

## 2.4 - Energie thermique

### 2.4.2 Conduction

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

François Relotius, M.ing.

# Question



ENR2020

- Qu'est-ce que la conduction ?
  - Transfert de chaleur par échange d'énergie au niveau moléculaire
  - Transfert de chaleur à la frontière entre un solide et un fluide
  - Transfert de chaleur dans le vide
  - Transfert de chaleur à travers un solide ou un fluide stationnaire
  - Aucune de ces réponses

# Question



ENR2020

- Qu'est-ce que la conduction ?
  - **A est vraie** car la conduction est assimilable à de la diffusion au niveau moléculaire. Dans les isolants, c'est en majorité de la diffusion qui se produit alors que dans les conducteurs, il y a aussi du transport ordonné par des électrons qui se déplacent.
  - **B est vraie** car à l'interface entre deux couches de molécules, il y aura transfert par contact, par diffusion
  - **C est fausse** car il faut un substrat pour assurer la conduction
  - **D est vraie** car que ce soit dans un fluide ou un solide du transfert par diffusion peut se produire. Que le fluide bouge ou non, de la conduction se produit dans le sens des gradients thermiques.
  - **E est évidemment fausse**

# Vidéos explicatives

- Contenu illustratif du MIT (Khan Academy)

– Modes de transfert :

<https://www.khanacademy.org/partner-content/mit-k12/mit-k12-physics/v/heat-transfer>

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Loi de Fourier
- Généralités
- Analogies
- Exercice
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Définitions
- Loi de Fourier
- Généralités
- Analogies
- Exercice
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- La conduction est l'un des trois modes de transfert thermique, avec la convection et le rayonnement.
- La conduction peut être considérée comme le transfert d'énergie des particules les plus énergétiques aux particules des substances les moins énergétiques en raison des interactions interparticulaires.

# Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
  - Comprendre le phénomène conductif entre un système et son environnement
  - Découvrir la loi de Fourier
  - Connaître l'analogie qui existe avec la résistance thermique

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Définitions***
- Loi de Fourier
- Généralités
- Analogies
- Exercice
- Conclusion

# Définitions

- Qu'est-ce que la conduction ?
  - *Transfert par échange d'énergie au niveau moléculaire (microscopique)*
  - *Dans **un solide** ou **un fluide inerte** (rare)*
  - *À la frontière entre un solide et un liquide.*

# Définitions

- Où, quand et comment la chaleur se propage-t-elle par conduction?
  - Dans les matériaux ***solides*** ou ***fluides***, jamais dans le vide
  - La chaleur se propage ***continuellement***, sans interruption sauf lorsque toutes les parties d'un corps se trouvent à la même température ( $\Delta T = 0$ )
  - Le transfert de chaleur naturel s'effectue **de  $T_{chaud}$  vers  $T_{froid}$**

# Définitions

- Comment qualifier et quantifier le transfert thermique?
  - Le taux de transfert de chaleur par **conduction** dans les solides (fluides au repos) est proportionnel au **gradient** de température  $T$  multiplié par la **surface** à travers laquelle se produit le transfert
  - Le taux de transfert dépend de la conductivité thermique,  $k$ , **une propriété physique** du matériau considéré.  $k$  est exprimé en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

*Par exemple, une paroi d'1 m<sup>2</sup> de surface et d'1m d'épaisseur qui possède un  $k = 10 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  possède un flux de chaleur de 10 watts par kelvin de différence de température entre ses deux surfaces, soit une perte de 10 watt-heure par heure.*

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- ***Loi de Fourier***
- Généralités
- Analogies
- Exercice
- Conclusion

# Loi de Fourier

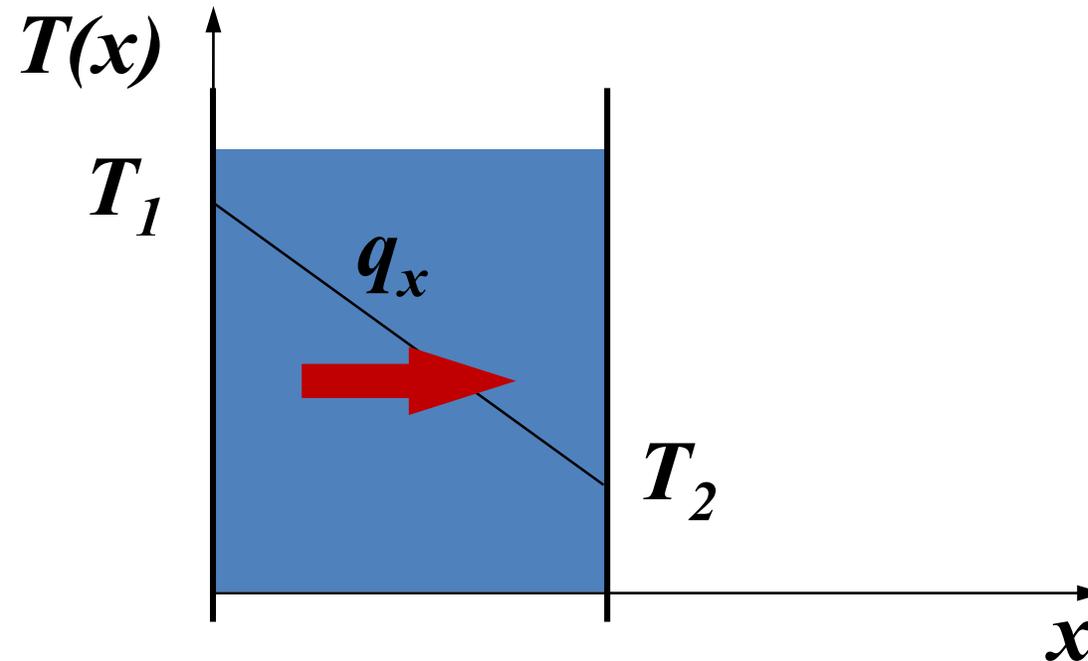
- Equation qui permet de calculer la quantité d'énergie transférée par unité de temps :

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

$k$ : conductivité thermique [W/m.K]

# Loi de Fourier

- Le signe négatif dans l'équation provient de la pente du gradient de température  $T$



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Loi de Fourier
- ***Généralités***
- Analogies
- Exercice
- Conclusion

# Question



ENR2020

- Quel est l'ordre de grandeur de la conductivité thermique pour les métaux purs ?
  - Entre 0,01 et 0,1 W/m.K
  - Entre 0,1 et 1 W/m.K
  - Entre 1 et 10 W/m.K
  - Entre 10 et 1000 W/m.K
  - Aucune de ces réponses

# Question

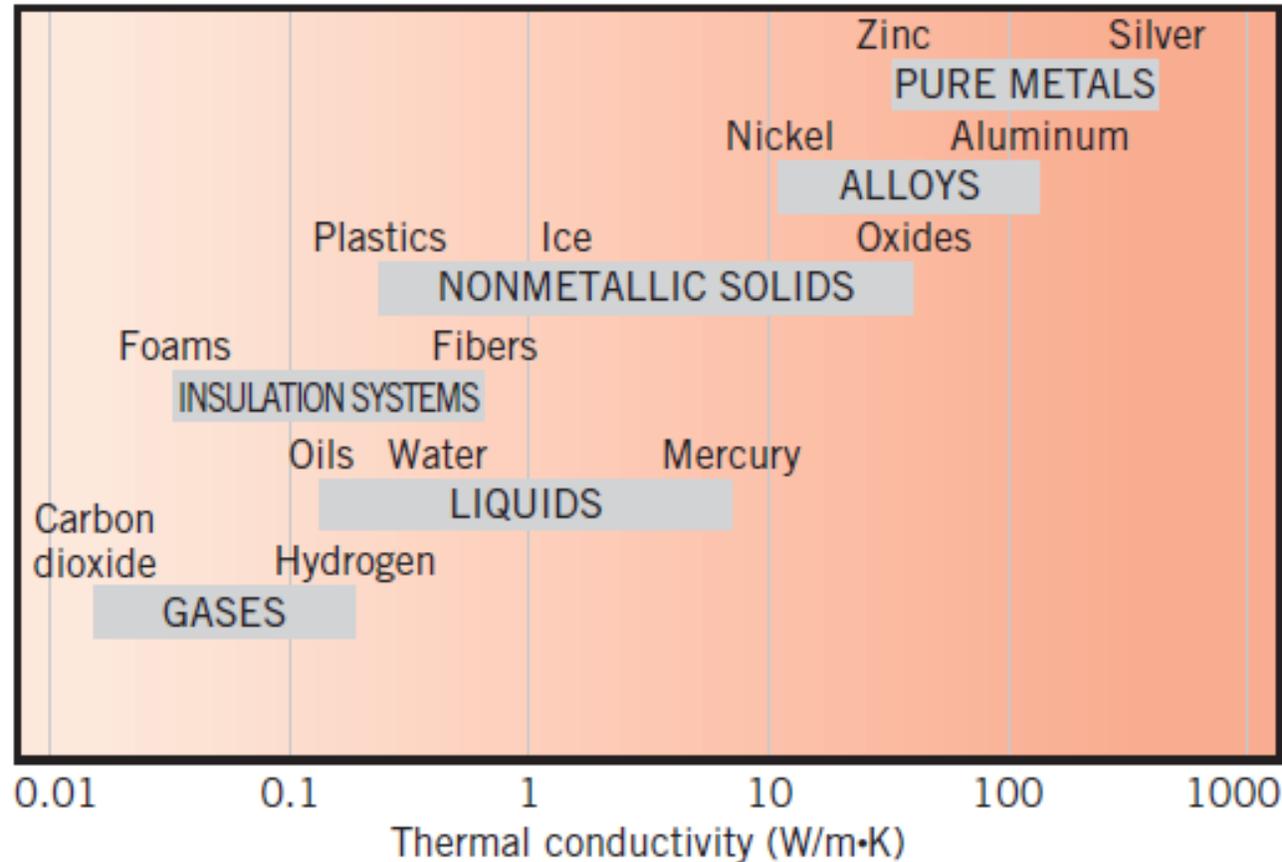


ENR2020

- Quel est l'ordre de grandeur de la conductivité thermique des métaux purs ?
  - En fait, sous la barre de  $1 \text{ W/mK}$  on commence à parler d'isolants alors qu'autour de l'unité on trouve des substances souvent organiques ou communes comme l'eau, le béton. Et finalement, les métaux purs sont à la fois conducteurs d'électricité et de chaleur. Le cuivre (approx  $400 \text{ W/m.K}$ ) et l'aluminium (approx  $230 \text{ W/m.K}$ ) sont parmi les métaux courants avec les conductivités plus élevées. L'acier inoxydable est un piètre isolant et un mauvais conducteur comparé aux deux autres, le chrome fait chuter sa conductivité autour de  $20\text{-}30 \text{ W/m.K}$  en fonction de sa teneur.

# Généralités

- Ordre de grandeur de la conductivité thermique



# Généralités

- La conductivité thermique est dépendante de la température

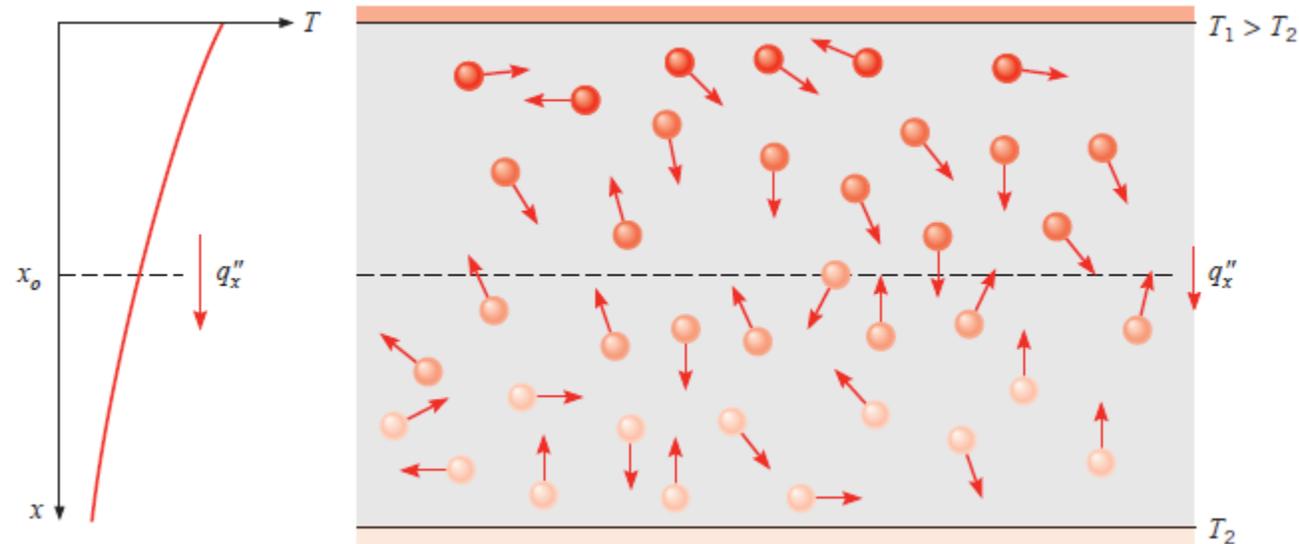


# Généralités

- Que se passe-t-il au juste?
  - Activité moléculaire quelque soit le milieu
  - **Solides** : *vibration* des structures interatomiques
    - Dans les conducteurs il y a aussi *transfert d'électrons* libres.
    - Dans les matériaux isolants : Vibrations seulement.

# Généralités

- Que se passe-t-il au juste?
  - **Fluides** : échanges de quantité de mouvement par collisions entre molécules



Schématisation de la conduction dans un fluide au repos

# Généralités

- Conductivité des gaz parfaits

$$k \sim \sqrt{T_{abs}}$$

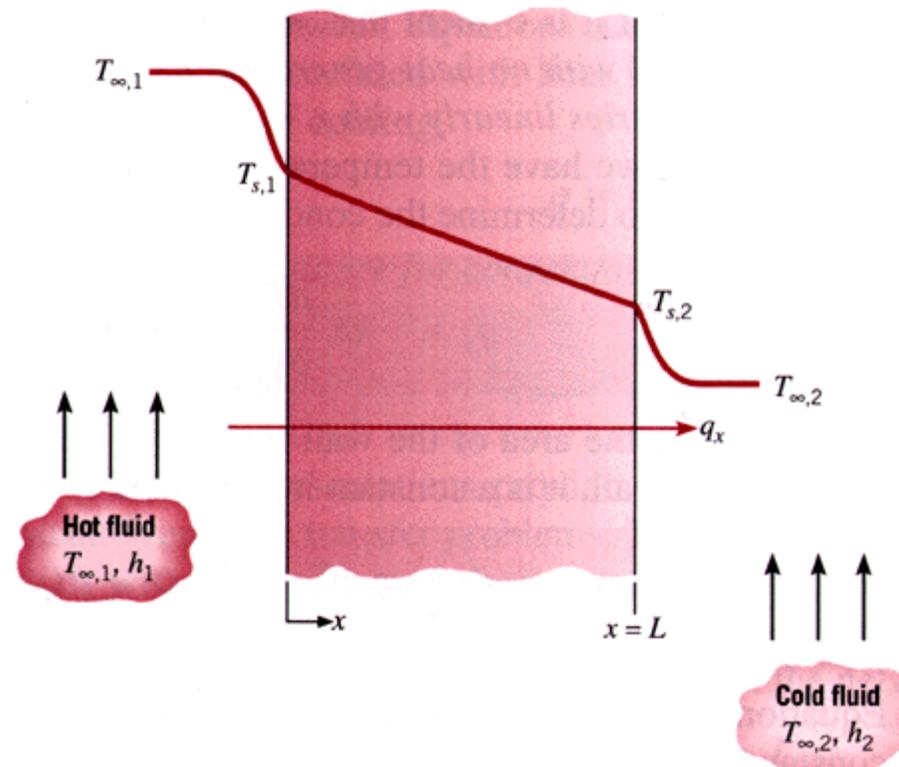
$$k \sim \sqrt{\frac{1}{m}}$$

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Loi de Fourier
- Généralités
- ***Analogies***
- Exercice
- Conclusion

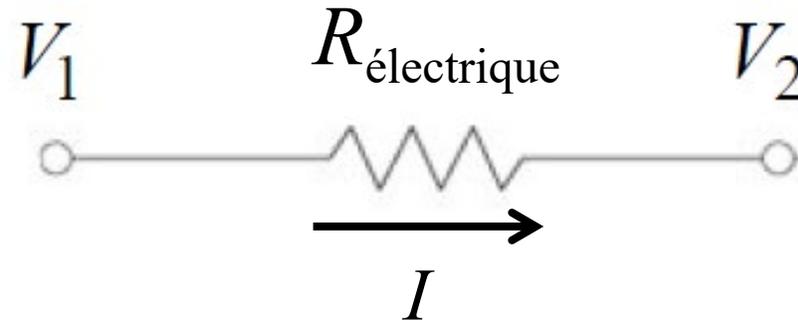
# Analogies

- Existe-t-il une façon simple d'analyser les problèmes de transfert unidimensionnels?



# Analogies

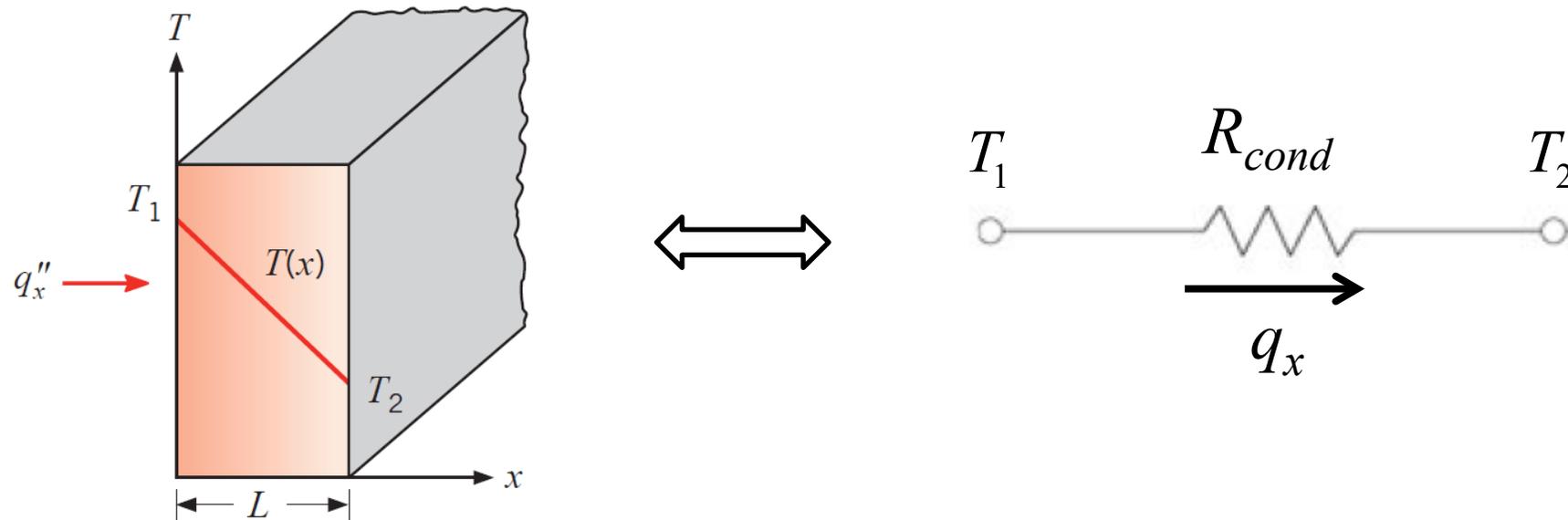
- Notion de Résistance thermique
  - Rappel électrique



$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_{\text{électrique}}}$$

# Analogies

- Notion de Résistance thermique



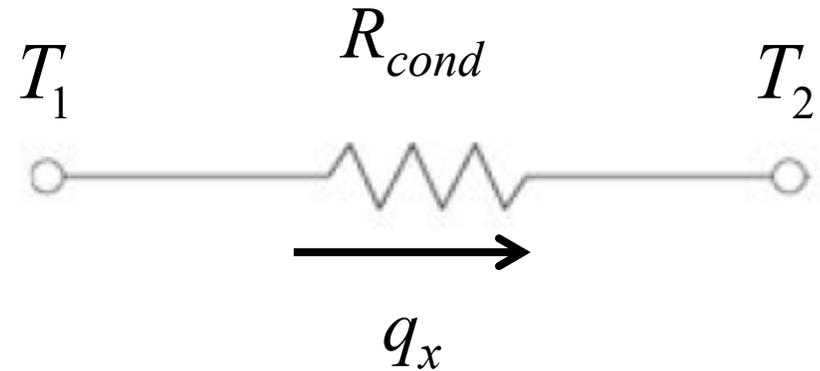
# Analogies

- Notion de Résistance thermique

$$q_x = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} = \frac{(T_1 - T_2)}{L/kA}$$

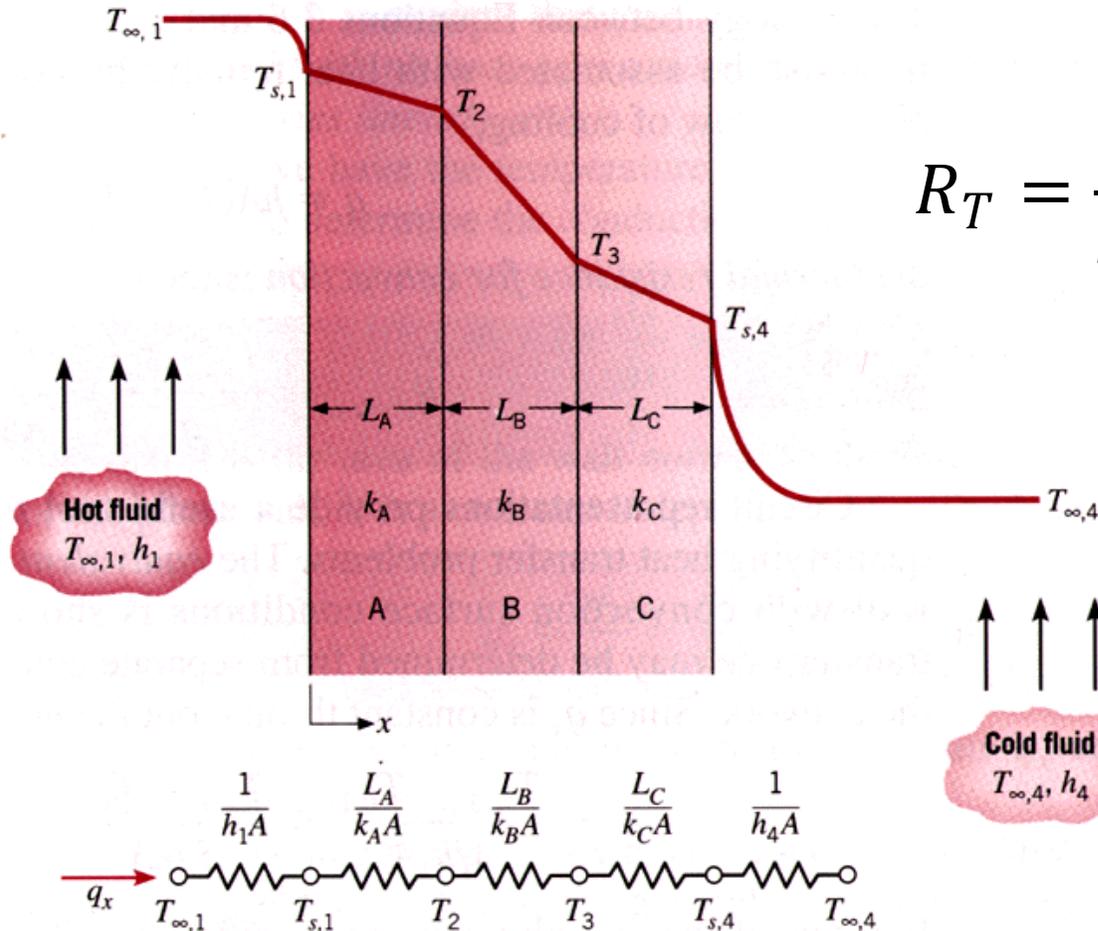
$$R_{cond} = \frac{L}{kA}$$

$$q_x = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{cond}}$$



# Analogies

- Les résistances (successives) sont en série.

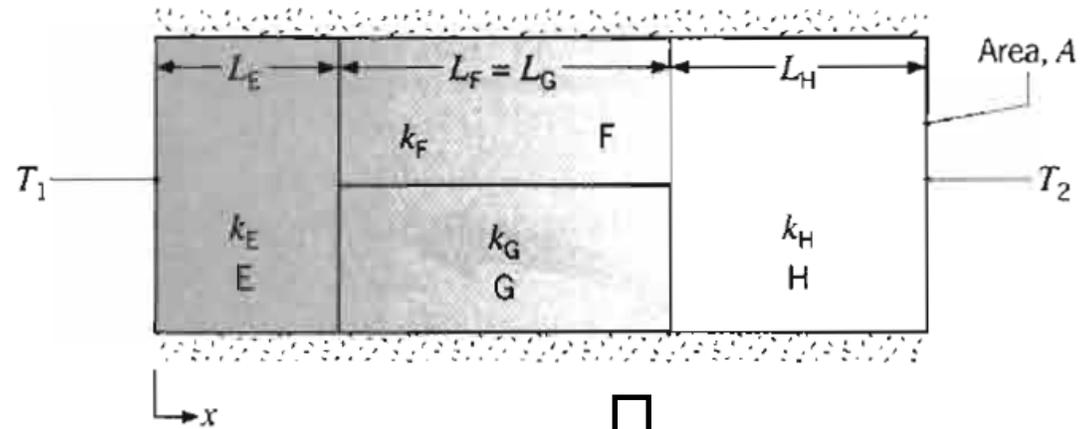


$$R_T = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A} + \frac{1}{h_4 A}$$

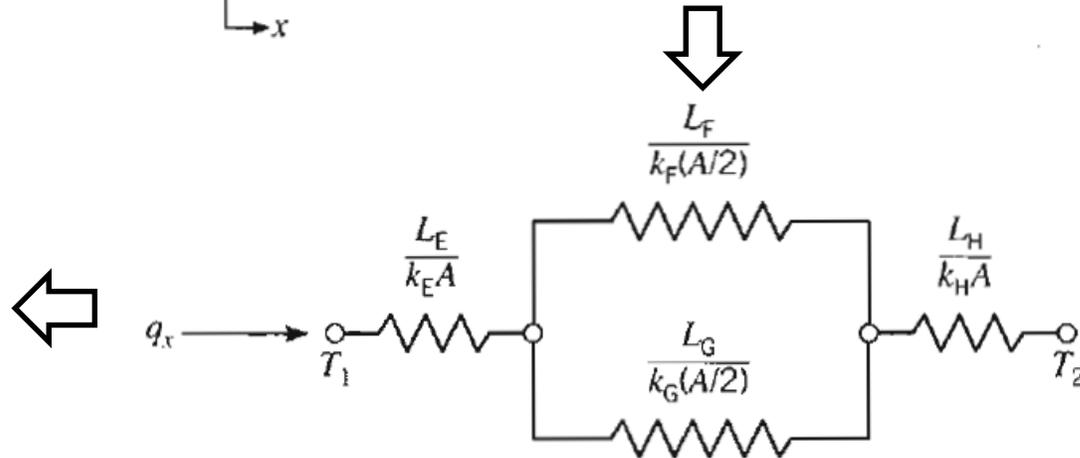
# Analogies

- Des résistances en parallèle et en série.

$$R_{//} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$$



$$R_T = \frac{L_E}{k_E A} + \left( \frac{1}{\frac{k_F (A/2)}{L_F}} + \frac{1}{\frac{k_G (A/2)}{L_G}} \right)^{-1} + \frac{L_H}{k_H A}$$



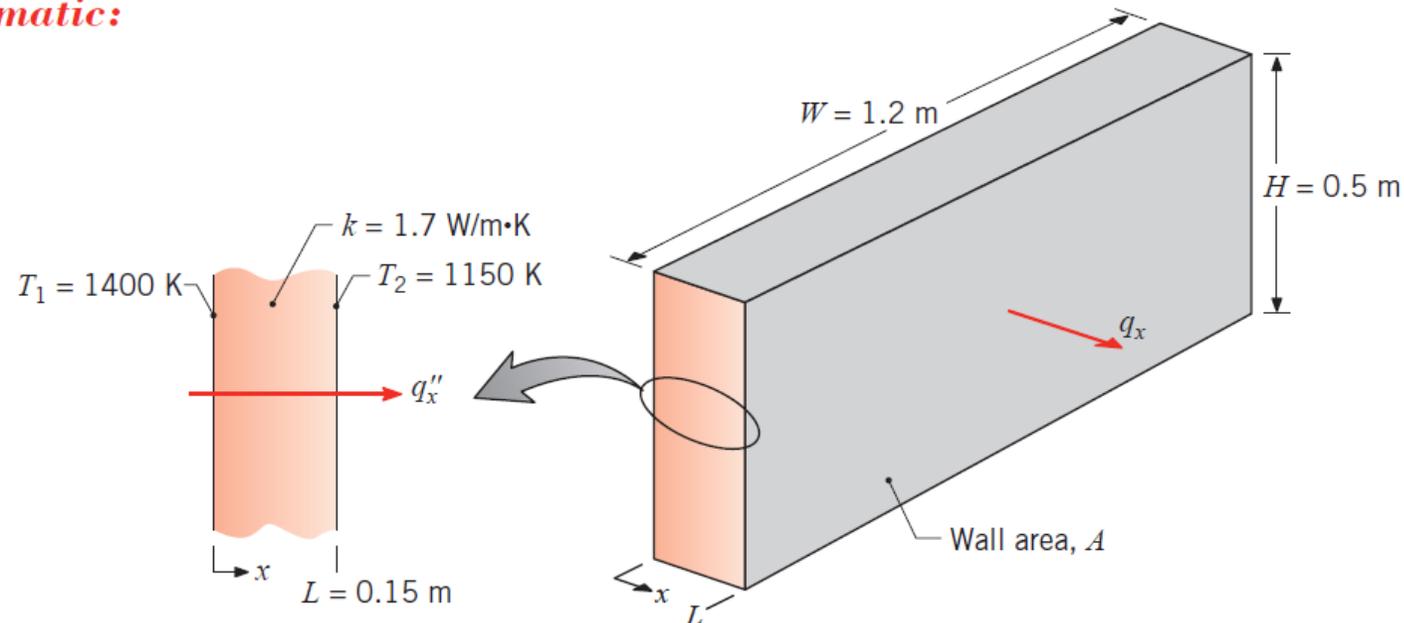
# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Loi de Fourier
- Généralités
- Analogies
- ***Exercice***
- Conclusion

# Exercice

- The wall of an industrial furnace is constructed from 0.15-m-thick fireclay brick having a thermal conductivity of  $1.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Measurements made during steady-state operation reveal temperatures of  $1400$  and  $1150 \text{ K}$  at the inner and outer surfaces, respectively. What is the rate of heat loss through a wall that is  $0.5 \text{ m}$   $1.2 \text{ m}$  on a side?

*Schematic:*



# Quelques questions

- A la fin de cette capsule, vous devriez avoir commencé à acquérir une appréciation de la terminologie et des concepts physiques qui sous-tendent le sujet du transfert thermique.
- Testez votre compréhension en tentant de répondre aux questions qui sont formulées en fin de présentation.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions
- Loi de Fourier
- Généralités
- Analogies
- Exercice
- ***Conclusion***

# Conclusion

- La conduction est un phénomène qui apparaît naturellement lorsqu'il existe une **différence de température** dans un milieu.
- Il s'agit de la propagation de chaleur du chaud vers le froid, à **l'échelle moléculaire**, dans un solide ou un fluide inerte, mais jamais dans le vide.
- Il est possible de **quantifier la conduction**, soit la quantité d'énergie transférée par unité de temps, grâce à la **Loi de Fourier**.

# Épilogue

- La **Loi de Fourier** est connue et appliquée depuis 200 ans (formulée en 1822).
- Elle fut mise à jour en 2020.
  - Non seulement le transfert conductif dépend de la conductivité thermique, mais des chercheurs de l'EPFL et Harvard montrent qu'il dépend aussi de la « viscosité thermique » donc que le phénomène ne serait pas purement diffusif.
  - Pour le niveau des applications dans le cours énergies renouvelables, nous allons conserver la théorie de Fourier intacte! Si vous étudiez des objets plus petit que l'ordre du mm, il faudrait penser à inclure cet effet visqueux!
  - <https://phys.org/news/2020-01-fourier-year-old-equation-hydrodynamic-propagation.html>



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions



# Liste de questions à réflexion

- Dans la formulation générale de la loi de Fourier (applicable à toute géométrie), quels sont les quantités vectorielles et scalaires?
- Pourquoi y a-t-il un signe moins sur le côté droit de l'équation?
- Qu'est-ce qu'une surface isotherme? Que peut-on dire du flux de chaleur à n'importe quel endroit sur cette surface?
- Quelle forme prend la loi de Fourier pour chacune des directions orthogonales des systèmes de coordonnées cartésien, cylindrique et sphériques?
- Dans chaque cas, quelles sont les unités du gradient de température? Pouvez-vous écrire chaque équation de mémoire?
- Une propriété importante de la matière est définie par la loi de Fourier. Qu'est-ce que c'est?
- Quel est sa signification physique? Quelles sont ses unités?
- Qu'est-ce qu'un matériau isotrope?
- Pourquoi la conductivité thermique d'un solide est-elle généralement supérieure à celle d'un liquide?
- Pourquoi est-ce que la conductivité thermique d'un liquide plus grande que celle d'un gaz?

# Liste de questions à réflexion

- Pourquoi la conductivité thermique d'un solide électriquement conducteur est-elle généralement plus grande que celle d'un non-conducteur?
- La conductivité thermique effective d'un système d'isolation est-elle une véritable manifestation de l'efficacité avec laquelle la chaleur est transférée à travers le système par conduction seule?
- Quelle est la signification physique de la diffusivité thermique? Comment est-elle définie et quelles en sont les unités?
- Quelle est la signification physique de chaque terme apparaissant dans l'équation de la chaleur?
- Citez quelques exemples de production d'énergie thermique.
- Pour un milieu comportant une réaction chimique, quel type de réaction fournit une source de chaleur? Quel type de réaction fournit un puits d'énergie thermique?
- Pour résoudre l'équation de la chaleur pour la distribution de la température dans un milieu, les conditions aux frontières doivent être prescrites aux surfaces du milieu. Quelles conditions physiques conviennent généralement à cette fin?

**Cette présentation ne permet pas de répondre explicitement à toutes ces questions. Ces réponses viendront avec les autres thèmes abordés et en réalisant des exercices. Vous devriez avoir ici plus de succès qu'avec les questions de la présentation précédente.**