

Thermique de colonie: rejets de chaleur, radiateurs et récupération



Grandes surfaces radiatives rejetant la chaleur d'un système spatial.

Visualisation conceptuelle — le contrôle thermique transporte la chaleur des sources vers les puits puis la rejette ; la température et l'émissivité gouvernent fortement le dimensionnement.

Gérer la chaleur à l'échelle d'une implantation où habitat, serre, atelier, batteries et informatique deviennent mutuellement dépendants.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Thermique de colonie: rejets de chaleur, radiateurs et récupération: comment « Apports solaires et échanges avec le sol » agit-il sur « Conduction dans les structures », et quel repère issu de « Boucles fluides et échangeurs » permet de vérifier la décision?

Intuition. Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.



Apports solaires et échanges avec le sol

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.



Conduction dans les structures

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.



Boucles fluides et échangeurs

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

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

- Apports solaires et échanges avec le sol — Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.
- Conduction dans les structures — Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.
- Boucles fluides et échangeurs — Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

CARTE DE MAÎTRISE · MODULE 50

Quatre repères à maîtriser — Thermique de colonie: rejets de chaleur, radiateurs et récupération

Apports solaires et échanges avec le sol

Définition

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Repère quantitatif

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

Limite ou critère de vigilance

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Exercice guidé — Apports solaires et échanges avec le sol

Cas « Apports solaires et échanges avec le sol » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant...

Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Corrigé raisonné — Apports solaires et échanges avec le sol**Point de départ**

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Indice du cas

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

Réserve à appliquer

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Conclusion

Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Conduction dans les structures**Définition**

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Repère quantitatif

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

Limite ou critère de vigilance

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Exercice guidé — Conduction dans les structures

Cas « Conduction dans les structures » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant...

Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Corrigé raisonné — Conduction dans les structures**Point de départ**

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Indice du cas

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

Réserve à appliquer

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Conclusion

Livable: données, unités, résultat, marge, décision.

Boucles fluides et échangeurs**Définition**

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Repère quantitatif

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

Limite ou critère de vigilance

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Exercice guidé — Boucles fluides et échangeurs

Cas « Boucles fluides et échangeurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant...

Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Corrigé raisonné — Boucles fluides et échangeurs

Point de départ

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Indice du cas

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

Réserve à appliquer

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Conclusion

Livable: données, unités, résultat, marge, décision.

Rayonnement et radiateurs

Définition

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Repère quantitatif

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

Limite ou critère de vigilance

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs

Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et

comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant...

Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Corrigé raisonné — Rayonnement et radiateurs**Point de départ**

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

Indice du cas

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

Réserve à appliquer

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Conclusion

Livable: données, unités, résultat, marge, décision.

Pour aborder « Thermique de colonie: rejets de chaleur, radiateurs et récupération », les prérequis conseillés sont modules 00 à 46 selon le sujet. Pour « Thermique de colonie: rejets de chaleur, radiateurs et récupération », une notation technique n'est utilisée qu'après avoir été reliée à son sens physique ou opérationnel.

Objectifs de maîtrise

- Reconstruire avec ses propres mots le mécanisme étudié dans « Toute puissance finit presque en chaleur ».
- Vérifier par un [ordre de grandeur](#) le résultat utilisé dans « [Température](#) n'est pas énergie ».
- Proposer un contrôle indépendant avant de conclure sur « Boucles fluides et échangeurs ».
- Justifier une action de mission à partir des limites observées dans « Radiateurs: surface, température et environnement ».

1. Toute puissance finit presque en chaleur

Une colonie consomme de l'électricité pour éclairer, calculer, pomper, chauffer, refroidir et fabriquer. Une grande partie de cette énergie finit sous forme de chaleur dans les volumes ou équipements. Le bilan thermique doit donc suivre les puissances dissipées, les apports solaires, les pertes vers le [sol](#) et la capacité de rejet vers l'environnement. Une architecture électrique de plusieurs centaines de kilowatts implique un problème thermique du même ordre.

La Moon to Mars Architecture de la [NASA](#) traite l'énergie et les systèmes de surface comme des fonctions couplées. [NASA — Moon to Mars Architecture](#)

2. Température n'est pas énergie

La température indique un [état](#); la chaleur décrit un transfert d'énergie. Un petit composant peut être très chaud avec peu d'énergie totale, tandis qu'une masse d'eau à faible différence de température peut stocker énormément d'énergie. Le dimensionnement combine capacités thermiques, débits et gradients de température plutôt que de raisonner uniquement en degrés Celsius.

3. Boucles fluides et échangeurs

Une boucle active transporte la chaleur depuis les charges vers un échangeur ou un **radiateur**. Débit, chaleur spécifique et différence de température déterminent la puissance transportée. Une pompe trop faible limite le transfert; une pompe trop puissante consomme davantage et peut augmenter l'usure. Les échangeurs doivent également tolérer encrassement, fuite et isolement d'un branchement.

4. Radiateurs: surface, température et environnement

Un radiateur rejette de l'énergie par rayonnement. Sa capacité dépend fortement de sa température absolue, de son **émissivité** et de la vue vers un environnement froid. Poussière, ombrage et orientation modifient la performance. Augmenter la température du circuit peut réduire la surface nécessaire, mais impose d'autres contraintes aux équipements et aux matériaux.

5. Récupérer la chaleur avant de la jeter

Une serre, un séchoir, un ballon d'eau ou un procédé industriel peuvent utiliser une chaleur qui serait autrement rejetée. La récupération améliore l'efficacité globale, mais elle n'est utile que si les niveaux de température sont compatibles. Une chaleur à 30 °C ne remplace pas directement un four à 800 °C. Il faut donc raisonner en **qualité** de chaleur, pas seulement en kilowattheures.

6. Stockage thermique et décalage temporel

Des **masses** d'eau, matériaux à changement de phase ou structures peuvent stocker de la chaleur quelques heures. Le stockage permet de lisser les pointes, de traverser un cycle de production ou de réduire la taille instantanée du rejet. Il ne crée toutefois aucune énergie: la chaleur stockée devra être utilisée ou rejetée plus tard.

7. Panne thermique: souvent plus rapide qu'une panne énergétique

Un ordinateur ou une batterie peut rester alimenté tout en dépassant rapidement sa température acceptable si la boucle de refroidissement s'arrête. Les scénarios de panne thermique définissent donc temps avant limite, charges à délester, circulation naturelle éventuelle et capacité de boucle de secours. Les alarmes doivent suivre tendances et non uniquement seuils finaux.

8. Intégration habitat-serre-industrie

La serre peut demander de la chaleur à certains moments et en produire à d'autres. L'atelier génère des pointes. Les batteries ont une plage thermique étroite. Une implantation mature gère ces systèmes comme un réseau thermique, avec priorités et échangeurs, plutôt que comme une série de climatiseurs indépendants.

Approfondissement: coupler énergie et thermique dans les modes dégradés

Délester une charge électrique réduit souvent aussi la chaleur à évacuer, mais certaines actions font l'inverse. Couper une pompe pour économiser de l'électricité peut provoquer une surchauffe rapide. Les procédures de crise doivent donc être écrites avec un bilan énergétique et thermique simultané. La liste des charges critiques inclut les équipements qui retirent la chaleur des autres charges, pas seulement ceux qui fournissent une fonction directement visible à l'équipage.

Approfondissement: poussière et dégradation des radiateurs

Un radiateur martien peut perdre des performances si la poussière modifie son émissivité ou son exposition. Le [système](#) prévoit inspection, mesure de performance et éventuellement nettoyage. La dégradation est suivie en comparant la puissance rejetée aux températures et conditions attendues. Une baisse progressive peut être compensée temporairement par délestage ou température plus élevée, mais elle doit déclencher une [maintenance](#) avant de réduire la marge thermique de l'habitat.

Approfondissement: hiérarchie des températures

Toutes les boucles ne doivent pas fonctionner à la même température. Une boucle froide protège l'électronique sensible tandis qu'une boucle plus chaude peut rejeter efficacement la chaleur industrielle. Relier toutes les charges à un seul niveau thermique peut agrandir inutilement radiateurs et pompes. Une architecture multi-boucles échange l'énergie entre niveaux lorsque c'est utile, puis rejette le reste à la température la plus favorable compatible avec les équipements.

9. Exemple calculé: débit d'une boucle d'eau

Une boucle doit transporter 50 kW avec de l'eau et accepte une élévation de température de 5 K. Avec une chaleur spécifique d'environ 4,18 kJ/(kg·K), le **débit massique** nécessaire est $\dot{m} = 50 \div (4,18 \times 5) \approx 2,39$ kg/s. Si la pompe ne fournit que 1,5 kg/s, la différence de température devra augmenter ou la puissance évacuée diminuer.

Étude de cas calculée: chaleur récupérée et chaleur encore à rejeter

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE — Les équipements dissipent 80 kW de chaleur. Un système de récupération peut valoriser 25 % de cette puissance pendant une **période** de 10 h.

On note P_d la **puissance thermique** dissipée, en kW; η la fraction récupérée, sans **unité**; P_r la puissance récupérée; P_j la puissance restant à rejeter; t la durée, en h; E_j l'énergie thermique à rejeter, en kWh thermiques.

$P_r = P_d \times \eta = 80 \times 0,25 = 20$ kW. $P_j = 80 - 20 = 60$ kW. Sur 10 h: $E_j = P_j \times t = 60 \times 10 = 600$ kWh thermiques.

Récupérer de la chaleur réduit le rejet mais ne le supprime pas. Le dimensionnement réel dépend des températures, des échangeurs et de l'environnement radiatif; ici, l'objectif est de fermer le bilan de puissance.

10. Exercice

Une zone informatique dissipe 35 kW et un atelier 60 kW pendant deux heures. Proposer une stratégie combinant radiateur de 70 kW, stockage thermique et [délestage](#). Calculer l'énergie excédentaire pendant la pointe si les deux charges fonctionnent simultanément.

11. Solution raisonnée

La charge totale est 95 kW. Avec 70 kW de rejet, le déficit est 25 kW pendant deux heures, soit 50 kWh thermiques à stocker ou éviter. Une solution peut décaler une partie de l'atelier ou dimensionner un stockage supérieur à 50 kWh pour conserver une [marge](#).

12. Mini-projet de validation

Construire le schéma thermique d'un habitat, d'une serre et d'un atelier: charges, boucles, échangeurs, radiateurs, stockage, récupération de chaleur, scénarios de panne et plan de délestage.

Approfondissement du module 50: comprendre, calculer, vérifier et décider

Objectif du module — fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

1. Sources internes de chaleur

Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$\dot{Q}_{\text{interne}} = \sum P_{\text{dissipée}}$$

Question de départ

Quelle somme totale $\dot{Q}_{\text{interne}}$ obtient-on en parcourant tous les indices présents dans « $\dot{Q}_{\text{interne}} = \sum P_{\text{dissipée}}$ »?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: « $\dot{Q}$ indice interne égale somme de P indice dissipée».

Symboles, prononciation et sens

$\dot{Q}_{\text{interne}}$: puissance thermique totale dissipée à l'intérieur;
 $P_{\text{dissipée}}$: puissance dissipée par chaque équipement ou source i ; $\sum$: somme sur toutes les sources internes.

Unités

$\dot{Q}_{\text{interne}}$ et chaque $P_{\text{dissipée}}$ en W ou kW, sur la même base.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques. Le passage identifie pour source: les températures, puissances dissipées et capacités de rejet.

Pourquoi cette opération

Les puissances thermiques de toutes les sources s'additionnent pour former la charge interne totale.

Substitution et calcul

Reprendre les valeurs réellement renseignées pour chaque indice, produire les sous-résultats séparément, puis former le cumul final.

Saisie sur calculatrice

Pour la saisie, utiliser une mémoire ou une table intermédiaire; additionner ensuite les termes et contrôler le même total par regroupements différents.

Estimation mentale

Avant le calcul précis, borner le cumul avec quelques termes dominants et le nombre total d'indices; cette borne donne l'échelle attendue de $\dot{Q}_{\text{interne}}$.

Contrôle indépendant

Séparer les sources en groupes et vérifier que la somme de leurs sous-totaux redonne $\dot{Q}_{\text{interne}}$.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $\dot{Q}_{\text{interne}} = \sum P_{\text{dissipée}}$ »: dans «1. Sources internes de chaleur», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

La notation indique simplement «faire le même calcul pour chaque élément, puis additionner toutes les réponses» afin d'obtenir $\dot{Q}_{\text{interne}}$.

Variation / sensibilité

Une hausse Δ d'un terme isolé se transmet au cumul $\dot{Q}_{\text{interne}}$; les contributions dominantes sont donc celles dont l'incertitude mérite le plus d'attention.

Limite / hypothèse

La validité exige une liste d'indices sans omission ni double comptage; les grandeurs sommées doivent aussi être compatibles.

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

2. Apports solaires et échanges avec le sol

Dans ce module, apports solaires et échanges avec le sol sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$\dot{Q}_{\text{solaire}} = \alpha \times A \times G$$

Question de départ

Quel calcul multiplicatif relie les entrées de « $\dot{Q}_{\text{solaire}} = \alpha \times A \times G$ » à $\dot{Q}_{\text{solaire}}$?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: « $\dot{Q}$ indice solaire égale α multiplié par A multiplié par G».

Symboles, prononciation et sens

$\dot{Q}_{\text{solaire}}$ (« $\dot{Q}$ solaire»): puissance thermique reçue du Soleil; α (« α »): absorptivité solaire; A («a»): aire; G («G»): irradiance reçue.

Unités

$\dot{Q}$ solaire $\rightarrow$ W ou kW; absorptivité solaire $\rightarrow$ sans dimension [0;1]; aire ou surface $\rightarrow$ m²; irradiance reçue $\rightarrow$ W/m².

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques.

Pourquoi cette opération

Dans ce modèle, chaque élément de $\alpha \times A \times G$ agit comme multiplicateur. Le résultat commun est $\dot{Q}_{\text{solaire}}$; un test dimensionnel accompagne donc le calcul numérique.

Substitution et calcul

La substitution doit montrer quelle donnée alimente chaque facteur de $\alpha \times A \times G$. Les facteurs préparés sont ensuite multipliés pour évaluer $\dot{Q}_{\text{solaire}}$.

Saisie sur calculatrice

Calculer séparément les facteurs composés, garder leurs résultats en mémoire et effectuer le produit final; cette décomposition rend les erreurs de saisie visibles.

Estimation mentale

Estimer successivement le produit partiel des facteurs de $\alpha \times A \times G$; suivre son échelle permet de repérer l'étape où une erreur éventuelle apparaît.

Contrôle indépendant

Contrôle indépendant – Vérification de cohérence: résoudre la relation pour un facteur autre que $\dot{Q}_{\text{solaire}}$; la valeur obtenue doit correspondre à celle injectée dans le calcul initial.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $\dot{Q}_{\text{solaire}} = \alpha \times A \times G$ »: dans «2. Apports solaires et échanges avec le sol», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

La relation ne donne pas un total additif: elle donne $\dot{Q}_{\text{solaire}}$ comme combinaison multiplicative des termes de $\alpha \times A \times G$.

Variation / sensibilité

Le test de sensibilité conserve toutes les entrées de $\alpha \times A \times G$ sauf une; la réponse de $\dot{Q}_{\text{solaire}}$ révèle alors l'influence directe de ce facteur.

Limite / hypothèse

Chaque facteur de $\alpha \times A \times G$ doit être défini sur un périmètre compatible. Une multiplication arithmétiquement correcte peut rester physiquement fausse si les frontières diffèrent.

On injecte maintenant l'événement suivant: une zone de radiateur est masquée par poussière ou dépôt.

3. Conduction dans les structures

Dans ce module, conduction dans les structures sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$P_{\text{cond}} = k \times A \times \Delta T / L$$

Question de départ

En respectant l'ordre de « $P_{\text{cond}} = k \times A \times \Delta T / L$ », quelle valeur obtient-on pour P_{cond} ?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: «P indice cond égale k multiplié par A multiplié par delta T divisé par L».

Symboles, prononciation et sens

P_{cond} (« pé conduction ») : puissance thermique transférée par conduction ; k (« ka ») : conductivité thermique du matériau ; A (« a ») : aire traversée par le flux thermique ; ΔT (« delta té ») : différence de température entre les deux faces ; L (« elle ») : épaisseur ou longueur de conduction.

Unités

P_{cond} est une puissance de conduction en W ou kW ; k en $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; A en m^2 ; ΔT en K – une différence en $^{\circ}\text{C}$ a la même valeur numérique – ; L en m. Le produit $kA\Delta T/L$ donne bien des watts.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques.

Pourquoi cette opération

La conduction augmente avec la conductivité k , l'aire A et l'écart de température ΔT , mais diminue lorsque la longueur de conduction L augmente. La formule combine donc ces trois facteurs au numérateur puis divise par l'épaisseur traversée.

Substitution et calcul

La substitution conserve la traçabilité: chaque nombre remplace soit $k \times A \times \Delta T$, soit L ; après préparation des deux termes, leur quotient est évalué.

Saisie sur calculatrice

Mémoriser la valeur complète de $k \times A \times \Delta T$, obtenir ensuite celle de L , puis rappeler la première et la diviser par la seconde. Éviter les arrondis intermédiaires.

Estimation mentale

Avant toute précision, comparer $k \times A \times \Delta T / L$ à des ratios simples – $1/10$, $1/2$, 1 , 2 ou 10 – afin de situer P_{cond} .

Contrôle indépendant

Contrôle indépendant – La preuve inverse est multiplicative: $L \times P_{\text{cond}} \approx k \times A \times \Delta T$. Vérifier cette égalité avec les valeurs non arrondies autant que possible.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $P_{\text{cond}} = k \times A \times \Delta T / L$ »: dans «3. Conduction dans les structures», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

P_{cond} est la puissance thermique qui traverse le matériau par conduction dans ce modèle simplifié.

Variation / sensibilité

Une perturbation sur $k \times A \times \Delta T$ agit dans le même sens sur P_{cond} ; une perturbation sur L agit dans le sens opposé, à hypothèses inchangées.

Limite / hypothèse

La contrainte mathématique est $L \neq 0$; la contrainte physique est l'alignement des périmètres de $k \times A \times \Delta T$ et L dans «3. Conduction dans les structures».

— « Conduction dans les structures ».

On injecte maintenant l'événement suivant: la colonie ajoute des procédés très dissipatifs.

4. Boucles fluides et échangeurs

Dans ce module, boucles fluides et échangeurs sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$\dot{Q}_{\text{fluide}} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T$$

Question de départ

Quel calcul multiplicatif relie les entrées de « $\dot{Q}_{\text{fluide}} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T$ » à $\dot{Q}_{\text{fluide}}$?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: « $\dot{Q}$ indice fluide égale m point multiplié par c indice p multiplié par ΔT ».

Symboles, prononciation et sens

$\dot{Q}_{\text{fluide}}$ (« $\dot{Q}$ fluide»): puissance thermique transportée par un fluide; $\dot{m}$ (« m point»): débit massique; c_p (« c p »): capacité thermique massique; ΔT (« ΔT »): écart de température.

Unités

$\dot{Q}_{\text{fluide}} \rightarrow \text{W ou kW}$; débit massique $\rightarrow \text{kg/s}$; capacité thermique massique $\rightarrow \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$; écart de température $\rightarrow \text{K}$; une différence en $^{\circ}\text{C}$ a la même valeur numérique.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques. Le passage identifie pour source: les températures, puissances dissipées et capacités de rejet.

Pourquoi cette opération

Dans ce modèle, chaque élément de $\dot{m} \times c_p \times \Delta T$ agit comme multiplicateur. Le résultat commun est $\dot{Q}_{\text{fluide}}$; un test dimensionnel accompagne donc le calcul numérique.

Substitution et calcul

La substitution doit montrer quelle donnée alimente chaque facteur de $\dot{m} \times c_p \times \Delta T$. Les facteurs préparés sont ensuite multipliés pour évaluer $\dot{Q}_{\text{fluide}}$.

Saisie sur calculatrice

Calculer séparément les facteurs composés, garder leurs résultats en mémoire et effectuer le produit final; cette décomposition rend les erreurs de saisie visibles.

Estimation mentale

Estimer successivement le produit partiel des facteurs de $\dot{m} \times c_p \times \Delta T$; suivre son échelle permet de repérer l'étape où une erreur éventuelle apparaît.

Contrôle indépendant

Contrôle indépendant – Vérification de cohérence: résoudre la relation pour un facteur autre que $\dot{Q}_{\text{fluide}}$; la valeur obtenue doit correspondre à celle injectée dans le calcul initial.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $\dot{Q}_{\text{fluide}} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T$ »: dans «4. Boucles fluides et échangeurs», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

La relation ne donne pas un total additif: elle donne $\dot{Q}_{\text{fluide}}$ comme combinaison multiplicative des termes de $\dot{m} \times c_p \times \Delta T$.

Variation / sensibilité

Le test de sensibilité conserve toutes les entrées de $\dot{m} \times c_p \times \Delta T$ sauf une; la réponse de $\dot{Q}_{\text{fluide}}$ révèle alors l'influence directe de ce facteur.

Limite / hypothèse

Chaque facteur de $\dot{m} \times c_p \times \Delta T$ doit être défini sur un périmètre compatible. Une multiplication arithmétiquement correcte peut rester physiquement fausse si les frontières diffèrent.

On injecte maintenant l'événement suivant: la récupération de chaleur devient indisponible.

5. Rayonnement et radiateurs

Dans ce module, rayonnement et radiateurs sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$P_{\text{rad}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$$

Question de départ

Quel calcul multiplicatif relie les entrées de « $P_{\text{rad}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$ » à P_{rad} ?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: «P indice rad égale ε multiplié par sigma multiplié par A multiplié par $(T^4 - T \text{ indice env}^4)$ ».

Symboles, prononciation et sens

P_{rad} («pé rad»): puissance thermique rayonnée par le radiateur; ε («epsilon»): émissivité de la surface, sans dimension; σ («sigma»): constante de Stefan-Boltzmann; A («a»): aire rayonnante; T («té»): température absolue du radiateur; T_{env} («té environnement»): température absolue radiative de l'environnement.

Unités

P_{rad} en W; ε sans dimension; σ en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A en m^2 ; T et T_{env} en K. Les températures doivent être absolues car elles sont élevées à la puissance quatre.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques. Le passage identifie pour source: les températures, puissances dissipées et capacités de rejet.

Pourquoi cette opération

La loi de Stefan-Boltzmann donne un flux radiatif proportionnel à $\varepsilon\sigma$ et à la différence des quatrièmes puissances des températures absolues. Multiplier par l'aire A convertit ce flux surfacique en puissance totale.

Substitution et calcul

La substitution doit montrer quelle donnée alimente chaque facteur de $\varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$. Les facteurs préparés sont ensuite multipliés pour évaluer P_{rad} .

Saisie sur calculatrice

Calculer séparément les facteurs composés, garder leurs résultats en mémoire et effectuer le produit final; cette décomposition rend les erreurs de saisie visibles.

Estimation mentale

Estimer successivement le produit partiel des facteurs de $\varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$; suivre son échelle permet de repérer l'étape où une erreur éventuelle apparaît.

Contrôle indépendant

Contrôle dimensionnel: $[W/(m^2 \cdot K^4)] \times [m^2] \times [K^4] = W$. Contrôle physique: si $T = T_{\text{env}}$, la différence $T^4 - T_{\text{env}}^4$ vaut zéro et la puissance radiative nette doit s'annuler.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $P_{\text{rad}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$ »: dans «5. Rayonnement et radiateurs», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

La relation ne donne pas un total additif: elle donne P_{rad} comme combinaison multiplicative des termes de $\varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$.

Variation / sensibilité

Le test de sensibilité conserve toutes les entrées de $\varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$ sauf une; la réponse de P_{rad} révèle alors l'influence directe de ce facteur.

Limite / hypothèse

Chaque facteur de $\varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$ doit être défini sur un périmètre compatible. Une multiplication arithmétiquement correcte peut rester physiquement fausse si les frontières diffèrent.

On injecte maintenant l'événement suivant: une température ambiante différente réduit la marge.

6. Stockage thermique

Dans ce module, stockage thermique sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$Q_{\text{stock}} = m \times c_p \times \Delta T$$

Question de départ

Quel calcul multiplicatif relie les entrées de « $Q_{\text{stock}} = m \times c_p \times \Delta T$ » à Q_{stock} ?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: «Q indice stock égale m multiplié par c indice p multiplié par delta T».

Symboles, prononciation et sens

Q_{stock} («Q stock»): quantité d'énergie thermique stockée ou restituable; m («ème»): masse du matériau de stockage; c_p («cé indice pé»): capacité thermique massique à pression constante; ΔT («delta té»): variation de température du matériau.

Unités

Q_{stock} en J (ou kJ/MJ après conversion); m en kg; c_p en J/(kg·K); ΔT en K. Une différence de température a la même valeur numérique en kelvins et en degrés Celsius.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques.

Pourquoi cette opération

Chaque kilogramme peut stocker c_p joules par kelvin. Multiplier c_p par la masse m puis par l'écart ΔT donne donc l'énergie thermique totale stockée.

Substitution et calcul

La substitution doit montrer quelle donnée alimente chaque facteur de $m \times c_p \times \Delta T$. Les facteurs préparés sont ensuite multipliés pour évaluer Q_{stock} .

Saisie sur calculatrice

Calculer séparément les facteurs composés, garder leurs résultats en mémoire et effectuer le produit final; cette décomposition rend les erreurs de saisie visibles.

Estimation mentale

Estimer successivement le produit partiel des facteurs de $m \times c_p \times \Delta T$; suivre son échelle permet de repérer l'étape où une erreur éventuelle apparaît.

Contrôle indépendant

Contrôle dimensionnel: $\text{kg} \times \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times \text{K} = \text{J}$. Contrôle inverse: $\Delta T = Q_{\text{stock}}/(m c_p)$ si m et c_p sont connus.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $Q_{\text{stock}} = m \times c_p \times \Delta T$ »: dans «6. Stockage thermique», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

La relation ne donne pas un total additif: elle donne Q_{stock} comme combinaison multiplicative des termes de $m \times c_p \times \Delta T$.

Variation / sensibilité

Le test de sensibilité conserve toutes les entrées de $m \times c_p \times \Delta T$ sauf une; la réponse de Q_{stock} révèle alors l'influence directe de ce facteur.

Limite / hypothèse

Chaque facteur de $m \times c_p \times \Delta T$ doit être défini sur un périmètre compatible. Une multiplication arithmétiquement correcte peut rester physiquement fausse si les frontières diffèrent.

On injecte maintenant l'événement suivant: un échangeur s'encrasse et augmente les pertes.

7. Récupération de chaleur utile

Dans ce module, récupération de chaleur utile sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$\eta_{\text{rec}} = Q_{\text{utile}} / Q_{\text{disponible}}$$

Question de départ

En respectant l'ordre de « $\eta_{\text{rec}} = Q_{\text{utile}} / Q_{\text{disponible}}$ », quelle valeur obtient-on pour η_{rec} ?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: « η indice rec égale Q indice utile divisé par Q indice disponible».

Symboles, prononciation et sens

η_{rec} (« η récupération»): fraction de la puissance thermique disponible effectivement récupérée utilement; Q_{utile} («Q utile»): puissance thermique utile récupérée; $Q_{\text{disponible}}$ («Q disponible»): puissance thermique totale disponible sur la même frontière.

Unités

Q_{utile} et $Q_{\text{disponible}}$ doivent être exprimés dans une unité commune de puissance thermique, W ou kW. Leur quotient η_{rec} est sans dimension, entre 0 et 1 dans ce modèle.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques.

Pourquoi cette opération

Le rendement compare la puissance thermique utile à la puissance thermique disponible.

Substitution et calcul

La substitution conserve la traçabilité: chaque nombre remplace soit Q_{utile} , soit $Q_{\text{disponible}}$; après préparation des deux termes, leur quotient est évalué.

Saisie sur calculatrice

Mémoriser la valeur complète de Q_{utile} , obtenir ensuite celle de $Q_{\text{disponible}}$, puis rappeler la première et la diviser par la seconde. Éviter les arrondis intermédiaires.

Estimation mentale

Avant toute précision, comparer $Q_{\text{utile}}/Q_{\text{disponible}}$ à des ratios simples – 1/10, 1/2, 1, 2 ou 10 – afin de situer η_{rec} .

Contrôle indépendant

$\eta_{\text{rec}} \times Q_{\text{disponible}}$ doit redonner Q_{utile} .

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $\eta_{\text{rec}} = Q_{\text{utile}} / Q_{\text{disponible}}$ »: dans «7. Récupération de chaleur utile», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

Cette valeur n'est pas une différence: η_{rec} donne le multiple ou la fraction que représente Q_{utile} lorsqu'on prend $Q_{\text{disponible}}$ comme base.

Variation / sensibilité

Une perturbation sur Q_{utile} agit dans le même sens sur η_{rec} ; une perturbation sur $Q_{\text{disponible}}$ agit dans le sens opposé, à hypothèses inchangées.

Limite / hypothèse

La contrainte mathématique est $Q_{\text{disponible}} \neq 0$; la contrainte physique est l'alignement des périmètres de Q_{utile} et $Q_{\text{disponible}}$ dans «7. Récupération de chaleur utile».

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

8. Marges saisonnières

Dans ce module, marges saisonnières sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$\text{Marge_thermique} = (P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}}) / P_{\text{pointe}}$$

Question de départ

En respectant l'ordre de «Marge_thermique = $(P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}}) / P_{\text{pointe}}$ », quelle valeur obtient-on pour Marge_thermique?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: «Marge indice thermique égale $(P_{\text{indice capacité}} - P_{\text{indice pointe}})$ divisé par $P_{\text{indice pointe}}$ ».

Symboles, prononciation et sens

Marge_thermique («marge thermique»): réserve relative de capacité de rejet par rapport à la pointe thermique; $P_{\text{capacité}}$ («pé capacité»): puissance thermique maximale que le système peut rejeter; P_{pointe} («pé pointe»): puissance thermique maximale à rejeter dans le scénario.

Unités

P_capacité et P_pointe en W ou kW dans la même unité;
Marge_thermique sans dimension, souvent exprimée en %.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques.

Pourquoi cette opération

On calcule l'excédent de capacité $P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}}$, puis on le rapporte à la pointe demandée pour obtenir une réserve relative.

Substitution et calcul

La substitution conserve la traçabilité: chaque nombre remplace soit $(P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}})$, soit P_{pointe} ; après préparation des deux termes, leur quotient est évalué.

Saisie sur calculatrice

Mémoriser la valeur complète de $(P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}})$, obtenir ensuite celle de P_{pointe} , puis rappeler la première et la diviser par la seconde. Éviter les arrondis intermédiaires.

Estimation mentale

Avant toute précision, comparer $(P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}}) / P_{\text{pointe}}$ à des ratios simples – 1/10, 1/2, 1, 2 ou 10 – afin de situer Marge_thermique.

Contrôle indépendant

Contrôle inverse: $P_{\text{capacité}} = P_{\text{pointe}} \times (1 + \text{Marge_thermique})$.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de «Marge_thermique = $(P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}}) / P_{\text{pointe}}$ »: dans «8. Marges saisonnières», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

Cette valeur n'est pas une différence: Marge_thermique donne le multiple ou la fraction que représente $(P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}})$ lorsqu'on prend P_{pointe} comme base.

Variation / sensibilité

Une perturbation sur ($P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}}$) agit dans le même sens sur $\text{Marge}_{\text{thermique}}$; une perturbation sur P_{pointe} agit dans le sens opposé, à hypothèses inchangées.

Limite / hypothèse

La contrainte mathématique est $P_{\text{pointe}} \neq 0$; la contrainte physique est l'alignement des périmètres de ($P_{\text{capacité}} - P_{\text{pointe}}$) et P_{pointe} dans «8. Marges saisonnières».

— « Marges saisonnières ».

On injecte maintenant l'événement suivant: une zone de radiateur est masquée par poussière ou dépôt.

9. Panne de boucle et dérating

Dans ce module, panne de boucle et dérating sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$P_{\text{dispo}} = P_{\text{nom}} \times f_{\text{derating}}$$

Question de départ

Quel calcul multiplicatif relie les entrées de « $P_{\text{dispo}} = P_{\text{nom}} \times f_{\text{derating}}$ » à P_{dispo} ?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: «P indice dispo égale P indice nom multiplié par f indice derating».

Symboles, prononciation et sens

P_{dispo} («P dispo»): puissance réellement disponible; P_{nom} («P nom»): puissance nominale; f_{derating} («f derating»): fraction «derating» comprise entre 0 et 1

Unités

$P_{\text{dispo}} \rightarrow \text{W ou kW}$; puissance nominale $\rightarrow \text{W ou kW}$; $f_{\text{derating}} \rightarrow$ sans dimension $[0;1]$.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques. Le passage identifie pour source: les températures, puissances dissipées et capacités de rejet.

Pourquoi cette opération

Dans ce modèle, chaque élément de $P_{\text{nom}} \times f_{\text{derating}}$ agit comme multiplicateur. Le résultat commun est P_{dispo} ; un test dimensionnel accompagne donc le calcul numérique.

Substitution et calcul

La substitution doit montrer quelle donnée alimente chaque facteur de $P_{\text{nom}} \times f_{\text{derating}}$. Les facteurs préparés sont ensuite multipliés pour évaluer P_{dispo} .

Saisie sur calculatrice

Calculer séparément les facteurs composés, garder leurs résultats en mémoire et effectuer le produit final; cette décomposition rend les erreurs de saisie visibles.

Estimation mentale

Estimer successivement le produit partiel des facteurs de $P_{\text{nom}} \times f_{\text{derating}}$; suivre son échelle permet de repérer l'étape où une erreur éventuelle apparaît.

Contrôle indépendant

Contrôle indépendant – Vérification de cohérence: résoudre la relation pour un facteur autre que P_{dispo} ; la valeur obtenue doit correspondre à celle injectée dans le calcul initial.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $P_{\text{dispo}} = P_{\text{nom}} \times f_{\text{derating}}$ »: dans «9. Panne de boucle et dérating», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

La relation ne donne pas un total additif: elle donne P_{dispo} comme combinaison multiplicative des termes de $P_{\text{nom}} \times f_{\text{derating}}$.

Variation / sensibilité

Le test de sensibilité conserve toutes les entrées de $P_{nom} \times f_{derating}$ sauf une; la réponse de P_{dispo} révèle alors l'influence directe de ce facteur.

Limite / hypothèse

Chaque facteur de $P_{nom} \times f_{derating}$ doit être défini sur un périmètre compatible. Une multiplication arithmétiquement correcte peut rester physiquement fausse si les frontières diffèrent.

On injecte maintenant l'événement suivant: la colonie ajoute des procédés très dissipatifs.

10. Croissance de population et capacité thermique

Dans ce module, croissance de population et capacité thermique sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant même la production d'énergie.

$$\dot{Q}_{total} = N \times \dot{q}_{pc} + \dot{Q}_{équipements}$$

Question de départ

Comment recomposer $\dot{Q}_{total}$ par l'addition présentée dans « $\dot{Q}_{total} = N \times \dot{q}_{pc} + \dot{Q}_{équipements}$ »?

Lecture à voix haute

Prononciation des signes: « $\dot{Q}$ indice total égale N multiplié par $\dot{q}$ indice pc plus $\dot{Q}$ indice équipements».

Symboles, prononciation et sens

$\dot{Q}_{total}$ (« $\dot{Q}$ total»): puissance thermique totale à prendre en charge; N («enne»): nombre de personnes; $\dot{q}_{pc}$ (« $\dot{q}$ pc»): puissance thermique dissipée par personne; $\dot{Q}_{équipements}$ (« $\dot{Q}$ équipements»): puissance thermique dissipée par les équipements

Unités

$\dot{Q}_{total} \rightarrow$ W ou kW; nombre de personnes $\rightarrow$ personnes; puissance thermique dissipée par personne $\rightarrow$ W/personne; $\dot{Q}_{équipements} \rightarrow$ W ou kW.

Origine et statut des valeurs

La formule ne fournit pas ses propres nombres. Ceux-ci doivent être observés, sourcés, donnés par le scénario ou posés explicitement comme hypothèses pédagogiques. Le passage identifie pour source: les températures, puissances dissipées et capacités de rejet.

Pourquoi cette opération

Les termes de la relation représentent des parts compatibles du même bilan. Leur addition est donc l'opération qui reconstruit $\dot{Q}_{\text{total}}$.

Substitution et calcul

Préparer les valeurs terme par terme, conserver leurs unités visibles, puis former le cumul après les conversions nécessaires.

Saisie sur calculatrice

Sur calculatrice, utiliser des parenthèses pour les sous-expressions puis additionner les résultats intermédiaires; refaire le cumul par regroupements différents.

Estimation mentale

Pour l'ordre de grandeur, sommer quelques valeurs arrondies et vérifier que $\dot{Q}_{\text{total}}$ reste au voisinage du total attendu.

Contrôle indépendant

Contrôle indépendant – Test de cohérence: le total moins un groupe de contributions doit redonner le sous-total du groupe complémentaire.

Interprétation physique ou opérationnelle

L'ingénierie ne s'arrête pas à la valeur de « $\dot{Q}_{\text{total}} = N \times \dot{q}_{\text{pc}} + \dot{Q}_{\text{équipements}}$ »: dans «10. Croissance de population et capacité thermique», il faut encore dire ce qu'elle représente, dans quel système, et sous quelles hypothèses elle peut guider une décision.

Traduction en français courant

Sans symboles, $\dot{Q}_{\text{total}}$ représente la réunion des quantités ajoutées dans «10. Croissance de population et capacité thermique».

Variation / sensibilité

Modifier un terme de Δ décale le total de Δ , à condition que ce terme entre une seule fois dans la somme.

Limite / hypothèse

Une addition arithmétique correcte peut être physiquement fausse en cas de double comptage, d'unités incompatibles ou de périodes différentes.

On injecte maintenant l'événement suivant: la récupération de chaleur devient indisponible.

Exercices progressifs avec corrigés 1:1

Exercice 1: Sources internes de chaleur

Analysez sources internes de chaleur. Relation à tester: « $Q = m \times c_p \times \Delta T$ ». Cas dégradé: une zone de radiateur est masquée par poussière ou dépôt. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 1: Sources internes de chaleur

Données du cas

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs — Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant... Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 1: Sources internes de chaleur

Résultat

Corrigé — Exercice 1: Sources internes de chaleur

Exercice 2: Apports solaires et échanges avec le sol

Analysez apports solaires et échanges avec le sol. Relation à tester: « $P_{\text{rad}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$ ». Cas dégradé: la colonie ajoute des procédés très dissipatifs. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 2: Apports solaires et échanges avec le sol

Données du cas

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs — Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant... Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 2: Apports solaires et échanges avec le sol

Résultat

Corrigé — Exercice 2: Apports solaires et échanges avec le sol

Exercice 3: Conduction dans les structures

Analysez conduction dans les structures. Relation à tester: « $P_{\text{cond}} = k \times A \times \Delta T / L$ ». Cas dégradé: la récupération de chaleur devient indisponible. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 3: Conduction dans les structures

Données du cas

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs — Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant... Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de

Raisonnement

température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Corrigé — Exercice 3: Conduction dans les structures

Résultat

Corrigé — Exercice 3: Conduction dans les structures

Exercice 4: Boucles fluides et échangeurs

Analysez boucles fluides et échangeurs. Relation à tester: « $A_{\text{req}} = P_{\text{rejet}} / q_{\text{surface}}$ ».

Cas dégradé: une température ambiante différente réduit la marge. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 4: Boucles fluides et échangeurs

Données du cas

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs — Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant... Repère: Q : énergie thermique; m : masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 4: Boucles fluides et échangeurs

Résultat

Corrigé — Exercice 4: Boucles fluides et échangeurs

Exercice 5: Rayonnement et radiateurs

Relation à tester: « $Q = m \times c_p \times \Delta T$ ». Cas dégradé: un échangeur s'encrasse et augmente les pertes. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 5: Rayonnement et radiateurs

Données du cas

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs — Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant... Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p: capacité thermique massique; ΔT: variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 5: Rayonnement et radiateurs

Résultat

Corrigé — Exercice 5: Rayonnement et radiateurs

Exercice 6: Stockage thermique

Relation à tester: « $P_{\text{rad}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T^4 - T_{\text{env}}^4)$ ». Cas dégradé: une pompe de boucle thermique tombe en panne. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 6: Stockage thermique**Données du cas**

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs — Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant... Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p: capacité thermique massique; ΔT: variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 6: Stockage thermique

Résultat

Corrigé — Exercice 6: Stockage thermique

Exercice 7: Récupération de chaleur utile

Analysez récupération de chaleur utile. Relation à tester: « $P_{\text{cond}} = k \times A \times \Delta T / L$ ».

Cas dégradé: une zone de radiateur est masquée par poussière ou dépôt. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 7: Récupération de chaleur utile

Données du cas

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs — Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant... Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 7: Récupération de chaleur utile

Résultat

Corrigé — Exercice 7: Récupération de chaleur utile

Interprétation

Corrigé — Exercice 7: Récupération de chaleur utile

Exercice 8: Marges saisonnières

Relation à tester: « $A_{\text{req}} = P_{\text{rejet}} / q_{\text{surface}}$ ». Cas dégradé: la colonie ajoute des procédés très dissipatifs. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 8: Marges saisonnières

Données du cas

Exercice guidé — Rayonnement et radiateurs — Cas « Rayonnement et radiateurs » — Dans ce module, sources internes de chaleur sert directement à fermer le bilan thermique d'une colonie et comprendre pourquoi la chaleur à rejeter peut limiter la croissance avant... Repère: Q: énergie thermique; m: masse; c_p : capacité thermique massique; ΔT : variation de

température. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle thermique tombe en panne.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 8: Marges saisonnières

Résultat

Corrigé — Exercice 8: Marges saisonnières

Contrôle

Corrigé — Exercice 8: Marges saisonnières

Mini-projet intégrateur et dossier de référence

Comparer le bilan thermique d'une implantation à 30 puis 100 habitants. Identifier les sources de chaleur, la surface de rejet, le stockage et les marges, puis injecter la perte d'une boucle pour déterminer quelles charges doivent être réduites.

« Exercice 8: Marges saisonnières » — hypothèses, budget, marges.

« Exercice 8: Marges saisonnières » — interfaces et causes communes.

« Exercice 8: Marges saisonnières » — calculs, limites, critères.

Repères du passage: [inventaire](#)

Repères du passage: [sous-système](#) · [redondance](#)

Vérification de maîtrise du module 50

- « Exercice 8: Marges saisonnières » — unités et ordre de grandeur.
- « Exercice 8: Marges saisonnières » — cas dégradé.
- « Exercice 8: Marges saisonnières » — marge décisionnelle.
- « Exercice 8: Marges saisonnières » — mesure de contrôle.
- Termes de contrôle: [Vérification](#)

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: [flux](#)

**SOURCES DE
CHALEUR**

équipage ·
électronique ·
procédés

**BOUCLE
CALOPORTEUSE**

collecter · transporter ·
isoler

RADIATEUR

surface · température ·
émissivité

CIEL / ESPACE

puits radiatif ·
poussière

Composite pédagogique : une scène thermique distincte associée à la chaîne fonctionnelle qui transporte la chaleur des équipements jusqu'au rejet vers le ciel martien.

Réseau thermique : la panne se lit comme une course entre inertie et chaleur nette

Le thermique d'une colonie relie production de chaleur, transport par fluide, stockage temporaire, récupération utile et rejet final. Une panne n'est pas seulement une température trop haute : c'est une évolution dans le temps qu'il faut comparer aux limites des équipements et aux possibilités de délestage.

L'inertie thermique achète du temps, pas une solution permanente

Une masse thermique importante ralentit l'échauffement et permet une intervention. Mais si le rejet reste inférieur à la chaleur produite, la température continuera de monter. Le temps disponible dépend de la capacité thermique et du déséquilibre de puissance.

Récupérer la chaleur n'annule pas le besoin de rejet

Chauffer de l'eau, un habitat ou un procédé peut valoriser une partie de la chaleur, mais seulement tant qu'un besoin thermique existe. Le système doit toujours disposer d'un chemin de rejet lorsque les usages de récupération sont saturés.

La segmentation empêche un défaut local de contaminer tout le réseau

Vannes d'isolement, échangeurs intermédiaires et pompes redondantes permettent de maintenir les charges critiques pendant qu'une boucle défaillante est mise hors service.

Temps pédagogique avant dépassement d'une limite

$$\Delta t = C_{th} \times \Delta T / \dot{Q}_{net}$$

C_{th} représente la capacité thermique effective, ΔT l'écart admissible jusqu'à la limite et $\dot{Q}_{net}$ la chaleur nette non rejetée. L'équation sert à estimer un ordre de grandeur, pas à remplacer un modèle transitoire détaillé.

► Exercice — choisir entre délestage et récupération de chaleur

Pour relier cet atelier aux références déjà utilisées par le module, consulter [NASA — Moon to Mars Architecture](#) et [NASA JSC — Thermal Management Subsystems](#).

Sources primaires et passerelles

- [NASA JSC — Thermal Management Subsystems](#)
- [NASA — Moon to Mars Architecture Components](#)