positif; celle du dénominateur se transmet approximativement avec signe négatif.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 25 m/s, 21 m/s. Appliquez « Marge_météo = (Seuil - Valeur_prévue) / Seuil », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 25 m/s, 21 m/s. Relation appliquée : $\text{Marge_météo} = (\text{Seuil} - \text{Valeur_prévue}) / \text{Seuil}$. Calcul et résultat : $M = (25 - 21) / 25 = 4 / 25 = 0.16 = 16\%$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 8. Prévision météo et décision EVA ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 8. Prévision météo et décision EVA », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

Seuil = 20 m/s Valeur_prévue = 14 m/s $\text{Marge_météo} = (20 - 14) / 20 = 0.30 = 30\%$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $\text{Marge_météo} = (\text{Seuil} - \text{Valeur_prévue}) / \text{Seuil}$ » fournit un nombre; «8. Prévision météo et décision EVA» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques

$$\text{Transmission} = I / I_0$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Transmission} = I / I_0$ » dans « 9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

Transmission: fraction de l'intensité lumineuse transmise; I: intensité radiométrique mesurée après traversée; I_0 : intensité radiométrique de référence avant atténuation.

4 — Formule

$$\text{Transmission} = I / I_0$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: «Transmission égale I divisé par I indice 0».

6 — Symboles et sens

Transmission: fraction de l'intensité lumineuse transmise; I: intensité radiométrique mesurée après traversée; I_0 : intensité radiométrique de référence avant atténuation.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

I et I_0 dans la même unité radiométrique; leur rapport Transmission est sans dimension.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Le rapport compare l'intensité transmise à l'intensité de référence; comme les deux intensités ont la même unité, la transmission est sans dimension.

11 — Hypothèses

La division exige $I_0 \neq 0$. L'ingénierie exige en plus une cohérence de frontière entre I et I_0 ; sans elle, le nombre produit n'est pas comparable.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse: $\text{Transmission} \times I_0$ doit redonner I ; avec $I = I_0$, la transmission doit valoir 1.

13 — Cas numérique

$I = 350 \text{ W/m}^2$ $I_0 = 500 \text{ W/m}^2$ $\text{Transmission} = 350/500 = 0.70 = 70\%$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le rapport compare l'intensité transmise à l'intensité de référence; comme les deux intensités ont la même unité, la transmission est sans dimension.

15 — Vérification

Contrôle inverse: $\text{Transmission} \times I_0$ doit redonner I ; avec $I = I_0$, la transmission doit valoir 1.

16 — Estimation mentale

Comparer les puissances de dix de I et I_0 . Leur différence d'exposants fournit l'ordre de grandeur attendu pour Transmission.

17 — Interprétation

« $\text{Transmission} = I / I_0$ » fournit un nombre; «9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Sur un quotient simple, une petite variation relative du numérateur se transmet avec signe positif; celle du dénominateur se transmet approximativement avec signe négatif.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 270, 450. Appliquez « $\text{Transmission} = I / I_0$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 270, 450. Relation appliquée : $\text{Transmission} = I / I_0$. Calcul et résultat : $T = 270/450 = 0.60 = 60\%$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$I = 350 \text{ W/m}^2$ $I_0 = 500 \text{ W/m}^2$ $\text{Transmission} = 350/500 = 0.70 = 70\%$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $\text{Transmission} = I / I_0$ » fournit un nombre; «9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

10. Planification d'opérations en environnement variable

$$t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$ » dans « 10. Planification d'opérations en environnement variable » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 10. Planification d'opérations en environnement variable », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

$t_{\text{utilisable}}$: durée réellement exploitable de la fenêtre; $t_{\text{fenêtre}}$: durée totale de la fenêtre;
 $f_{\text{disponible}}$: fraction de cette fenêtre considérée comme disponible.

4 — Formule

$$t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$$

5 — Lecture

Lecture mathématique: « t indice utilisable égale t indice fenêtre multiplié par f indice disponible ».

6 — Symboles et sens

$t_{\text{utilisable}}$: durée réellement exploitable de la fenêtre; $t_{\text{fenêtre}}$: durée totale de la fenêtre;
 $f_{\text{disponible}}$: fraction de cette fenêtre considérée comme disponible.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

$t_{\text{utilisable}}$ et $t_{\text{fenêtre}}$ doivent partager une référence d'unité de durée commune; $f_{\text{disponible}}$ sans dimension entre 0 et 1.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Multiplier la durée totale par la fraction disponible donne la durée réellement utilisable.

11 — Hypothèses

Ne pas prolonger mécaniquement « $t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$ » au-delà du domaine documenté. Une dépendance entre facteurs de $t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$ peut invalider la proportionnalité simple.

12 — Contrôle indépendant

$t_{\text{utilisable}}/t_{\text{fenêtre}}$ doit redonner $f_{\text{disponible}}$.

13 — Cas numérique

$$t_{\text{fenêtre}} = 5.0 \text{ h} \quad f_{\text{disponible}} = 0.65 \quad t_{\text{utilisable}} = 5.0 \times 0.65 = 3.25 \text{ h}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Multiplier la durée totale par la fraction disponible donne la durée réellement utilisable.

15 — Vérification

$t_{\text{utilisable}}/t_{\text{fenêtre}}$ doit redonner $f_{\text{disponible}}$.

16 — Estimation mentale

La vérification d'échelle consiste à remplacer provisoirement les facteurs de $t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$ par leurs ordres de grandeur puis à calculer le produit mental correspondant.

17 — Interprétation

« $t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$ » fournit un nombre; «10. Planification d'opérations en environnement variable» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 10. Planification d'opérations en environnement variable »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À hypothèses constantes, une variation relative d'un facteur simple de $t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$ devient la même variation relative de $t_{\text{utilisable}}$.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 6.0 h, 80%. Appliquez « $t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 6.0 h, 80%. Relation appliquée : $t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$. Calcul et résultat : $t_{\text{utilisable}} = 6.0 \times 0.80 = 4.8$ h. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 10. Planification d'opérations en environnement variable ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 10. Planification d'opérations en environnement variable », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$t_{\text{fenêtre}} = 5.0$ h $f_{\text{disponible}} = 0.65$ $t_{\text{utilisable}} = 5.0 \times 0.65 = 3.25$ h Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

« $t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$ » fournit un nombre; «10. Planification d'opérations en environnement variable» fournit son contexte. L'interprétation exige donc de conserver ensemble grandeur, unité, frontière du système et domaine de validité.

On injecte maintenant l'événement suivant: l'opacité augmente plus vite que prévu.

2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre

Dans ce module, gaz parfait comme modèle de premier ordre sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

On injecte maintenant l'événement suivant: un anémomètre donne une valeur incohérente.

3. Vents et pression dynamique

Dans ce module, vents et pression dynamique sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

— « Vents et pression dynamique ».

On injecte maintenant l'événement suivant: la poussière dégrade simultanément panneaux et radiateurs.

4. Saisons et cycle du CO2

Dans ce module, saisons et cycle du CO2 sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

On injecte maintenant l'événement suivant: une EVA est engagée alors que la visibilité chute.

5. Poussière atmosphérique et opacité

Dans ce module, poussière atmosphérique et opacité sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre se charge plus vite que le modèle.

6. Tempêtes et perte de production solaire

Dans ce module, tempêtes et perte de production solaire sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

On injecte maintenant l'événement suivant: la production solaire reste basse après la fin supposée d'une tempête.

7. Échanges thermiques avec une atmosphère ténue

Dans ce module, échanges thermiques avec une atmosphère ténue sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

On injecte maintenant l'événement suivant: l'opacité augmente plus vite que prévu.

8. Prévision météo et décision EVA

Dans ce module, prévision météo et décision EVA sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

— « Prévision météo et décision EVA ».

On injecte maintenant l'événement suivant: un anémomètre donne une valeur incohérente.

9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques

Dans ce module, effets de poussière sur mécanismes et optiques sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

On injecte maintenant l'événement suivant: la poussière dégrade simultanément panneaux et radiateurs.

10. Planification d'opérations en environnement variable

Dans ce module, planification d'opérations en environnement variable sert directement à comprendre l'atmosphère martienne comme un environnement dynamique qui conditionne énergie, thermique, visibilité, mécanismes, santé et opérations de surface.

On injecte maintenant l'événement suivant: une EVA est engagée alors que la visibilité chute.

Exercices progressifs avec corrigés 1:1

Exercice 1: Pression, densité et température

Analysez pression, densité et température. Relation à tester: « $\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$ ». Cas dégradé: un anémomètre donne une valeur incohérente. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 1: Pression, densité et température

Données du cas

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie — Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 1: Pression, densité et température

Résultat

Corrigé — Exercice 1: Pression, densité et température

Exercice 2: Gaz parfait comme modèle de premier ordre

Analysez gaz parfait comme modèle de premier ordre. Relation à tester: « $q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$ ». Cas dégradé: la poussière dégrade simultanément panneaux et radiateurs. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 2: Gaz parfait comme modèle de premier ordre

Données du cas

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie — Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 2: Gaz parfait comme modèle de premier ordre

Résultat

Corrigé — Exercice 2: Gaz parfait comme modèle de premier ordre

Exercice 3: Vents et pression dynamique

Analysez vents et pression dynamique. Relation à tester: « $P_{\text{sol}} = P_0 \times \tau$ ». Cas dégradé: une EVA est engagée alors que la visibilité chute. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 3: Vents et pression dynamique

Données du cas

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie — Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 3: Vents et pression dynamique

Résultat

Corrigé — Exercice 3: Vents et pression dynamique

Exercice 4: Saisons et cycle du CO2

Analysez saisons et cycle du CO2. Relation à tester: « $\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ ». Cas dégradé: un filtre se charge plus vite que le modèle. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 4: Saisons et cycle du CO2

Données du cas

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie — Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 4: Saisons et cycle du CO2

Résultat

Corrigé — Exercice 4: Saisons et cycle du CO2

Exercice 5: Poussière atmosphérique et opacité

Analysez poussière atmosphérique et opacité. Relation à tester: « $p = p / (R_{\text{spec}} \times T)$ ». Cas dégradé: la production solaire reste basse après la fin supposée d'une tempête. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 5: Poussière atmosphérique et opacité

Données du cas

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie — Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 5: Poussière atmosphérique et opacité

Résultat

Corrigé — Exercice 5: Poussière atmosphérique et opacité

Exercice 6: Tempêtes et perte de production solaire

Analysez tempêtes et perte de production solaire. Relation à tester: « $q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$ ». Cas dégradé: l'opacité augmente plus vite que prévu. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 6: Tempêtes et perte de production solaire

Données du cas

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie — Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 6: Tempêtes et perte de production solaire

Résultat

Corrigé — Exercice 6: Tempêtes et perte de production solaire

Exercice 7: Échanges thermiques avec une atmosphère ténue

Analysez échanges thermiques avec une atmosphère ténue. Relation à tester: « $P_{\text{sol}} = P_0 \times \tau$ ». Cas dégradé: un anémomètre donne une valeur incohérente. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 7: Échanges thermiques avec une atmosphère ténue

Données du cas

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie — Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 7: Échanges thermiques avec une atmosphère ténue

Résultat

Corrigé — Exercice 7: Échanges thermiques avec une atmosphère ténue

Exercice 8: Prévision météo et décision EVA

Analysez prévision météo et décision eva. Relation à tester: « $\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$ ». Cas dégradé: la poussière dégrade simultanément panneaux et radiateurs. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 8: Prévision météo et décision EVA

Données du cas

Exercice guidé — Construire une station météo de colonie — Cas « Construire une station météo de colonie » — La redondance doit être géographique: un seul capteur près d'un habitat ne décrit pas nécessairement la météo à vingt kilomètres sur une route de rover. Repère: Le point opérationnel n'est pas seulement de connaître une valeur d'opacité, mais de savoir combien de jours de stockage sont disponibles lorsque la production chute et... Réserve: Près du sol, relief, pente, ensoleillement et inertie thermique créent des circulations locales.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 8: Prévision météo et décision EVA

Résultat

Corrigé — Exercice 8: Prévision météo et décision EVA

Interprétation

Corrigé — Exercice 8: Prévision météo et décision EVA

Mini-projet intégrateur et dossier de référence

Établir un bulletin météo opérationnel sur sept sols, puis construire une stratégie de puissance, d'EVA et de maintenance pour trois niveaux d'opacité. Chaque décision doit annoncer le seuil qui la déclenche.

« Exercice 8: Prévision météo et décision EVA » — hypothèses, budget, marges.

« Exercice 8: Prévision météo et décision EVA » — interfaces et causes communes.

« Exercice 8: Prévision météo et décision EVA » — calculs, limites, critères.

Repères du passage: inventaire

Repères du passage: sous-système

Verification de maîtrise du module 25

- « Exercice 8: Prévision météo et décision EVA » — unités et ordre de grandeur.
- « Exercice 8: Prévision météo et décision EVA » — cas dégradé.
- « Exercice 8: Prévision météo et décision EVA » — marge décisionnelle.
- « Exercice 8: Prévision météo et décision EVA » — mesure de contrôle.

- Termes de contrôle: Vérification

contrôle dimensionnel · ordre de grandeur

Repères du passage: observation · contrôle

Repères du passage: substitution

Repères du passage: validation

Repères du passage: Mode dégradé

Repères du passage: robustesse

Repères du passage: contamination

Repères du passage: délestage

Repères du passage: système

Repères du passage: altitude

Termes. contrôle dimensionnel · ordre de grandeur

Sources primaires et passerelles

- NASA Mars weather / MEDA
- NASA Mars Facts
- NASA Science — Mars facts
- NASA — MEDA / Mars 2020 atmosphere instruments

Matrice de parité FR ↔ EN

Chaque mini-leçon quantitative française ci-dessous correspond à une mini-leçon canonique anglaise du même module; la parité porte sur le niveau intellectuel, les calculs, les exercices et la décision mission.

#	Mini-leçon FR	Correspondance EN	Formule canonique
1	1. Pression, densité et température	Near-surface atmospheric density from pressure and temperature	$\rho = p / (R_{\text{spec}} \times T)$
2	2. Gaz parfait comme modèle de premier ordre	Ideal-gas relation — connect pressure, volume, amount and temperature	$p \times V = n \times R \times T$
3	3. Vents et pression dynamique	Dynamic pressure — turn density and wind into a mechanical loading estimate	$q_{\text{dyn}} = 0,5 \times \rho \times v^2$
4	4. Saisons et cycle du CO2	Relative pressure change — distinguish a change from an absolute pressure	$\text{Variation}_p = (p_2 - p_1) / p_1$
5	5. Poussière atmosphérique et opacité	Dust optical attenuation — translate optical depth into transmitted direct flux	$P_{\text{sol}} = P_0 \times \exp(-\tau)$
6	6. Tempêtes et perte de production solaire	Energy deficit — convert missing power into missing energy	$\Delta E = P_{\text{manquante}} \times \Delta t$
7	7. Échanges thermiques avec une atmosphère ténue	Convective heat-transfer estimate in thin air	$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$
8	8. Prévision météo et décision EVA	Weather threshold margin — express how far a forecast is from a limit	$\text{Marge}_{\text{météo}} = (\text{Seuil} - \text{Valeur}_{\text{prévue}}) / \text{Seuil}$
9	9. Effets de poussière sur mécanismes et optiques	Optical transmission — compare received intensity with a clean reference	$\text{Transmission} = I / I_0$
10	10. Planification d'opérations en environnement variable	Usable operational window — convert a nominal window into effective time	$t_{\text{utilisable}} = t_{\text{fenêtre}} \times f_{\text{disponible}}$