Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 4, Automne

À propos de ce cours

Ce cours gratuit compte 10 unités et 6 travaux pratiques. Ce sont les vrais totaux, pas un programme plus long raccourci.

Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur une page de cours qu’un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.

> Ceci est le plan d’un cours gratuit en autonomie rédigé par Saving Planets. Ce n’est pas un cours universitaire : il ne donne aucun crédit académique et aucun établissement n’y participe.
>
> Son contenu suit un cours semestriel de dernière année en transfert thermique pour ingénieurs. Il reprend les thèmes et le niveau du manuel en ligne gratuit A Heat Transfer Textbook de Lienhard et Lienhard et de MIT 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (gratuit sur MIT OpenCourseWare), que nous citons quand ils aident. Aucun de ces auteurs, établissements ou organismes ne cautionne cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque module est relié à un travail réel avec une source publique citée (le bilan énergétique de la Terre de la NASA, Parker Solar Probe et les pompes à chaleur ENERGY STAR), chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant la mise en ligne, et chaque TP dispose d’une simulation gratuite ou d’un tableur.
>
> Suivez-le dans l’ordre. Chaque unité comporte des objectifs, des notions clés, des équations, des exemples pas à pas, des exercices corrigés en détail, des erreurs fréquentes, des cartes mémoire et un quiz. Votre progression est enregistrée uniquement dans ce navigateur.

Comment ce cours aide à sauver la planète

Le climat de la Terre est un problème de transfert thermique : la lumière solaire entre, l’infrarouge thermique sort, et la convection et l’évaporation déplacent la chaleur entre les deux. La même physique détermine combien d’énergie gaspillent nos bâtiments, nos moteurs et notre électronique.

L’isolation, les pompes à chaleur et les échangeurs efficaces comptent parmi les solutions climatiques les moins chères. Chaque module se termine par une courte section sourcée. Les valeurs qui ne proviennent pas d’une source sont indiquées comme valeurs d’exemple ou de manuel.

Pour les enseignants

Vous pouvez enseigner ce cours, ou laisser un élève le faire seul. Il est gratuit. Saving Planets ne donne ni note ni crédit scolaire.

- Cette page est le cours entier : 10 unités et 6 travaux pratiques (AERO 440).
- Prévoyez 15 semaines, environ 6 à 9 heures par semaine, y compris les semaines de travaux pratiques.
- Suivez le calendrier de 15 semaines. Lisez l'unité, faites les exercices sur papier, puis ouvrez la réponse. La semaine d'un TP, faites le TP ou la version à la maison.
- Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur la page qu'un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.
- Utilisez Imprimer cette page, ou téléchargez le guide d'étude PDF. La feuille de formules est vers la fin.
- Demandez : en quoi cette unité aide-t-elle les gens et la planète ? Chaque unité a un encadré vert avec un fait sourcé.
- Copiez le modèle de guide enseignant et écrivez le nom de votre classe, le temps dont vous disposez et les questions que vous poserez. Ouvrir le modèle de guide enseignant

Avant de commencer

Prérequis

- Thermodynamique : bilans d'énergie et premier et second principes.
- Mécanique des fluides : couches limites, nombre de Reynolds et écoulement en conduite.
- Équations différentielles : EDO du premier ordre et séparation des variables.
- Calcul III : gradients et intégrales sur des surfaces et des volumes.

Comment étudier

- Dessinez le système et chaque flèche de flux thermique avant d'écrire une équation.
- Utilisez les kelvins pour le rayonnement et les différences de température pour la conduction et la convection.
- Transformez chaque problème en réseau de résistances thermiques quand c'est possible.
- Vérifiez les nombres sans dimension (Bi, Re, Pr, Nu, Ra) pour choisir la bonne corrélation.
- Comparez les réponses à l'expérience quotidienne : une maison chaude, une tasse qui refroidit, une poêle brûlante.
- Faites chaque exercice sur papier avant d'ouvrir la réponse, et refaites les quiz quelques jours plus tard.

Ce qu'il vous faut

- Un ordinateur ou une tablette pour les simulations PhET gratuites Energy Forms and Changes, Blackbody Spectrum et Greenhouse Effect.
- Un tableur (n'importe quel tableur gratuit), ou Python.
- Le manuel en ligne gratuit A Heat Transfer Textbook dans un navigateur web.
- Une calculatrice.

Programme suggéré sur 15 semaines

Environ 6 à 9 heures par semaine : lecture, exercices et, les semaines de TP, le TP.

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
1	Modes de transfert thermique et bilans d'énergie	Modes et bilans d'énergie	Lienhard AHTT
2	Conduction stationnaire et résistance thermique	Résistance thermique ; TP A	Lienhard AHTT
3	Cylindres, sphères et ailettes	Cylindres et rayon critique	Lienhard AHTT
4	Cylindres, sphères et ailettes	Ailettes ; TP B	MIT 2.51
5	Conduction transitoire	Conduction transitoire ; TP C	Lienhard AHTT
6	Convection forcée externe	Couches limites	MIT 2.51
7	Convection forcée externe	Corrélations de plaque plane ; TP D ; entraînement pour le partiel	Lienhard AHTT
8	Écoulement interne et échangeurs de chaleur	Écoulement interne	MIT 2.51
9	Écoulement interne et échangeurs de chaleur	Échangeurs de chaleur	Lienhard AHTT
10	Convection naturelle et ébullition	Convection naturelle et ébullition	Lienhard AHTT
11	Fondements du rayonnement	Fondements du rayonnement ; TP E	NASA Earth Observatory
12	Échanges radiatifs et écrans	Facteurs de forme	Lienhard AHTT
13	Échanges radiatifs et écrans	Écrans et Parker Solar Probe	NASA Parker Solar Probe
14	Pompes à chaleur, bâtiments et bilan énergétique de la Terre	Pompes à chaleur et bilan de la Terre ; TP F	ENERGY STAR

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
15	Pompes à chaleur, bâtiments et bilan énergétique de la Terre	Révision ; entraînement à l’examen final	MIT 2.51

Votre progression

Cochez les unités et les TP à mesure que vous les terminez, et faites les quiz. La progression et les scores sont enregistrés uniquement dans ce navigateur et ne nous sont jamais envoyés.

Unités

Modes de transfert thermique et bilans d’énergie

Conduction, convection et rayonnement, leurs lois de flux, et les bilans d’énergie de surface et de volume de contrôle.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Nommer les trois modes et leurs lois de flux.
- Calculer les flux de conduction, de convection et de rayonnement.
- Écrire un bilan d’énergie de surface.
- Lire le bilan énergétique de la Terre comme un bilan thermique.

Notions clés

- Le transfert thermique est de l’énergie en transit due à une différence de température ; la thermodynamique dit combien, le transfert thermique dit à quelle vitesse.
- La conduction transporte l’énergie à travers un solide ou un fluide immobile par contact moléculaire (loi de Fourier).
- La convection transporte l’énergie entre une surface et un fluide en mouvement (loi de refroidissement de Newton, avec un coefficient d’échange h).
- Le rayonnement transporte l’énergie par ondes électromagnétiques, ne nécessite aucun milieu et croît en T⁴ en kelvins (loi de Stefan–Boltzmann).
- Une surface ne stocke pas d’énergie : ce qui arrive par un mode doit repartir par les autres.

Équations clés

$$q = kA\frac{\Delta T}{L}$$

`q=kA(Δ T)/(L)`

Loi de Fourier, paroi plane

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

`q=hA(T_s-T_∞)`

Loi de refroidissement de Newton

$$q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

`q=σ A(T_s^4-T_sur^4)`

Rayonnement net vers un grand environnement

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g = \dot{E}_{st}$$

```
E_in- E_out+ E_g= E_st
```

Bilan d’énergie

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Un mur de béton de 0.2 m (k = 1.4 W/(m·K), exemple) d’aire 10 m² présente une différence de 15 K. Trouvez q.

1. q = 1.4 × 10 × 15/0.2.

Réponse : 1050 W.

Exemple 1.2 Une plaque avec ε = 0.9 à 400 K est placée dans un environnement à 300 K. Rayonnement net par m² ?

1. $0.9\sigma(400^4 - 300^4) = 0.9 \times 5.670374419 \times 10^{-8} \times 1.75 \times 10^{10}$.

Réponse : 893 W/m².

Exemple 1.3 La NASA indique qu’environ 29% de la lumière solaire incidente est réfléchie et que la moyenne mondiale est d’environ 340 W/m². Combien est absorbé ?

1. Réfléchi : 0.29 × 340 = 98.6 W/m².
2. Absorbé : 340 − 98.6.

Réponse : 241.4 W/m², ce qui correspond aux quelque 240 W/m² de la NASA.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Refaites l’exemple du mur avec k = 0.04 W/(m·K).

   30 W.

2. Convection avec h = 25 W/(m²·K), A = 2 m², ΔT = 40 K ?

   2000 W.

3. Pourquoi le rayonnement doit-il utiliser les kelvins ?

   T^4 dépend de la température absolue.

4. Pourquoi 1360/4 est-il l'ensoleillement moyen mondial ?

   L'aire d'une sphère vaut 4 fois celle de son disque d'ombre : 1360/4 = 340 W/m².

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Chaleur et température, c'est la même chose.

En réalité : La température est un état ; la chaleur est de l'énergie en transit.

Idée reçue : Le rayonnement a besoin d'air.

En réalité : Il traverse le vide.

Idée reçue : h est une propriété du matériau.

En réalité : Il dépend de l'écoulement et de la géométrie.

Cartes mémoire

Conduction

Transfert d'énergie moléculaire à travers la matière.

Convection

Transfert d'une surface vers un fluide en mouvement.

Rayonnement

Échange d'énergie électromagnétique.

h

Coefficient de convection, W/(m²·K).

k

Conductivité thermique, W/(m·K).

Bilan de surface

Entrée = sortie à une surface.

Quiz d'autocontrôle

1. q du mur en béton…

1050 W

105 W

4200 W

210 W

1050 W. 1.4 × 10 × 15/0.2.

2. Le rayonnement varie comme…

T^4 (K)

T (°C)

T^2

$\sqrt{T}$

T^4 (K). Stefan–Boltzmann.

3. La Terre absorbe environ…

240 W/m²

1360 W/m²

29 W/m²

0.8 W/m²

240 W/m². NASA.

4. Mode sans besoin de milieu…

du rayonnement

conduction

convection

ébullition

du rayonnement. Ondes.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le NASA Earth Observatory indique que l'éclairement solaire total est d'environ 1360 W/m², soit en moyenne environ 340 W/m² sur le globe ; environ 29% est réfléchi, 23% absorbé par l'atmosphère et 48% par la surface, de sorte que la Terre absorbe environ 240 W/m².

Pour une température stable, la Terre doit renvoyer vers l'espace les mêmes 240 W/m² sous forme d'infrarouge thermique, le bilan thermique auquel ce cours revient au module 10.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre · Thermodynamique

Sources : NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Ressources d'apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitre 1.
- NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance): Fiche explicative de la NASA.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Conduction stationnaire et résistance thermique

L’équation de la chaleur, la conduction stationnaire unidimensionnelle, les réseaux de résistances thermiques, les parois composites et l’isolation.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Énoncer l’équation de la chaleur et sa forme 1D stationnaire.
- Construire des réseaux de résistances en série et en parallèle.
- Calculer la perte de chaleur à travers une paroi composite.
- Quantifier les économies dues à l’isolation.

Notions clés

- L’équation de la chaleur équilibre conduction, génération et stockage ; en régime stationnaire sans génération, une paroi plane a un profil de température linéaire.
- Chaque couche agit comme une résistance électrique : R = L/(kA) pour la conduction, 1/(hA) pour la convection.
- Les résistances en série s’additionnent ; le flux thermique égale le ΔT global divisé par la résistance totale, comme un courant.
- La plus grande résistance contrôle le flux, c’est pourquoi l’isolation (faible k) compte le plus.
- La résistance de contact entre couches peut ajouter une résistance étonnante dans l’électronique et les assemblages.

Équations clés

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

```
·(k T)+ q=ρ c( T)/( t)
```

Équation de la chaleur

$$R_{cond} = \frac{L}{kA}$$

```
R_cond=L/kA
```

Résistance de conduction

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

```
R_conv=1/hA
```

Résistance de convection

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\sum R}$$

q=_∞,1-T_∞,2 R

Réseau en série

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Une paroi comprend l’air intérieur (h = 8), 0.1 m d’isolant (k = 0.04), 0.1 m de brique (k = 0.7) et l’air extérieur (h = 25), toutes valeurs d’exemple. Trouvez la résistance par m².

1. 1/8 + 0.1/0.04 + 0.1/0.7 + 1/25 = 0.125 + 2.5 + 0.1429 + 0.04.

Réponse : 2.808 m²·K/W.

Exemple 2.2 Avec 20 K entre l’intérieur et l’extérieur, trouvez la densité de flux et la perte à travers 100 m².

1. q" = 20/2.808 = 7.12 W/m².
2. q = 100 × 7.12.

Réponse : 712 W.

Exemple 2.3 Retirez l’isolant. De combien la perte augmente-t-elle ?

1. R" = 0.3079 m²·K/W.
2. q" = 20/0.3079 = 64.97 W/m².

Réponse : Environ 9.1 fois ; l’isolant réduit la perte de 89.0%.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Doublez l’isolant à 0.2 m. Nouveau q" ?

   R" = 5.308, q" = 3.77 W/m².

2. Quelle couche domine dans la paroi d’origine ?

L’isolant, 2.5 sur 2.808 m²·K/W.

3. Écrivez R pour deux couches en parallèle.

   $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$.

4. Forme de T(x) dans une paroi plane en régime stationnaire ?

   Linéaire.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les couches minces ne comptent jamais.
En réalité : Une couche mince à faible k peut dominer.

Idée reçue : Les résistances en série se multiplient.
En réalité : Elles s’additionnent.

Idée reçue : Les films d’air n’ajoutent rien.
En réalité : La résistance de convection est réelle.

Cartes mémoire

Résistance thermique

ΔT par unité de flux thermique.

Équation de la chaleur

Bilan d’énergie dans un solide.

Paroi composite

Couches en série.

Isolation

Matériau à faible k.

Résistance de contact

Résistance à une interface.

Valeur U

Coefficient global, 1/R".

Quiz d’autocontrôle

1. R" total...

2.808 m²·K/W

2.5

0.308

28.08

2.808 m²·K/W. Additionnez les couches.

2. Perte à travers 100 m²…

712 W

71 W

6497 W

2000 W

712 W. 100 × 7.12.

3. Économies dues à l’isolation…

89.0%

50%

9.1%

25%

89.0%. 1 − 0.3079/2.808.

4. Les résistances en série…

s’additionnent

se multiplient

se moyennent

s’annulent

s’additionnent. Analogie électrique.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

ENERGY STAR indique qu'une facture d'énergie typique d'un ménage américain est d'environ $1900 par an et que près de la moitié sert au chauffage et à la climatisation.

La paroi d'exemple de ce module montre pourquoi étanchéifier et isoler vient en premier : ajouter de l'isolant a réduit la perte par conduction d'environ 89%, si bien que tout système de chauffage a beaucoup moins de chaleur à remplacer.

Sur Saving Planets : Solutions · Thermodynamique

Sources : ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

Ressources d'apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitre 2.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Cylindres, sphères et ailettes

Conduction radiale, isolation de tuyaux et rayon critique, surfaces étendues, rendement d'ailette et refroidissement de l'électronique.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la résistance de conduction radiale.
- Trouver le rayon critique d'isolation.
- Calculer le paramètre d'ailette m et le rendement d'ailette.
- Estimer la chaleur évacuée par une ailette.

Notions clés

- Dans un cylindre, l'aire croît avec le rayon ; le profil de température est donc logarithmique et R = ln(r_2/r_1)/(2πkL).
- Ajouter de l'isolant à un petit fil peut augmenter la perte de chaleur jusqu'à ce que le rayon extérieur dépasse le rayon critique k/h.
- Les ailettes ajoutent de la surface là où h est faible (généralement les gaz), comme sur les cylindres de moteur, les dissipateurs et les radiateurs.
- Le paramètre d'ailette m = √(hP/(kA_c)) fixe la vitesse de décroissance de la température de l'ailette depuis sa base.
- Le rendement d'ailette compare la chaleur réelle à celle qu'on obtiendrait si toute l'ailette était à la température de base.

Équations clés

$$R_{cyl} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L}$$

```
R_cyl=((r_2/r_1))/(2π kL)
```

Résistance radiale

$$r_{cr} = \frac{k}{h}$$

```
r_cr=k/h
```

Rayon critique (cylindre)

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}}$$

`m=(hP)/(kA_c)`

Paramètre d’ailette

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c}$$

`_f=((mL_c))/(mL_c)`

Rendement d’ailette

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Isolation de tuyau de r = 0.05 à 0.1 m, k = 0.04 W/(m·K), longueur 1 m, 100 K de différence (valeurs d’exemple). Trouvez R et q.

1. R = ln 2/(2π × 0.04) = 2.758 K/W.
2. q = 100/2.758.

Réponse : 36.3 W par mètre.

Exemple 3.2 Une ailette aiguille en aluminium (k = 200) fait 5 mm de diamètre avec h = 50 W/(m²·K) et une longueur effective de 20 mm. Trouvez η.

1. m = √(4h/(kD)) = √(200/1) = 14.14 m⁻¹.
2. mL = 0.2828.
3. η = tanh(0.2828)/0.2828.

Réponse : 0.974.

Exemple 3.3 Chaleur de cette ailette avec un excès de 50 K à la base ?

1. A_f = πDL = 3.142 × 10⁻⁴ m².
2. q = ηhA_fθ = 0.974 × 50 × 3.142 × 10⁻⁴ × 50.

Réponse : 0.765 W.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Rayon critique pour k = 0.04 et h = 8 ?

5 mm.

2. Rendement d’ailette à L = 40 mm ?

   mL = 0.566, η = 0.905.

3. Pourquoi les ailettes conviennent-elles mieux à l’air qu’à l’eau ?

   Le faible h de l’air fait de la surface le facteur limitant.

4. Forme du profil dans une paroi cylindrique ?

   Logarithmique.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Plus d’isolant aide toujours.
En réalité : Pas en dessous du rayon critique.

Idée reçue : Des ailettes plus longues aident toujours beaucoup.
En réalité : Le rendement baisse avec la longueur.

Idée reçue : Les ailettes fonctionnent dans n’importe quel milieu.
En réalité : Elles sont rentables là où h est faible.

Cartes mémoire

Rayon critique

k/h pour les cylindres.

Fin

Surface étendue.

Rendement d’ailette

Chaleur réelle sur chaleur idéale de l’ailette.

m

Paramètre de décroissance de l’ailette.

Dissipateur

Ensemble d’ailettes.

Profil logarithmique

Température stationnaire d’un cylindre.

Quiz d’autocontrôle

1. R du tuyau…

2.758 K/W

0.276

27.6

1.0

2.758 K/W. ln 2/(2π × 0.04).

2. Rayon critique…

5 mm

50 mm

0.5 mm

200 mm

5 mm. k/h.

3. Rendement d’ailette…

0.974

0.5

0.283

1.2

0.974. tanh(mL)/mL.

4. Chaleur de l’ailette…

0.765 W

7.65 W

76.5 W

0.0765 W

0.765 W. ηhAθ.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La chaleur circule dans la paroi d'un tuyau comme dans la croûte d'une planète : du chaud vers le froid, à travers des résistances en série.

Isoler les tuyaux d'eau chaude et de vapeur est l'une des mesures d'efficacité les plus simples dans les bâtiments et l'industrie. Toutes les valeurs de ce module sont des valeurs de manuel d'exemple.

Sur Saving Planets : Solutions · Circuits

Sources : J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitre 4.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Conduction transitoire

Le nombre de Biot, le modèle à capacité localisée, les constantes de temps, et quand les gradients spatiaux de température comptent.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le nombre de Biot.
- Utiliser le modèle localisé quand Bi < 0.1.
- Calculer une constante de temps thermique.
- Trouver le temps pour atteindre une température cible.

Notions clés

- Le nombre de Biot compare la résistance de conduction interne à la résistance de convection externe.
- Quand Bi < 0.1, le corps est presque uniforme en température et le modèle localisé fonctionne.
- Dans le modèle localisé, l'excès de température décroît exponentiellement avec la constante de temps τ = ρcV/(hA).
- Pour des Bi plus grands, utilisez des solutions en série à un terme ou des abaques (Heisler) ou une méthode numérique.
- Une forte capacité thermique ralentit la réponse : les océans et les murs épais sont des volants thermiques.

Équations clés

$$Bi = \frac{hL_c}{k},\ L_c = V/A$$

`Bi=(hL_c)/(k),\ L_c=V/A`

Nombre de Biot

$$\tau = \frac{\rho c V}{hA}$$

`τ=(ρ cV)/(hA)`

Constante de temps

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-t/\tau}$$

`(T-T_∞)/(T_i-T_∞)=e^-t/τ`

Réponse localisée

$$t = \tau \ln \frac{\theta_i}{\theta}$$

t=τ(θ_i)/(θ)

Temps jusqu’à une cible

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Une sphère d’aluminium de 10 mm (k = 237, ρ = 2700, c = 900) refroidit dans l’air avec h = 50. Trouvez Bi.

1. L_c = D/6 = 1.667 × 10⁻³ m.
2. Bi = 50 × 1.667 × 10⁻³/237.

Réponse : 3.52 × 10⁻⁴, donc le modèle localisé fonctionne.

Exemple 4.2 Trouvez τ pour cette sphère.

1. τ = 2700 × 900 × 1.667 × 10⁻³/50.

Réponse : 81 s.

Exemple 4.3 Combien de temps pour refroidir de 300 °C à 50 °C dans de l’air à 20 °C ?

1. θ_i = 280 K, θ = 30 K.
2. t = 81 ln(280/30) = 81 × 2.234.

Réponse : 181 s.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Fraction de l’excès restant après un τ ?

   e⁻¹ = 0.368.

2. Temps pour diviser l’excès par deux ?

τ ln 2 = 56.1 s.

3. Bi = 0.5. Le modèle localisé est-il valable ?

   Non ; utilisez des solutions en série ou numériques.

4. Doublez h. Que devient τ ?

   Il est divisé par deux, à 40.5 s.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Bi est le nombre de Nusselt.
En réalité : Bi utilise le k du solide ; Nu celui du fluide.

Idée reçue : Le modèle localisé vaut pour toute taille.
En réalité : Seulement quand Bi < 0.1.

Idée reçue : Le refroidissement est linéaire dans le temps.
En réalité : Il est exponentiel.

Cartes mémoire

Nombre de Biot

Résistance interne sur externe.

Capacité localisée

Modèle à température uniforme.

Constante de temps

ρcV/(hA).

Abaque de Heisler

Abaque de solution transitoire à un terme.

Masse thermique

Capacité thermique qui ralentit les variations.

L_c

Longueur caractéristique V/A.

Quiz d’autocontrôle

1. Constante de temps…

81 s

8.1 s

810 s

181 s

81 s. ρcV/(hA).

2. Temps de refroidissement jusqu'à 50 °C…

181 s

81 s

56 s

300 s

181 s. τ ln(280/30).

3. Modèle localisé valable quand…

Bi < 0.1

Bi > 1

Re > 5×10^5

Nu < 1

Bi < 0.1. Corps uniforme.

4. Après un τ…

36.8% restant

50% restant

0% restant

63.2% restant

36.8% restant. e^{-1}.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'Earth Observatory de la NASA note que la surface de la Terre est en moyenne d'environ 15 °C, plus de 30 °C de plus qu'elle ne le serait sans atmosphère.

Dans le langage de ce module, une grande capacité thermique signifie une longue constante de temps ; la capacité thermique des océans donne au climat terrestre une réponse lente (une idée de manuel, pas un chiffre de la NASA).

Sur Saving Planets : Océans · Observation de la Terre

Sources : NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Ressources d'apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitre 5.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Convection forcée externe

Couches limites, nombres de Reynolds, Prandtl et Nusselt, corrélations de plaque plane et écoulement autour de cylindres.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer Re, Pr et Nu.
- Utiliser la corrélation laminaire de plaque plane.
- Trouver h et le flux de chaleur.
- Vérifier la transition à Re ≈ 5 × 10⁵.

Notions clés

- Des couches limites de vitesse et thermique se forment sur une surface ; la chaleur traverse la fine couche de fluide lent par conduction.
- Le nombre de Nusselt Nu = hL/k est le coefficient de transfert de chaleur adimensionnel.
- Le nombre de Prandtl compare les diffusivités de quantité de mouvement et thermique (environ 0.7 pour l’air, environ 7 pour l’eau près de la température ambiante, valeurs de manuel).
- Sur une plaque plane, l’écoulement est généralement laminaire sous Re ≈ 5 × 10⁵ ; la turbulence augmente h.
- Les corrélations sont des ajustements à des expériences ; utilisez-les dans leurs plages indiquées.

Équations clés

$$Re_L = \frac{VL}{\nu}$$

`Re_L=(VL)/(ν)`

Nombre de Reynolds

$$Nu_L = \frac{\bar{h}L}{k}$$

`Nu_L=( hL)/(k)`

Nombre de Nusselt

$$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$$

`_L=0.664Re_L^1/2Pr^1/3`

Plaque plane laminaire (moyenne)

$$\overline{Nu}_L = 0.037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}$$

_L=0.037Re_L^4/5Pr^1/3

Plaque plane turbulente (moyenne)

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 De l'air (ν = 1.5 × 10⁻⁵, k = 0.026, Pr = 0.71) s'écoule à 5 m/s sur une plaque de 0.5 m. Trouvez Re.

1. Re = 5 × 0.5/1.5 × 10⁻⁵.

Réponse : 166667, laminaire.

Exemple 5.2 Trouvez le Nu moyen et h.

1. Nu = 0.664 × 166,667^½ × 0.71^⅓ = 0.664 × 408.2 × 0.892 = 241.8.
2. h = 241.8 × 0.026/0.5.

Réponse : 12.6 W/(m²·K).

Exemple 5.3 Chaleur d'une plaque de 0.5 × 1 m à 30 K au-dessus de l'air ?

1. q = 12.58 × 0.5 × 30.

Réponse : 189 W.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Recalculez h à 10 m/s.

   Re = 333333, h = 17.8 W/(m²·K) (√2 fois plus).

2. Re à 1 m/s ?

   33,333.

3. Nommez le h adimensionnel.

Nombre de Nusselt.

4. Pourquoi la turbulence augmente-t-elle h ?

   Le mélange amincit la couche lente près de la paroi.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Nu utilise le k du solide.

En réalité : Il utilise le k du fluide.

Idée reçue : Une seule corrélation convient à tous les écoulements.

En réalité : Vérifiez la plage et la géométrie.

Idée reçue : h est constant le long d'une plaque.

En réalité : Le h local diminue à mesure que la couche grossit.

Cartes mémoire

Nombre de Reynolds

Inertie sur viscosité.

Nombre de Prandtl

ν/α.

Nombre de Nusselt

hL/k.

Couche limite

Fine région près de la paroi.

Corrélation

Ajustement à des expériences.

Transition

Du laminaire au turbulent.

Quiz d'autocontrôle

1. Re à 5 m/s…

166,667

16,667

1.67×10^6

6000

166,667. VL/ν.

2. h moyen…

12.6 W/(m²·K)

126

1.26

242

12.6 W/(m²·K). Nu k/L.

3. Flux de chaleur…

189 W

18.9 W

377 W

63 W

189 W. hAΔT.

4. Transition vers…

5×10^5

2300

10^3

10^9

5×10^5. Plaque plane.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L’Earth Observatory de la NASA indique que la convection transporte environ 5% de l’énergie solaire incidente de la surface vers l’atmosphère, tandis que l’évaporation en transporte environ 25%.

La vitesse du vent fixe h au-dessus des océans et des terres, tout comme la vitesse fixe h sur la plaque de ce module ; c’est pourquoi les vents déterminent la vitesse à laquelle la surface évacue sa chaleur.

Sur Saving Planets : Mécanique des fluides · Océans

Sources : NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Ressources d’apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitres 6–7.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Écoulement interne et échangeurs de chaleur

Convection en conduite, température moyenne, corrélation de Dittus–Boelter, types d’échangeurs de chaleur, DTLM et efficacité–NUT.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser les corrélations laminaires et turbulentes en conduite.
- Calculer une différence de température logarithmique moyenne.
- Dimensionner un échangeur avec UA et la DTLM.
- Utiliser la méthode efficacité–NUT.

Notions clés

- Dans une conduite, la température moyenne de mélange varie le long de la longueur quand la chaleur entre ou sort.
- Un écoulement laminaire pleinement développé à température de paroi constante a Nu = 3.66 ; l’écoulement turbulent utilise Dittus–Boelter (corrélations de manuel).
- Les échangeurs à contre-courant battent les échangeurs à co-courant car l’écart de température reste plus régulier.
- La méthode DTLM convient au dimensionnement quand les quatre températures sont connues.
- La méthode ε-NUT convient au calcul de performance quand les températures de sortie sont inconnues.

Équations clés

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{0.4}$$

```
Nu_D=0.023Re_D^4/5Pr^0.4
```

Dittus–Boelter (chauffage)

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

```
Δ T_lm=(Δ T_1-Δ T_2)/((Δ T_1/Δ T_2))
```

Différence de température logarithmique moyenne

$$q = U A \Delta T_{lm}$$

```
q=UAΔ T_lm
```

Flux de chaleur de l’échangeur

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU} \ (C_r = 0)$$

=1-e^-NTU\ (C_r=0)

Efficacité, condenseur ou évaporateur

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 De l’eau (k = 0.6, Pr = 7, valeurs de manuel) s’écoule à Re = 20000 dans un tube de 20 mm. Trouvez h.

1. Nu = 0.023 × 20,000^0.8 × 7^0.4 = 138.2.
2. h = 138.2 × 0.6/0.02.

Réponse : Environ 4150 W/(m²·K).

Exemple 6.2 Contre-courant : chaud 90 → 50 °C, froid 20 → 40 °C. Trouvez la DTLM.

1. $\Delta T_1 = 90 - 40 = 50$ K; $\Delta T_2 = 50 - 20 = 30$ K.
2. LMTD = 20/ln(50/30).

Réponse : 39.15 K.

Exemple 6.3 Avec U = 500 W/(m²·K) et A = 2 m², trouvez q.

1. q = 500 × 2 × 39.15.

Réponse : 39.2 kW.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. ε pour NUT = 2 quand un fluide se condense (C_r = 0) ?

   $1 - e^{-2} = 0.865$.

2. Nu laminaire pour une température de paroi constante ?

   3.66.

3. Pourquoi préférer le contre-courant ?

   ΔT plus régulier, plus de chaleur par surface.

4. Nu de Dittus–Boelter pour Pr = 0.7, Re = 20000 ?

   55.0.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Utiliser le ΔT moyen arithmétique.
En réalité : Utilisez la moyenne logarithmique.

Idée reçue : ε peut dépasser 1.
En réalité : Impossible.

Idée reçue : Les corrélations laminaires valent pour l'écoulement turbulent.
En réalité : Vérifiez d'abord Re.

Cartes mémoire

LMTD

ΔT logarithmique moyen.

NTU

UA/C_min.

Efficacité

Chaleur réelle sur chaleur maximale.

Contre-courant

Fluides en sens opposés.

Encrassement

Dépôts qui ajoutent une résistance.

Dittus–Boelter

Corrélation turbulente en conduite.

Quiz d'autocontrôle

1. LMTD...

39.15 K

40 K

30 K

50 K

39.15 K. 20/ln(5/3).

2. q de l’échangeur…

39.2 kW

3.92 kW

20 kW

78 kW

39.2 kW. UA LMTD.

3. ε à NUT 2…

0.865

0.5

0.98

2

0.865. 1 − e^{-2}.

4. h de l’eau…

≈ 4150 W/(m²·K)

≈ 41

≈ 415,000

≈ 1.4

≈ 4150 W/(m²·K). Nu k/D.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

ENERGY STAR explique qu'une pompe à chaleur air-air déplace la chaleur entre l'air intérieur et extérieur au lieu de la produire à partir d'un combustible, à l'aide d'échangeurs (batteries) des deux côtés.

De meilleurs échangeurs nécessitent un écart de température plus faible pour transférer la même chaleur, l'une des raisons pour lesquelles les pompes à chaleur modernes fournissent plus de chaleur par unité d'électricité.

Sur Saving Planets : Solutions · Thermodynamique

Sources : ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

Ressources d'apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitres 3 et 7.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Convection naturelle et ébullition

Écoulement mû par la flottabilité, nombres de Grashof et de Rayleigh, corrélations de plaque verticale, et une introduction à l’ébullition et à la condensation.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le nombre de Rayleigh.
- Utiliser une corrélation de plaque verticale.
- Comparer h naturel et forcé.
- Décrire la courbe d’ébullition.

Notions clés

- Le fluide chaud est plus léger et monte ; c’est la flottabilité, pas un ventilateur, qui entraîne l’écoulement.
- Le nombre de Rayleigh Ra = gβΔTL³/(να) joue le rôle que Re joue en convection forcée.
- Sur une plaque verticale, l’écoulement est laminaire sous environ Ra = 10⁹ (valeur de manuel).
- Le h de convection naturelle dans l’air n’est que de quelques W/(m²·K), donc le rayonnement est souvent comparable.
- L’ébullition et la condensation transfèrent beaucoup de chaleur à faible ΔT grâce à la chaleur latente.

Équations clés

$$Ra_L = \frac{g\beta \Delta T L^3}{\nu \alpha}$$

Ra_L=(gβΔ TL^3)/(να)

Nombre de Rayleigh

$$\overline{Nu}_L = 0.59 Ra_L^{1/4}$$

_L=0.59Ra_L^1/4

Plaque verticale laminaire

$$\beta = 1/T$$

Coefficient de dilatation d’un gaz parfait

$$Gr = Ra/Pr$$

`Gr=Ra/Pr`

Nombre de Grashof

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Une plaque verticale de 0.3 m est 30 K au-dessus de l’air ($\beta = 1/300\ K^{-1}$, $\nu = 1.6 \times 10^{-5}$, $\alpha = 2.2 \times 10^{-5}$, valeurs d’exemple). Trouvez Ra.

1. $Ra = 9.80665 \times (1/300) \times 30 \times 0.3^3/(1.6 \times 10^{-5} \times 2.2 \times 10^{-5})$.

Réponse : 7.52×10^7, laminaire.

Exemple 7.2 Trouvez Nu et h avec k = 0.026.

1. $Nu = 0.59 \times (7.52 \times 10^7)^{1/4} = 54.9$.
2. $h = 54.9 \times 0.026/0.3$.

Réponse : 4.76 W/(m²·K).

Exemple 7.3 Chaleur d’une plaque de 0.3 × 1 m ?

1. $q = 4.76 \times 0.3 \times 30$.

Réponse : 42.9 W.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Comparez avec le h forcé de 12.6 du module 5.

   Le forcé est environ 2.64 fois plus élevé.

2. Limite laminaire sur Ra ?

   Environ 10^9.

3. Pourquoi l’ébullition est-elle si efficace ?

La chaleur latente transfère l’énergie à faible ΔT.

4. β pour un gaz parfait à 300 K ?

   1/300 K^{-1} = 3.33 × 10^{-3}.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La convection naturelle est négligeable.

En réalité : Elle égale souvent le rayonnement.

Idée reçue : Ra utilise la vitesse.

En réalité : Il utilise la flottabilité.

Idée reçue : Le h d’ébullition est faible.

En réalité : Il est parmi les plus élevés.

Cartes mémoire

Nombre de Rayleigh

Intensité de la flottabilité.

Nombre de Grashof

Flottabilité sur viscosité.

β

Coefficient de dilatation.

Courbe d’ébullition

Flux de chaleur en fonction de la surchauffe de paroi.

Flux de chaleur critique

Flux maximal d’ébullition nucléée.

Condensation

Vapeur en liquide sur une paroi froide.

Quiz d’autocontrôle

1. Ra…

7.52 × 10^{7}

7.52 × 10^{9}

752

5×10^5

7.52×10^7. $g\beta\Delta TL^3/(\nu\alpha)$.

2. h…

4.76 W/(m²·K)

47.6

0.476

12.6

4.76 W/(m²·K). Nu k/L.

3. Chaleur…

42.9 W

429 W

4.29 W

189 W

42.9 W. hAΔT.

4. Moteur de la convection naturelle…

la flottabilité

une pompe

du rayonnement

perte de charge

la flottabilité. Différence de masse volumique.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'Earth Observatory de la NASA indique que l'évaporation retire environ 25% de l'énergie solaire incidente de la surface et la convection environ 5% ; la chaleur latente est libérée quand la vapeur d'eau se condense en nuages.

Avec un ensoleillement moyen de 340 W/m², ces parts valent environ 85 et 17 W/m², les mêmes processus de changement de phase et de flottabilité que traite ce module.

Sur Saving Planets : Océans · Observation de la Terre

Sources : NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Ressources d'apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitres 8–9.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Fondements du rayonnement

Corps noirs, loi de Planck, loi de Wien, loi de Stefan–Boltzmann, émissivité, absorptivité et loi de Kirchhoff.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Trouver la longueur d’onde du pic d’un corps noir.
- Calculer la puissance émissive.
- Utiliser l’émissivité et l’absorptivité.
- Trouver la température effective d’une planète.

Notions clés

- Un corps noir absorbe tout le rayonnement et émet le maximum possible à chaque température et longueur d’onde.
- Loi de Wien : la longueur d’onde du pic est inversement proportionnelle à la température absolue.
- La puissance émissive totale croît comme σT^4 : doubler la température multiplie l’émission par 16.
- Les surfaces réelles émettent une fraction ε de la puissance du corps noir ; pour une surface grise $\alpha = \varepsilon$ (Kirchhoff).
- Le rayonnement solaire est de courte longueur d’onde ; l’émission de la Terre est un infrarouge de grande longueur d’onde, d’où l’importance de gaz comme le CO_2 et la vapeur d’eau.

Équations clés

$$\lambda_{max} T = 2898\ \mu m \cdot K$$

_maxT=2898\ μ m· K

Loi de déplacement de Wien

$$E_b = \sigma T^4$$

E_b=σ T^4

Stefan–Boltzmann

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

E=σ T^4

Surface réelle

$$T_e = \left(\frac{\bar{S}(1-a)}{\sigma} \right)^{1/4}$$

`T_e=(( S(1-a))/(σ))^1/4`

Température effective

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 La NASA donne au Soleil environ 5800 K. Trouvez sa longueur d’onde de pic.

1. 2898/5800.

Réponse : 0.500 µm, lumière visible.

Exemple 8.2 La Terre absorbe environ 240 W/m² (NASA). Trouvez sa température effective.

1. T = (240/5.670374419 × 10⁻⁸)^¼.

Réponse : 255.1 K, environ −18 °C (la NASA arrondit à environ −20 °C).

Exemple 8.3 Émission de corps noir d’une surface à 288 K ?

1. σ × 288⁴.

Réponse : 390 W/m².

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Longueur d’onde du pic à 288 K ?

   10.06 µm, infrarouge thermique.

2. Rapport d’émission quand T double ?

   2⁴ = 16.

3. Pic pour un filament de lampe à 3000 K ?

   0.966 µm, proche infrarouge.

4. Surface grise avec $\varepsilon = 0.8$: α ?

   0.8.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Chaud veut dire visible.

En réalité : Les objets à température ambiante brillent dans l'infrarouge.

Idée reçue : Utiliser des °C dans σT^4.

En réalité : Utilisez des kelvins.

Idée reçue : Brillant veut dire froid.

En réalité : Un ε faible signifie qu'il émet et absorbe peu.

Cartes mémoire

Corps noir

Absorbeur et émetteur parfait.

Loi de Wien

$\lambda_{max} T = 2898\ \mu m \cdot K$.

Émissivité

Émission relative au corps noir.

Loi de Kirchhoff

$\alpha = \varepsilon$ pour les surfaces grises.

Loi de Planck

Émission spectrale du corps noir.

Température effective

T équivalente de corps noir.

Quiz d'autocontrôle

1. Pic du Soleil…

0.500 µm

10 µm

5 µm

0.05 µm

0.500 µm. 2898/5800.

2. Température effective de la Terre…

255 K

288 K

300 K

5800 K

255 K. (240/σ)^¼.

3. Doubler T, l'émission…

×16

×2

×4

×8

×16. T^4.

4. Corps noir à 288 K…

390 W/m²

240 W/m²

1360 W/m²

39 W/m²

390 W/m². σT^4.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L’Earth Observatory de la NASA indique que la surface du Soleil est à environ 5800 K, que la température radiative effective de la Terre est d’environ −20 °C, et que doubler la température d’un objet multiplie son énergie rayonnée par 16.

La NASA note aussi que la vapeur d’eau laisse s’échapper la majeure partie de l’infrarouge entre 8 et 14 µm, tandis que le dioxyde de carbone absorbe au-delà d’environ 12–13 µm, près du bord de cette fenêtre.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre · Solutions

Sources : NASA Earth Observatory: Climate and Earth’s Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

Ressources d’apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitre 10.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): Simulation gratuite.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Échanges radiatifs et écrans

Facteurs de forme, réciprocité, réseaux de surfaces grises, plaques parallèles, écrans de rayonnement et protection thermique dans l’espace.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser la réciprocité des facteurs de forme.
- Calculer l’échange net entre plaques parallèles.
- Montrer comment un écran réduit le flux de chaleur.
- Estimer le rayonnement d’un écran chaud.

Notions clés

- Le facteur de forme F_{12} est la fraction du rayonnement quittant la surface 1 qui atteint la surface 2.
- Réciprocité : $A_1F_{12} = A_2F_{21}$; sommation : les facteurs de forme d’une surface ont pour somme 1.
- Les surfaces grises échangent de la chaleur via des résistances de surface $(1 - \varepsilon)/(\varepsilon A)$ et des résistances d’espace $1/(A_1F_{12})$.
- Un écran mince à faible ε entre deux plaques ajoute des résistances et réduit fortement l’échange ; l’isolation multicouche en empile beaucoup.
- Un bouclier thermique face au Soleil chauffe, rerayonne et protège ce qui se trouve dans son ombre.

Équations clés

$$A_1F_{12} = A_2F_{21}$$

```
A_1F_12=A_2F_21
```

Réciprocité

$$q'' = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

```
q^=(σ(T_1^4-T_2^4))/(1/_1+1/_2-1)
```

Armatures parallèles

$$R_{surf} = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon A}$$

```
R_surf=(1-)/( A)
```

Résistance de surface

$$R_{space} = \frac{1}{A_1 F_{12}}$$

R_space=1A_1F_12

Résistance d’espace

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Grandes plaques parallèles à 400 K et 300 K, toutes deux ε = 0.8. Flux net ?

1. Dénominateur : 1.25 + 1.25 − 1 = 1.5.
2. q" = σ(400⁴ − 300⁴)/1.5.

Réponse : 662 W/m².

Exemple 9.2 Insérez un écran avec ε = 0.05 des deux côtés.

1. Résistance : 2 × (1.25 + 20 − 1) = 40.5.
2. q" = σ × 1.75 × 10¹⁰/40.5.

Réponse : 24.5 W/m², 27 fois moins.

Exemple 9.3 Une petite sphère (A_1 = 1 m²) est placée dans une coque d’aire 4 m². Trouvez F_{21}.

1. F_{12} = 1.
2. $F_{21} = A_1F_{12}/A_2$.

Réponse : 0.25.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Flux de corps noir à la limite de 1377 °C du bouclier de Parker ?

   σ × 1650.15⁴ = 4.20 × 10⁵ W/m².

2. Pourquoi un seul écran avec ε = 0.05 marche-t-il si bien ?

   Ses deux résistances de surface ajoutent environ 39.

3. Somme des facteurs de forme d’une surface d’enceinte ?

    1.

4. Qu’est-ce que la MLI ?

    De nombreux écrans minces à faible ε empilés.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les facteurs de forme sont symétriques.
En réalité : Seulement $A_1F_{12} = A_2F_{21}$.

Idée reçue : Les écrans doivent être épais.
En réalité : C’est le faible ε qui compte, pas l’épaisseur.

Idée reçue : Les surfaces noires font de bons écrans.
En réalité : Les écrans exigent un faible ε.

Cartes mémoire

Facteur de forme

Fraction du rayonnement interceptée.

Réciprocité

$A_1F_{12} = A_2F_{21}$.

Radiosité

Tout le rayonnement quittant une surface.

Écran de rayonnement

Barrière à faible ε.

MLI

Isolation multicouche.

Surface grise

ε indépendant de la longueur d’onde.

Quiz d’autocontrôle

1. Flux entre plaques…

662 W/m²

993 W/m²

24.5 W/m²

1000 W/m²

662 W/m². σΔT⁴/1.5.

2. Avec écran...

24.5 W/m²

331 W/m²

66 W/m²

2.45 W/m²

24.5 W/m². ÷ 40.5.

3. F_{21}...

0.25

1

4

0.5

0.25. Réciprocité.

4. Les bons écrans ont...

un ε faible

un ε élevé

un k élevé

un h élevé

un ε faible. Émetteurs faibles.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que Parker Solar Probe, lancée le 12 août 2018, est protégée par un bouclier en composite carbone de 4.5 pouces (11.43 cm) qui résiste à près de 2500 °F (1377 °C) lorsque la sonde passe à environ 3.9 millions de miles (6.2 millions de km) du Soleil.

En 2021, Parker est devenue le premier engin spatial à traverser la couronne solaire ; son bouclier garde les instruments à l'ombre, la même idée que l'écran de rayonnement de ce module.

Sur Saving Planets : Conception d'engins spatiaux · Observation de la Terre

Sources : NASA Science: Parker Solar Probe (https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel gratuit, chapitre 10.
- NASA Science: Parker Solar Probe (https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/): Page de mission de la NASA.

☐ **J'ai terminé cette unité**

UNITÉ 10 · SEMAINES 14–15

Pompes à chaleur, bâtiments et bilan énergétique de la Terre

COP des pompes à chaleur, limites de Carnot, déperditions d'un bâtiment entier et déséquilibre énergétique planétaire mesuré depuis l'espace.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le COP d'une pompe à chaleur et sa limite de Carnot.
- Dimensionner l'électricité pour une charge de chauffage.
- Convertir un déséquilibre de flux en puissance totale.
- Relier les trois modes dans un même système.

Notions clés

- Une pompe à chaleur déplace la chaleur du froid vers le chaud à l'aide d'un travail ; son COP de chauffage est la chaleur fournie divisée par le travail.
- Le COP de Carnot, T_h/(T_h − T_c), est une limite supérieure qui baisse quand la température extérieure chute.
- Les déperditions d'un bâtiment valent son UA fois l'écart intérieur–extérieur ; l'isolation réduit UA avant d'acheter un équipement.
- Le déséquilibre énergétique de la Terre est une petite différence entre deux grands flux, mesurée par des satellites comme les instruments CERES de la NASA.
- Chaque système de ce cours combine conduction, convection et rayonnement dans un réseau de résistances.

Équations clés

$$COP_h = \frac{Q_h}{W}$$

```
COP_h=(Q_h)/(W)
```

COP de chauffage

$$COP_{Carnot} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

```
COP_Carnot=(T_h)/(T_h-T_c)
```

Limite de Carnot

$$Q = UA\Delta T$$

Q=UAΔ T

Déperditions du bâtiment

$$P = \Delta F \cdot A_E$$

P=Δ F· A_E

Puissance du déséquilibre planétaire

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 ENERGY STAR indique qu'une pompe à chaleur peut fournir jusqu'à trois fois plus de chaleur que l'électricité qu'elle consomme. Électricité pour 9 kW de chaleur ?

1. W = 9/3.

Réponse : 3 kW.

Exemple 10.2 COP de chauffage de Carnot avec une fourniture à 35 °C (308 K) et 0 °C (273 K) à l'extérieur ?

1. 308/(308 − 273).

Réponse : 8.8 ; les appareils réels atteignent environ un tiers de cette valeur.

Exemple 10.3 La NASA indique un déséquilibre d'un peu plus de 0.8 W/m². Avec une surface terrestre de 5.1 × 10¹⁴ m² (valeur de manuel), puissance totale ?

1. 0.8 × 5.1 × 10¹⁴.

Réponse : Environ 4.1 × 10¹⁴ W.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. La moitié d'une facture énergétique annuelle de $1900 ?

Environ $950 pour le chauffage et la climatisation.

2. COP de Carnot à −10 °C (263 K) dehors, fourniture à 308 K ?

   6.84.

3. Pourquoi isoler avant d'acheter une pompe à chaleur ?

   Un UA plus faible signifie un appareil plus petit et moins cher.

4. Que mesure CERES ?

   L'énergie radiative de la Terre depuis l'espace.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un COP supérieur à 1 viole la conservation de l'énergie.
En réalité : La chaleur est déplacée, pas créée.

Idée reçue : Baisser fortement les pompes à chaleur la nuit.
En réalité : ENERGY STAR conseille un réglage stable.

Idée reçue : 0.8 W/m² est négligeable.
En réalité : Sur toute la Terre, cela fait environ 4×10^{14} W.

Cartes mémoire

COP

Chaleur fournie par unité de travail.

COP de Carnot

Limite idéale.

UA

Conductance globale.

Déséquilibre énergétique

Absorbé moins émis.

CERES

Instruments de bilan radiatif de la NASA.

Pompe à chaleur

Déplace la chaleur avec du travail.

Quiz d'autocontrôle

1. Électricité pour 9 kW avec un COP de 3…

3 kW

27 kW

9 kW

1 kW

3 kW. 9/3.

2. COP de Carnot…

8.8

3

1.13

35

8.8. 308/35.

3. Puissance du déséquilibre…

≈ 4.1×10^{14} W

≈ 4×10^{9} W

≈ 0.8 W

≈ 10^{20} W

≈ 4.1×10^{14} W. $0.8 \times 5.1 \times 10^{14}$.

4. Réduire UA en…

isolant

augmentant le COP

ajoutant des ailettes

peignant en noir

isolant. Résistance.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

ENERGY STAR indique qu'une pompe à chaleur air-air peut fournir jusqu'à trois fois plus d'énergie thermique que l'énergie électrique qu'elle consomme, car elle déplace la chaleur au lieu de la produire.

L'Earth Observatory de la NASA indique que la Terre absorbe un peu plus de 0.8 W/m² de plus qu'elle n'émet ; les instruments CERES de la NASA mesurent le bilan radiatif depuis l'orbite.

Sur Saving Planets : Solutions · Observation de la Terre

Sources : ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps) · NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance) · NASA Langley: CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) (https://ceres.larc.nasa.gov/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps): Guide ENERGY STAR.
- NASA Langley: CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) (https://ceres.larc.nasa.gov/): NASA CERES.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

Ces exercices sont dans chaque unité. Faites-les sur papier, puis ouvrez la réponse.

1. Modes de transfert thermique et bilans d'énergie
   4 exercices
2. Conduction stationnaire et résistance thermique
   4 exercices
3. Cylindres, sphères et ailettes
   4 exercices
4. Conduction transitoire
   4 exercices
5. Convection forcée externe
   4 exercices
6. Écoulement interne et échangeurs de chaleur
   4 exercices

7. Convection naturelle et ébullition
   4 exercices
8. Fondements du rayonnement
   4 exercices
9. Échanges radiatifs et écrans
   4 exercices
10. Pompes à chaleur, bâtiments et bilan énergétique de la Terre
    4 exercices

Le laboratoire (Heat transfer lab)

Le labo est la partie pratique du cours. Ici, il est gratuit et sert uniquement à s'entraîner, sans crédits.

Chaque TP se fait dans une simulation gratuite ou un tableur, il n'y a donc aucun risque de brûlure ni électrique. Ne chauffez, ne faites bouillir et n'allumez rien pour ce cours. Faites des pauses d'écran, tenez-vous bien droit et gardez les câbles hors des passages.

Référence de sécurité : OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

TP A : Flux de chaleur et calculateur d’isolation murale

SEMAINE 2

Objectif : Observez le flux de chaleur entre objets dans PhET Energy Forms and Changes, puis calculez le flux à travers un mur pour plusieurs épaisseurs d’isolant.

$$q'' = \Delta T / R''$$

q^=Δ T/R^

Mur en série

Mode opératoire

1. Dans PhET Energy Forms and Changes, chauffez un bloc et observez l’énergie s’écouler vers son voisin et vers l’air.
2. Dans un tableur, saisissez le mur du module 2 sans isolant : R" = 0.3079 m²·K/W.
3. Ajoutez des couches d’isolant de 0.05, 0.1 et 0.2 m (k = 0.04) et calculez q" pour ΔT = 20 K.
4. Tracez q" en fonction de l’épaisseur et notez les rendements décroissants.

Tableau de données

Isolant (m)	R" (m²·K/W)	q" (W/m²)
0	0.3079	64.96
0.05	1.558	12.84
0.1	2.808	7.12
0.2	5.308	3.77

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. R"(0.05) = 0.3079 + 0.05/0.04 = 1.558.
2. q" = 20/1.558 = 12.84 W/m².

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Lien avec la planète : ENERGY STAR : près de la moitié d'une facture énergétique domestique typique de $1900 va au chauffage et à la climatisation. ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP B : Explorateur du rendement d’ailette

SEMAINE 4

Objectif : Calculez le rendement d’une ailette aiguille pour plusieurs longueurs et voyez où allonger cesse d’être rentable.

$$\eta_f = \tanh(mL)/(mL)$$

`_f=mL/mL`

Rendement d’ailette

Mode opératoire

1. Saisissez l’ailette du module 3 : k = 200, D = 5 mm, h = 50, donc m = 14.14 m^{-1}.
2. Calculez η pour L = 10, 20 et 40 mm.
3. Calculez la chaleur de l’ailette pour un excès de 50 K à la base.
4. Passez h à 200 et recommencez.

Tableau de données

L (mm)	mL	η
10	0.1414	0.993
20	0.2828	0.974
40	0.5657	0.905

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. m = √(4 × 50/(200 × 0.005)) = 14.14 m^{-1}.
2. η(40 mm) = tanh(0.5657)/0.5657 = 0.905.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/)

Lien avec la planète : Des ailettes et échangeurs efficaces permettent aux pompes à chaleur de déplacer plus de chaleur par unité d'électricité (ENERGY STAR). ENERGY STAR: Air-Source Heat Pumps (https://www.energystar.gov/products/air_source_heat_pumps)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP C : Courbe de refroidissement localisé

SEMAINE 5

Objectif : Modélisez dans un tableur le refroidissement de la sphère d'aluminium du module 4 et comparez une courbe exacte à une solution pas à pas (Euler).

$$T = T_\infty + (T_i - T_\infty)e^{-t/\tau}$$

`T=T_∞+(T_i-T_∞)e^-t/τ`

Réponse localisée

Mode opératoire

1. Saisissez T_i = 300 °C, T∞ = 20 °C, τ = 81 s.
2. Calculez T à chaque τ jusqu'à 3τ.
3. Ajoutez une colonne Euler avec un pas de 5 s et comparez.
4. Doublez h et recommencez.

Tableau de données

t (s)	T (°C)
0	300
81	123.0
162	57.9
243	33.9

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. T(81) = 20 + 280e^{-1} = 123.0 °C.
2. T(243) = 20 + 280e^{-3} = 33.9 °C.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Lien avec la planète : NASA : la surface de la Terre est en moyenne d'environ 15 °C, plus de 30 °C de plus que sans atmosphère. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP D : Calculateur de convection sur plaque plane

SEMAINE 7

Objectif : Calculez Re et le h moyen pour de l'air sur une plaque de 0.5 m à plusieurs vitesses.

$$\bar{h} = 0.664 \frac{k}{L} Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$$

```
h=0.664k/LRe_L^1/2Pr^1/3
```

Plaque laminaire

Mode opératoire

1. Saisissez les propriétés de l'air : ν = 1.5 × 10⁻⁵, k = 0.026, Pr = 0.71.
2. Calculez Re et h à 1, 5 et 10 m/s.
3. Vérifiez que chaque Re est inférieur à 5 × 10⁵.
4. Tracez h en fonction de √V.

Tableau de données

V (m/s)	Re	h (W/(m²·K))
1	33,333	5.62
5	166,667	12.58
10	333,333	17.78

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. Re(1) = 1 × 0.5/1.5 × 10⁻⁵ = 33,333.
2. h(10) = 0.664 × 577.4 × 0.892 × 0.052 = 17.78.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/)

Lien avec la planète : NASA : la convection transporte environ 5% de l'énergie solaire incidente depuis la surface. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP E : Spectres de corps noir

SEMAINE 11

Objectif : Utilisez PhET Blackbody Spectrum pour voir la loi de Wien, puis vérifiez les pics dans un tableur.

$$\lambda_{max} = 2898/T$$

`_max=2898/T`

Loi de Wien

Mode opératoire

1. Dans PhET Blackbody Spectrum, choisissez le Soleil, une lampe et la Terre.
2. Lisez la longueur d'onde du pic sur le graphique.
3. Calculez 2898/T pour 288, 3000 et 5800 K.
4. Calculez σT⁴ pour chacun.

Tableau de données

T (K)	λ_max (µm)	σT⁴ (W/m²)
288	10.06	390
3000	0.966	4.59 × 10⁶
5800	0.500	6.42 × 10⁷

Valeurs calculées.

Exemple de calcul

1. 2898/288 = 10.06 µm.
2. σ × 5800⁴ = 6.42 × 10⁷ W/m².

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Fonctionne dans un navigateur web.

PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum)

Lien avec la planète : NASA : le Soleil est à environ 5800 K. NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP F : Effet de serre et bilan énergétique

SEMAINE 14

Objectif : Explorez PhET Greenhouse Effect, puis calculez la température effective de la Terre pour plusieurs albédos.

$$T_e = \left(\frac{S(1-a)}{4\sigma}\right)^{1/4}$$

`T_e=((S(1-a))/(4σ))^1/4`

Température effective

Mode opératoire

1. Dans PhET Greenhouse Effect, ajoutez et retirez des nuages et des gaz à effet de serre et observez la température.
2. Dans un tableur, utilisez S = 1360 W/m² (NASA).
3. Calculez T_e pour un albédo de 0.25, 0.29 et 0.35.
4. Expliquez pourquoi T_e est inférieure à la moyenne de surface de 15 °C de la NASA.

Tableau de données

Albédo	T_e (K)
0.25	259.0
0.29	255.4
0.35	249.9

Valeurs calculées.

Exemple de calcul

1. (1360 × 0.71/(4σ))^¼ = 255.4 K.
2. 255.4 − 273.15 = −17.7 °C.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Fonctionne dans un navigateur web.

PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect)

Lien avec la planète : NASA : environ 29% de la lumière solaire est réfléchie et la Terre absorbe environ 240 W/m². NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

Séries d'entraînement aux examens

Chronométrez-vous : environ 10 minutes par problème. Comparez ensuite avec les solutions complètes.

Série d'exercices de mi-parcours (unités 1–5)

1. Convection depuis 3 m² avec h = 15 W/(m²·K), ΔT = 20 K ?

    1. 15 × 3 × 20.

    Réponse : 900 W.

2. Flux de chaleur à travers 0.15 m d'isolant (k = 0.04) plus 0.3079 m²·K/W d'autres couches à ΔT = 20 K ?

    1. R'' = 0.3079 + 3.75 = 4.058.
    2. 20/4.058.

    Réponse : 4.93 W/m².

3. Rayon critique pour k = 0.1 et h = 10 ?

    1. k/h.

    Réponse : 10 mm.

4. τ pour une sphère d'aluminium de 20 mm, h = 50 ?

    1. 2700 × 900 × (0.02/6)/50.

    Réponse : 162 s.

5. Re pour de l'air à 2 m/s sur 0.5 m ?

    1. 2 × 0.5/1.5 × 10^{-5}.

    Réponse : 66,667.

Série d'entraînement finale (modules 1–10)

1. DTLM pour ΔT_1 = 60 K et ΔT_2 = 20 K ?

1. 40/ln 3.

Réponse : 36.4 K.

2. ε pour NUT = 1, C_r = 0 ?

    1. 1 − e⁻¹.

Réponse : 0.632.

3. Ra pour la plaque du module 7 avec L = 0.6 m ?

    1. 7.52 × 10⁷ × 8.

Réponse : 6.02 × 10⁸.

4. Longueur d’onde du pic à 1000 K ?

    1. 2898/1000.

Réponse : 2.90 µm.

5. Plaques parallèles à 500 K et 300 K, ε = 0.9 pour les deux ?

    1. σ(500⁴ − 300⁴)/(2/0.9 − 1).

Réponse : 2524 W/m².

6. COP de chauffage de Carnot, fourniture à 318 K, 268 K à l’extérieur ?

    1. 318/50.

Réponse : 6.36.

Fiche de formules

$$q = kA\Delta T/L,\ q = hA\Delta T,\ q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4) \qquad R = L/(kA),\ R = 1/(hA),\ q = \Delta T/\sum R$$

$$R_{cyl} = \ln(r_2/r_1)/(2\pi kL),\ r_{cr} = k/h \qquad m = \sqrt{hP/(kA_c)},\ \eta_f = \tanh(mL)/(mL)$$

$$Bi = hL_c/k,\ \tau = \rho cV/(hA),\ \theta/\theta_i = e^{-t/\tau} \qquad Re = VL/\nu,\ Nu = hL/k,\ Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4},\ \Delta T_{lm} = (\Delta T_1 - \Delta T_2)/\ln(\qquad Ra = g\beta\Delta TL^3/(\nu\alpha),\ Nu = 0.59Ra^{1/4}$$

$$\lambda_{max} T = 2898,\ E_b = \sigma T^4,\ A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \qquad COP = Q_h / W,\ COP_C = T_h / (T_h - T_c),\ P = \Delta F$$

Constantes

Constante	Valeur
Constante de Stefan–Boltzmann	σ = 5.670374419 × 10⁻⁸ W/(m²·K⁴)
Constante de Wien (valeur de manuel)	2898 µm·K
Pesanteur normale	g = 9.80665 m/s²
Air vers 300 K (valeurs de manuel)	k = 0.026 W/(m·K), ν = 1.5 × 10⁻⁵ m²/s, Pr = 0.71
Aluminium (valeurs de manuel)	k = 237 W/(m·K), ρ = 2700 kg/m³, c = 900 J/(kg·K)
Superficie de la Terre (valeur de manuel)	5.1 × 10¹⁴ m²

Source : NIST: CODATA value, Stefan–Boltzmann constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma)

Textes et simulations gratuits

Utilisez ces textes, cours et simulations gratuits en parallèle du cours.

- J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (free online edition) (https://ahtt.mit.edu/): Manuel complet et gratuit de transfert de chaleur.
- MIT OpenCourseWare 2.51 Intermediate Heat and Mass Transfer (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/2-51-intermediate-heat-and-mass-transfer-fall-2008/): Cours et exercices gratuits du MIT.
- NASA Earth Observatory: Climate and Earth's Energy Budget (https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance): Explication gratuite de la NASA.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): Le flux de chaleur de façon interactive.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): Rayonnement thermique.
- PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect): Bilan radiatif.

Glossaire

Albédo
Fraction de la lumière solaire réfléchie.

Nombre de Biot
Résistance thermique interne sur externe.

Corps noir
Absorbeur et émetteur parfait.

Couche limite
Fine région d’écoulement près de la paroi.

COP
Chaleur déplacée par unité de travail.

Rayon critique
Rayon de perte de chaleur maximale d’un cylindre isolé.

Efficacité
Chaleur réelle sur chaleur maximale de l’échangeur.

Émissivité
Émission relative à un corps noir.

Déséquilibre énergétique
Énergie planétaire absorbée moins émise.

Rendement d’ailette
Chaleur réelle sur chaleur idéale de l’ailette.

Loi de Fourier
Loi du flux de conduction.

Échangeur de chaleur
Appareil qui transfère la chaleur entre fluides.

LMTD
Différence de température logarithmique moyenne.

Capacité localisée
Modèle transitoire à température uniforme.

Nombre de Nusselt
Coefficient de convection adimensionnel.

Nombre de Prandtl
Diffusivité de quantité de mouvement sur diffusivité thermique.

Écran de rayonnement
Barrière à faible émissivité.

Nombre de Rayleigh
Intensité de l’écoulement de flottabilité.

Résistance thermique
Écart de température par flux de chaleur.

Facteur de forme
Fraction du rayonnement qu’une surface intercepte.

Grille d’autoévaluation

Aucune note ni aucun crédit ne sont attribués. Utilisez cette grille pour juger honnêtement où vous en êtes dans chaque unité.

Niveau	À quoi cela ressemble
4 · Maîtrise	Dessine le système et le réseau de résistances, vérifie les nombres adimensionnels avant de choisir une corrélation, utilise les kelvins pour le rayonnement et explique les résultats en termes simples.
3 · Compétent	Résout les séries d'exercices et d'examens avec de petites erreurs et vérifie les unités.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais confond le k du solide et du fluide, ou utilise des °C dans σT^4.
1 · Débutant	Injecte des nombres dans les formules sans schéma ni bilan énergétique ; doit revoir le module.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	20%
Travaux pratiques	25%
Série d'entraînement de mi-parcours	25%
Série d'entraînement finale	30%

Visez le niveau 3 ou mieux dans chaque unité avant de passer au cours suivant.

Cours associés

- Conception d'engins spatiaux AERO 430
- Avionique et ingénierie des systèmes AERO 450
- Propulsion AERO 410
- Tous les cours