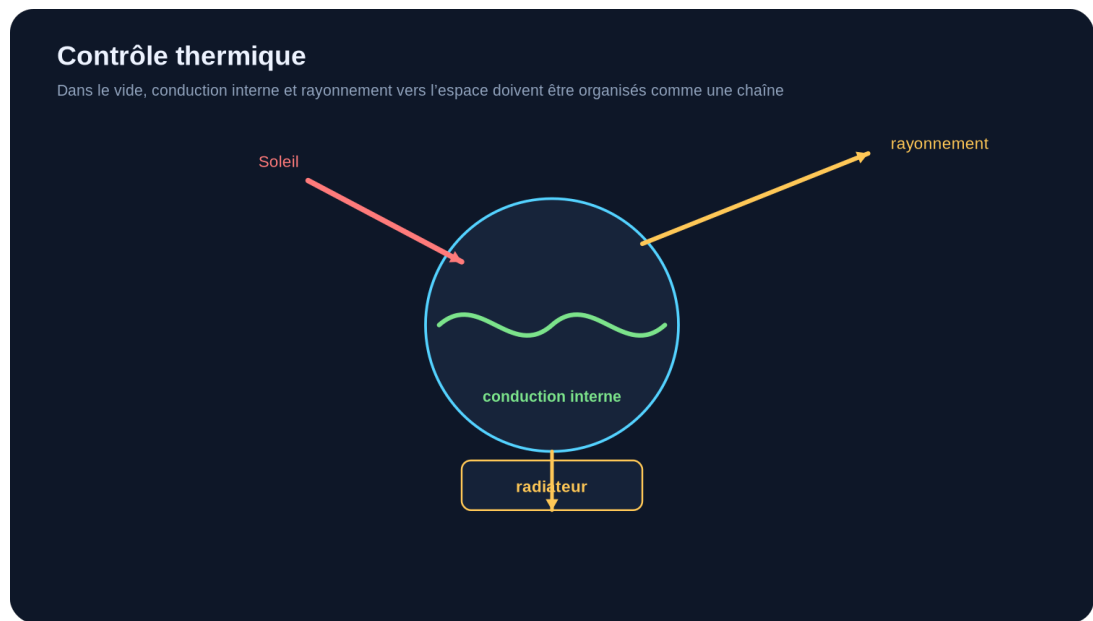


Contrôle thermique : radiateurs, isolants, chauffages et caloducs

Réponse essentielle

Contrôle thermique : radiateurs, isolants, chauffages et caloducs. La question à résoudre est la suivante : Pourquoi le froid de l'espace ne refroidit-il pas automatiquement un ordinateur ? Sur Terre, l'air transporte une partie de la chaleur par convection. Dans le vide spatial extérieur, cette voie n'existe pratiquement pas : la chaleur circule à l'intérieur par conduction et doit finalement être rayonnée vers l'espace. Un radiateur fonctionne parce qu'une surface chaude émet un rayonnement infrarouge. Cela signifie que la température d'équilibre dépend de la puissance à... La suite du cours montre comment passer de cette idée à un raisonnement contrôlable : unités explicites, hypothèses annoncées, calculs reproductibles, ordre de grandeur et limites d'interprétation. Le résultat n'est utile que si l'on peut expliquer ce qu'il mesure, d'où viennent les nombres



Transfert à travers matière ou contact.

Transfert par mouvement d'un fluide.

Avant de calculer

Grandeur:	Contrôle thermique : radiateurs, isolants, chauffages et caloducs
Contrôle:	unités + ordre de grandeur + hypothèses
Décision:	expliquer ce que le résultat autorise réellement à conclure

Contrôle thermique : radiateurs, isolants, chauffages et caloducs

- Transfert à travers matière ou contact.
- Transfert par mouvement d'un fluide.
- Émission électromagnétique liée à la température.
- Surface rejetant la chaleur par rayonnement.
- Isolation multicouche limitant les échanges radiatifs.
- Dispositif déplaçant efficacement la chaleur.

3 — Voir l'architecture avant de calculer

- Électronique, batteries et humains dissipent de la chaleur.
- Isoler ne signifie pas refroidir.
- Straps, caloducs ou fluides déplacent la chaleur.
- Le radiateur échange par rayonnement avec son environnement.

4 — Les formules, seulement lorsqu'elles répondent à une question

- Comment cela se lit : Q égale masse fois capacité thermique fois variation de température
- Estime l'énergie pour changer la température d'une masse.
- Comment cela se lit : puissance rayonnée approximative
- T doit être en kelvins ; un bilan réel inclut ce qui est reçu par la surface.

5 — Ce que les unités et les marges veulent dire

- K pour température absolue, W pour puissance thermique, J pour énergie.

6 — Trois démonstrations concrètes, calculées pas à pas

- 10 kg , $c=900\text{ J/kg/K}$, $\Delta T=20\text{ K}$.
- À 200 W idéal : $900\text{ s}=15\text{ min}$
- Entrée 500 W , sortie 460 W .

7 — Approfondissement : ce que le schéma simplifié cache

- Revêtements, MLI, straps, caloducs, radiateurs.
- Chauffages, pompes, cryoréfrigérateurs ou thermoélectriques.
- Un radiateur peut aussi absorber du Soleil ou d'une planète.
- La commande doit éviter cycles inutiles et excursions.
- Ils corréleront modèle, températures et interfaces.

Lecture active

Sections:	3 — Voir l'architecture avant de calculer ; 4 — Les formules, seulement lorsqu'elles répondent à une question
Vérification:	Une valeur n'est exploitable qu'avec son unité et sa frontière de calcul.
Exercice:	modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer

Contrôle thermique : radiateurs, isolants, chauffages et caloducs**8 — Application à un vaisseau Terre-Mars****9 — Dossier de référence : ce qu'un vrai projet doit encore prendre en compte**

Sur Terre, l'air transporte une partie de la chaleur par convection. Dans le vide spatial extérieur, cette voie n'existe pratiquement pas : la chaleur circule à l'intérieur par conduction et doit finalement être rayonnée vers l'espace. Un radiateur fonctionne parce qu'une surface chaude émet un rayonnement infrarouge. Cela signifie que la température d'équilibre dépend de la puissance à rejeter, de la surface, des propriétés optiques et de ce que la surface « voit » : espace froid, Soleil, Terre, Mars ou une autre partie chaude du véhicule.

Revêtements, isolants multicouches - MLI -, caloducs, sangles thermiques, interfaces conductrices, pare-soleil et radiateurs peuvent transporter ou limiter la chaleur sans commande active continue. Mais « passif » ne signifie pas « simple » : orientation, vieillissement des surfaces, contamination, contact thermique et géométrie ont une grande influence. Un mauvais contact entre un boîtier et son panneau peut créer un point chaud alors que la température moyenne du vaisseau paraît correcte.

Des chauffages empêchent batteries, lignes de fluide ou mécanismes de devenir trop froids. Des pompes peuvent déplacer un fluide caloporteur. Des cryoréfrigérateurs permettent des températures très basses. Chaque solution active consomme de l'énergie, dépend de capteurs et d'une commande, peut vibrer et peut tomber en panne. Le bilan thermique devient donc aussi un bilan électrique et logiciel. Pour les fonctions vitales, on cherche souvent un état passif ou dégradé survivable lorsque l'actif est indisponible.

Une surface destinée à rejeter de la chaleur peut au contraire en absorber si elle regarde le Soleil ou une planète chaude. Le facteur de vue décrit géométriquement quelle fraction du champ « voit » chaque environnement radiatif. L'attitude du véhicule et les déploiements influencent donc le thermique. Un changement de pointage pour communiquer avec la Terre peut modifier l'ensoleillement d'un radiateur. Là encore, GNC, communications et thermique sont couplés.

Les températures ne changent pas instantanément. La masse thermique d'un équipement lui permet d'absorber ou de restituer de la chaleur pendant un certain temps. Un calcul stationnaire répond à « où finira la température si ce mode dure longtemps ? ». Un calcul transitoire répond à « combien de temps avant d'atteindre une limite ? ». Pour une courte manœuvre ou une éclipse, cette deuxième question peut suffire à démontrer que le système reste sûr sans augmenter la taille du radiateur.

Un modèle thermique contient conductances, puissances dissipées, propriétés radiatives et couplages géométriques. L'essai en vide thermique place le matériel dans un environnement contrôlé pour mesurer températures et réponses. On corrèle ensuite le modèle : si les mesures divergent, on ajuste les paramètres justifiables au lieu de simplement déclarer le test réussi. Les cycles chaud-froid servent aussi à révéler certains défauts d'assemblage ou de matériaux.

Lecture active

Sections:	8 — Application à un vaisseau Terre-Mars ; 9 — Dossier de référence : ce qu'un vrai projet doit encore prendre en compte
Vérification:	Une valeur n'est exploitable qu'avec son unité et sa frontière de calcul.
Exercice:	modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer

Contrôle thermique : radiateurs, isolants, chauffages et caloducs

À la surface de Mars, le problème n’est plus exactement celui du vide profond. L’atmosphère mince autorise un peu de convection, le sol échange de la chaleur, les températures varient avec l’heure et la saison, et la poussière peut modifier les propriétés radiatives ou gêner des surfaces. Une architecture de base doit intégrer habitat, équipements extérieurs, conduites, stockage d’eau et production d’énergie. Le contrôle thermique devient alors une infrastructure distribuée et maintenable, pas seulement un radiateur fixé sur un satellite.

10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions

Croire que le vide refroidit comme de l’air froid.

Dans le vide, la chaleur ne disparaît pas

Un véhicule spatial échange de la chaleur par conduction à l’intérieur de sa structure et surtout par rayonnement avec l’environnement. Il n’existe pas de convection extérieure comme dans l’air terrestre. Un équipement électronique peut donc surchauffer dans un espace pourtant très froid si sa chaleur ne trouve pas de chemin vers un radiateur.

Les surfaces jouent deux rôles distincts : absorber le rayonnement solaire et émettre dans l’infrarouge. Leur absorptivité et leur émissivité orientent le bilan. MLI, revêtements, caloducs, sangles conductrices, chauffages et radiateurs sont combinés pour maintenir chaque équipement dans sa plage de qualification.

Le cas dimensionnant n’est pas toujours le Soleil maximum. Une longue éclipse peut provoquer le problème inverse, avec batterie et ergols trop froids. Le contrôle thermique est donc un problème transitoire : capacité calorifique, durée du mode et puissance de chauffage déterminent le temps avant franchissement d’une limite.

11 — Exercices guidés

Question : Quelle question faut-il poser avant de choisir un équipement ?

Question : Pourquoi un résultat nominal ne suffit-il pas ?

12 — À retenir

Expliquer le sujet avec des mots simples avant les symboles.

Relier au moins quatre interfaces avec les autres sous-systèmes.

Refaire les trois exemples numériques sans saut de raisonnement.

13 — Sources NASA pour approfondir

NASA - 2026 State-of-the-Art: Thermal Control

NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms

Lecture active

Sections:	10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions ; Dans le vide, la chaleur ne disparaît pas
Vérification:	NASA - 2026 State-of-the-Art: Thermal Control NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms NASA Systems Engineering Handbook
Exercice:	modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer