Transfert de chaleur et de masse

S3, Cycle Ingénieur de la Filière GR

2013-2014

Option : Energie & Agroéquipements

Pr. El Houssain BAALI

Département Energie & Agroéquipements

Filière de Formation en Génie Rural

IAV Hassan II

Plan du cours

Introduction générale
Partie 1 : Initiation au transfert de chaleur par conduction
Partie 2 : Initiation au transfert par convection
Partie 3 : Initiation au transfert par rayonnement
Partie 4 : Initiation au transfert de masse

Volume horaire

1,5 crédit = 18 heures

Evaluation

Assiduité	et participation en classe	10%
4 devoirs		40%
1 contrôle de connaissance (examen final)		50%

Textes de base

Introduction to Heath Transfer. F. P. Incropera & D. P. Dewitt
An Introduction to Mass and Heat Transfer. Stanley Middleman

Introduction générale

Objectifs :

-Connaitre les modes de transfert de chaleur et leur importance dans la pratique

-Apprendre des méthodes permettant de modéliser et de résoudre des problèmes pratiques de transfert de chaleur

-Connaitre le transfert de masse et les lois le régissant ainsi que ses applications

-Traiter quelques cas

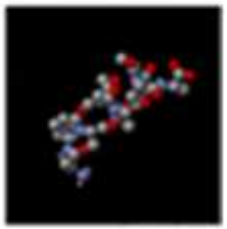
La **thermodynamique** permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur.

La **thermique** décrit quantitativement dans l'espace et dans le temps l'évolution des grandeurs caractéristiques en particulier la température entre l'état initial et l'état d'équilibre final.

Qu'est-ce que la chaleur ?

- La chaleur est une forme d'énergie qui s'écoule sous l'effet d'une différence de température des hautes vers les basses températures.
- La chaleur se mesure en JOULE

Qu'est-ce que la température ?



- C'est la manifestation mesurable de la chaleur stockée. La température est liée à la moyenne d'énergie cinétique due au mouvement des atomes et molécules du corps.
- La température se mesure en K.

Modes du transfert de chaleur

Il existe trois modes de transfert de chaleur:

1. La Conduction

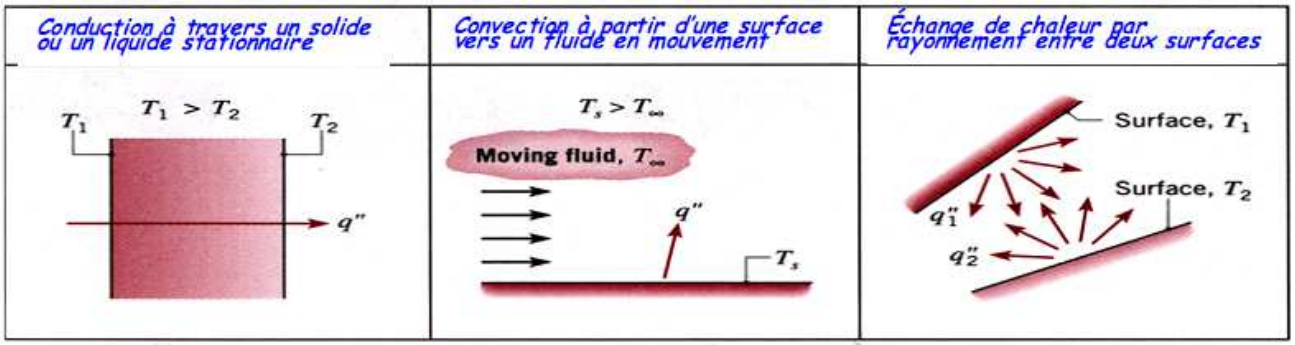
Transfert de chaleur survenant dans un milieu STATIONNAIRE sous l'effet d'un gradient de température (FLUIDE OU SOLIDE);

2. La Convection

Transfert de chaleur survenant dans un FLUIDE en MOUVEMENT sous l'effet d'un gradient de température.

3. Le Rayonnement

Transfert de chaleur induit par l'échange d'ondes électromagnétiques entre un corps émetteur et un corps récepteur.



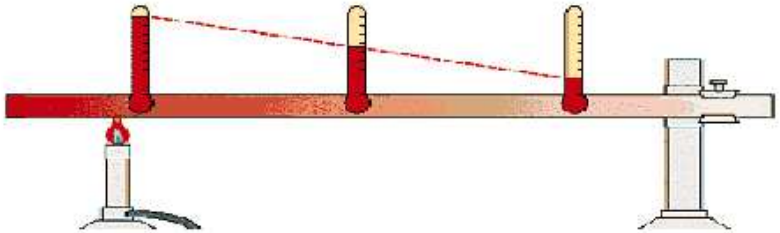
1. Transfert de chaleur par conduction

- Le transfert de chaleur par conduction résulte d'un échange d'énergie entre les particules les plus énergétiques et les moins énergétiques adjacentes dans un milieu;

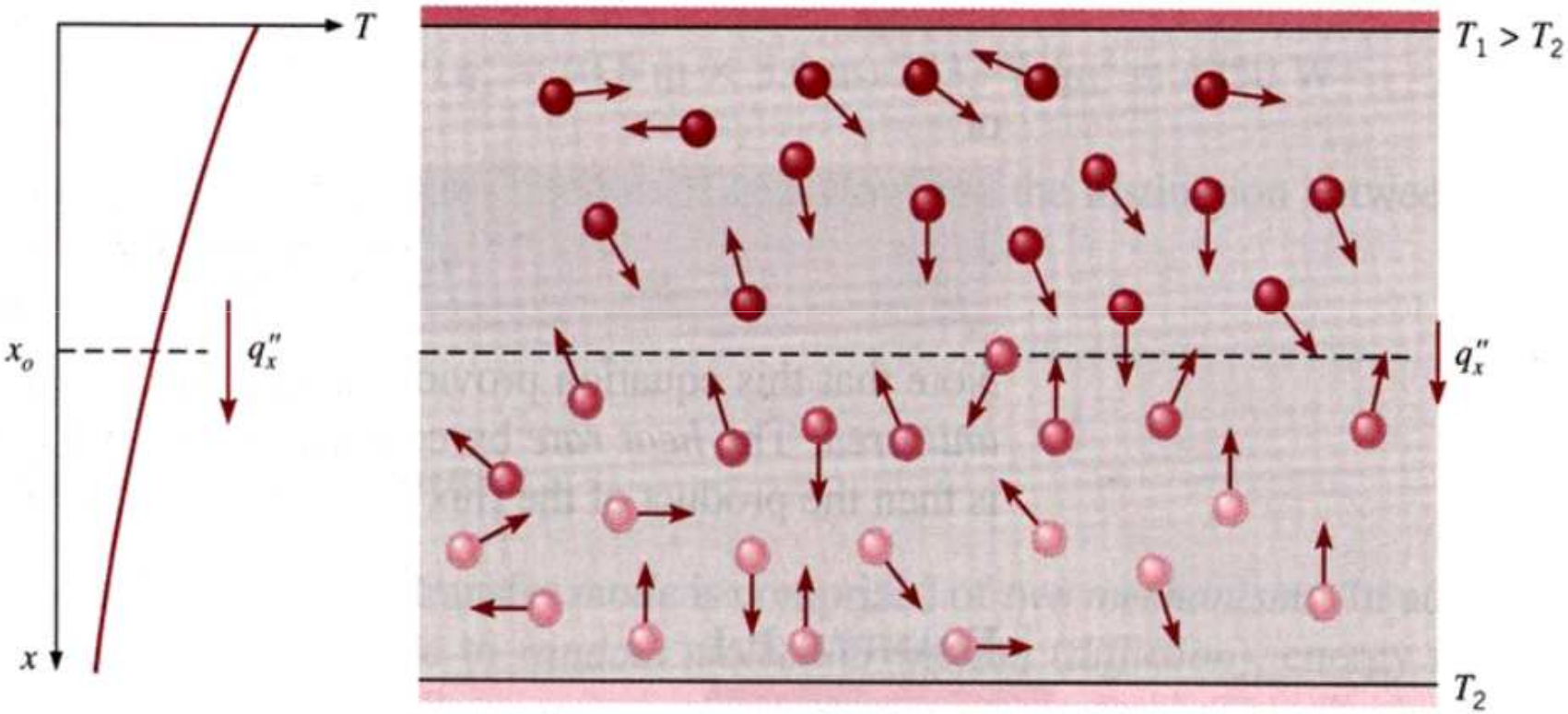
- Dans les solides, le transfert de chaleur est causé par les vibrations des réseaux cristallins (solides non-conducteurs) et déplacements d'électrons libres (métaux conducteurs);

- La température d'un corps est directement liée à l'agitation thermique : quand T augmente, la vitesse d'agitation des particules élémentaires de la matière est plus grande.

Exemple : Une barre de fer chauffée à une extrémité se réchauffe peu à peu sur toute sa longueur.



- Dans les fluides, le transfert de chaleur est relié aux échanges de quantité d'énergie dû au mouvement aléatoire des molécules (agitation moléculaire)



Loi de Fourier

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier: la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$q_{conduction} \propto A\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$$

Le coefficient de proportionnalité est appelé la ***conductivité thermique***, ***noté k***, et est une propriété physique du matériau considéré qui peut aussi dépendre de l'état thermodynamique du matériau.

La conductivité thermique indique l'aptitude du matériau à conduire la chaleur .

À la limite $\Delta x \rightarrow 0$, nous pouvons donc écrire la **LOI DE FOURIER** pour la conduction de la chaleur :

Signe - car flux de chaleur dans le sens des températures décroissantes

$$q = -kA\left(\frac{dT}{dx}\right) \qquad \text{ou} \qquad q'' = -k\left(\frac{dT}{dx}\right)$$

q (q"):Flux (densité de flux) de chaleur transmis par conduction, W (W/m^2);

k: Conductivité thermique du milieu, W m^{-1} °C^{-1}

X: Variable d'espace dans la direction du flux, (m)

A: Aire de la section de passage du flux de chaleur,m^2

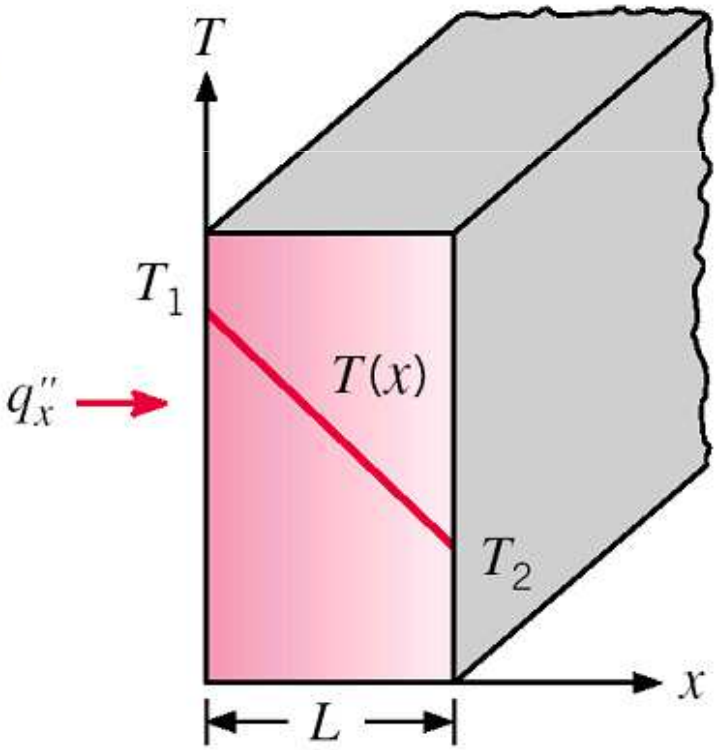
- Il est important de noter que la loi de Fourier est une loi semi-empirique, elle a donc été établie mathématiquement et expérimentalement.
- La conductivité thermique (k) est une propriété physique du matériau

CONDUCTIVITÉ THERMIQUE k

SUBSTANCE	k (W/mK)
Cuivre	401
Aluminium	237
Contre plaqué	0.12
Brique	0.72
Polystyrène	0.04
Coton	0.06
Air	0.025
Glace	1.9
Neige	0.05
Muscle	0.4
Gras	0.2

Bons conducteurs

Bons isolants



Exemple

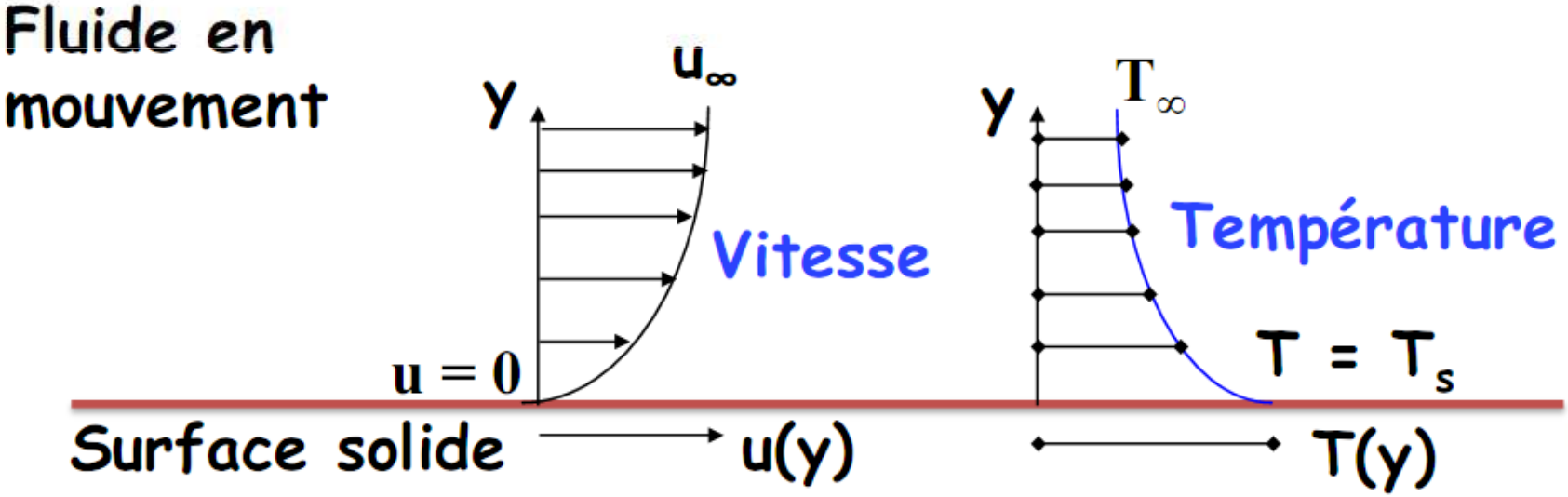
$$q_x'' = -k\left(\frac{dT}{dx}\right) = -k\left(\frac{T_2 - T_1}{L}\right)$$

2. Transfert de chaleur par convection

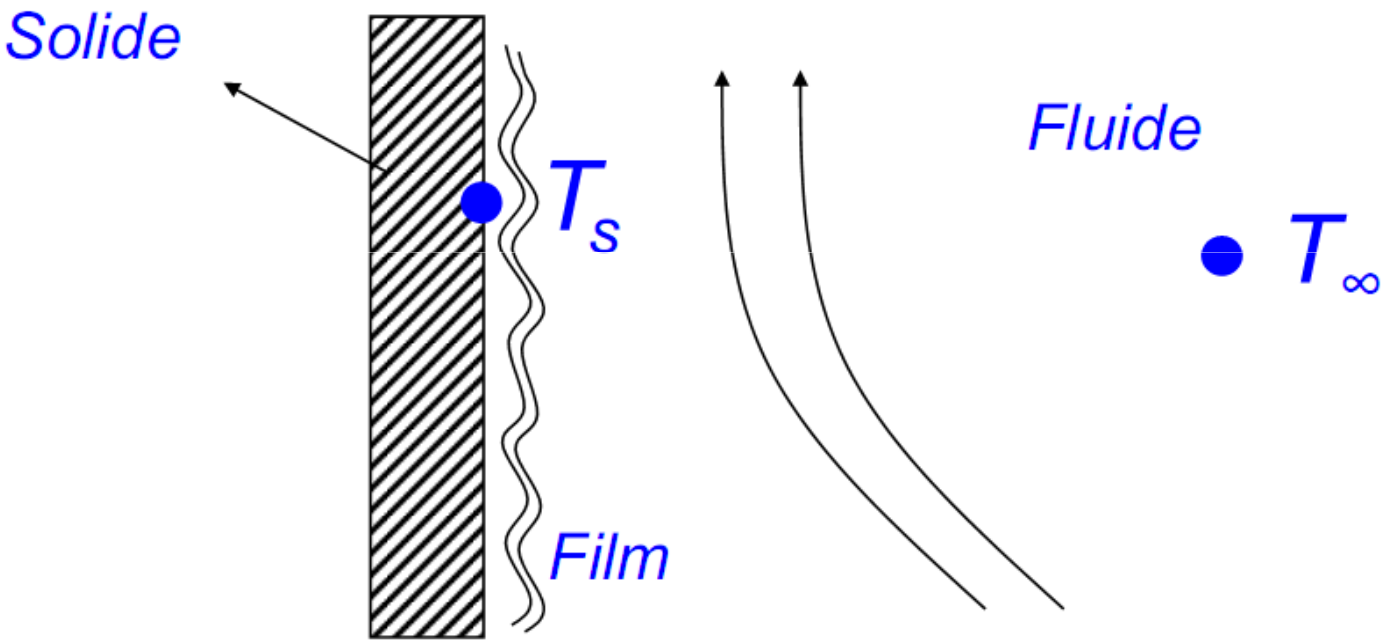
Le transfert d'énergie thermique se produit de 2 façons:

1. Le mouvement aléatoire des molécules (associé à la DIFFUSION)
2. Le mouvement du fluide lui-même dans une direction donnée (ADVECTION)

La convection est associée à la présence d'une couche limite (film) où la vitesse et la température varient rapidement en s'éloignant de la surface. Plus la vitesse est faible (proche de la surface), plus la diffusion y est importante. A la paroi, le seul mécanisme en jeu est la CONDUCTION (diffusion) vu que la vitesse du fluide est nulle.

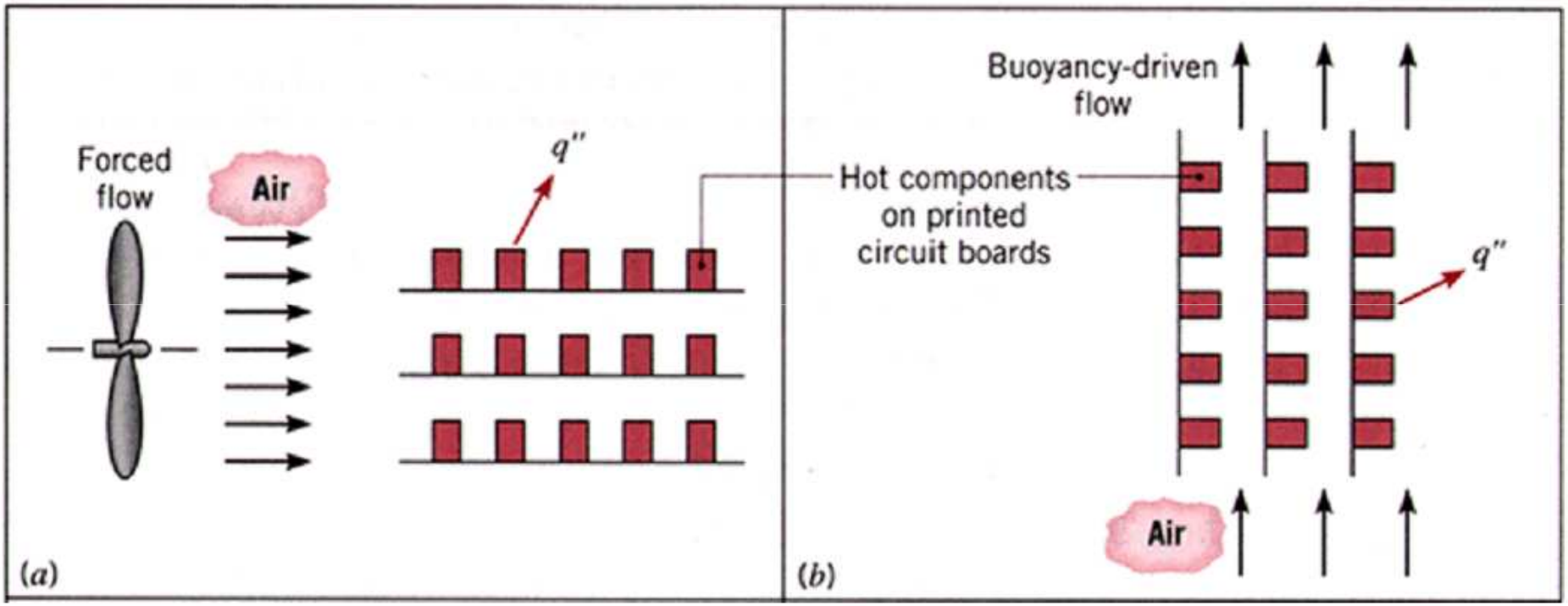


La convection regroupe les échanges de chaleur entre la surface des matériaux solides et les fluides adjacents **en mouvement**.



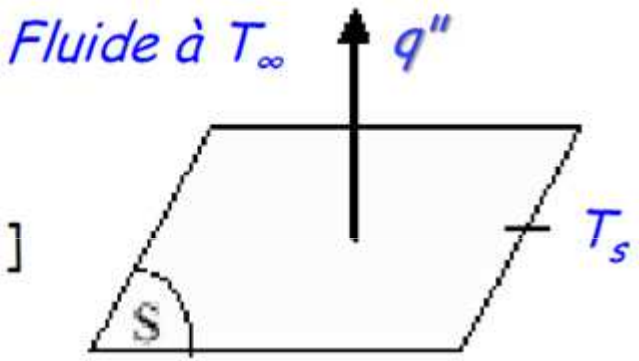
Convection forcée

Convection naturelle



Le mécanisme de transfert par convection est régi par la **LOI DE NEWTON**

$$q'' = h\left(T_s - T_\infty\right)$$



où : T : Température [K ou °C]

q'' : flux de chaleur par unité de surface [W/m²]

h : coefficient de convection [W/m² K]

Le coefficient de transfert de chaleur par **convection**, ***h***, n'est pas une propriété physique du fluide. Il dépend en fait de nombreux paramètres (géométrie, nature de l'écoulement, propriétés, état de surface, etc…).

Tableau de calcul du refroidissement Éolien

T air	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
V_{10}												
5	4	-2	-7	-13	-19	-24	-30	-36	-41	-47	-53	-58
10	3	-3	-9	-15	-21	-27	-33	-39	-45	-51	-57	-63
15	2	-4	-11	-17	-23	-29	-35	-41	-48	-54	-60	-66
20	1	-5	-12	-18	-24	-30	-37	-43	-49	-56	-62	-68
25	1	-6	-12	-19	-25	-32	-38	-44	-51	-57	-64	-70
30	0	-6	-13	-20	-26	-33	-39	-46	-52	-59	-65	-72
35	0	-7	-14	-20	-27	-33	-40	-47	-53	-60	-66	-73
40	-1	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48	-54	-61	-68	-74
45	-1	-8	-15	-21	-28	-35	-42	-48	-55	-62	-69	-75
50	-1	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49	-56	-63	-69	-76
55	-2	-8	-15	-22	-29	-36	-43	-50	-57	-63	-70	-77
60	-2	-9	-16	-23	-30	-36	-43	-50	-57	-64	-71	-78
65	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-58	-65	-72	-79
70	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-58	-65	-72	-80
75	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-59	-66	-73	-80
80	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-60	-67	-74	-81

Où T_{air} = Température réelle de l'air en °C
V_{10} = Vitesse du vent à 10 mètres en km/h

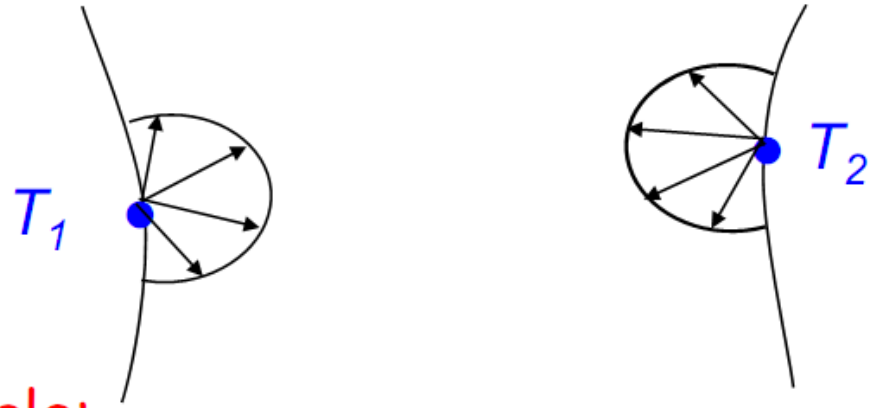
GUIDE CONCERNANT L'ENGELURE
Risque faible d'engelure pour la plupart des gens
Risque croissant d'engelure pour la plupart des gens en 10 à 30 minutes d'exposition
Risque élevé pour la plupart des gens en 5 à 10 minutes d'exposition
Risque élevé pour la plupart des gens en 2 à 5 minutes d'exposition
Risque élevé pour la plupart des gens en 2 minutes d'exposition ou moins

Adapté d'Environnement Canada www.msc.ec.gc.ca/education/windchill/windchill_chart_f.cfm

3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le mode de transfert de chaleur par rayonnement diffère fondamentalement des deux premiers modes.

- La chaleur se propage via des ondes électromagnétiques. Celles-ci ne nécessitent pas un contact entre les corps qui échangent.
- Contrairement aux autres modes de transmission de chaleur, le rayonnement ne nécessite pas de milieu, il peut donc s'effectuer dans le vide.



Loi fondamentale:

Tout corps, à température absolue non-nulle, émet des ondes électromagnétiques vers son environnement.

La puissance émissive est prédite par la loi de Stefan-Boltzmann:

$$q_r'' = E_b = \sigma T_s^4$$

où : T_s : Température de la surface [K]

q'' : flux de chaleur par unité de surface émettante [Watts/m²]

σ : constante de Stefan-Boltzmann = 5.67 E^{-8} W/m² K^4

Le flux de chaleur par rayonnement est très important à haute température.

Le flux de chaleur radiatif net sortant est défini par:

$$q''_{rad} = \sigma\left(\varepsilon T_s^4 - \alpha T_{surr}^4\right)$$

où : ε: l'émissivité du corps $0 \leq \varepsilon \leq 1$

α: l'absorptivité. $0 \leq \alpha \leq 1$

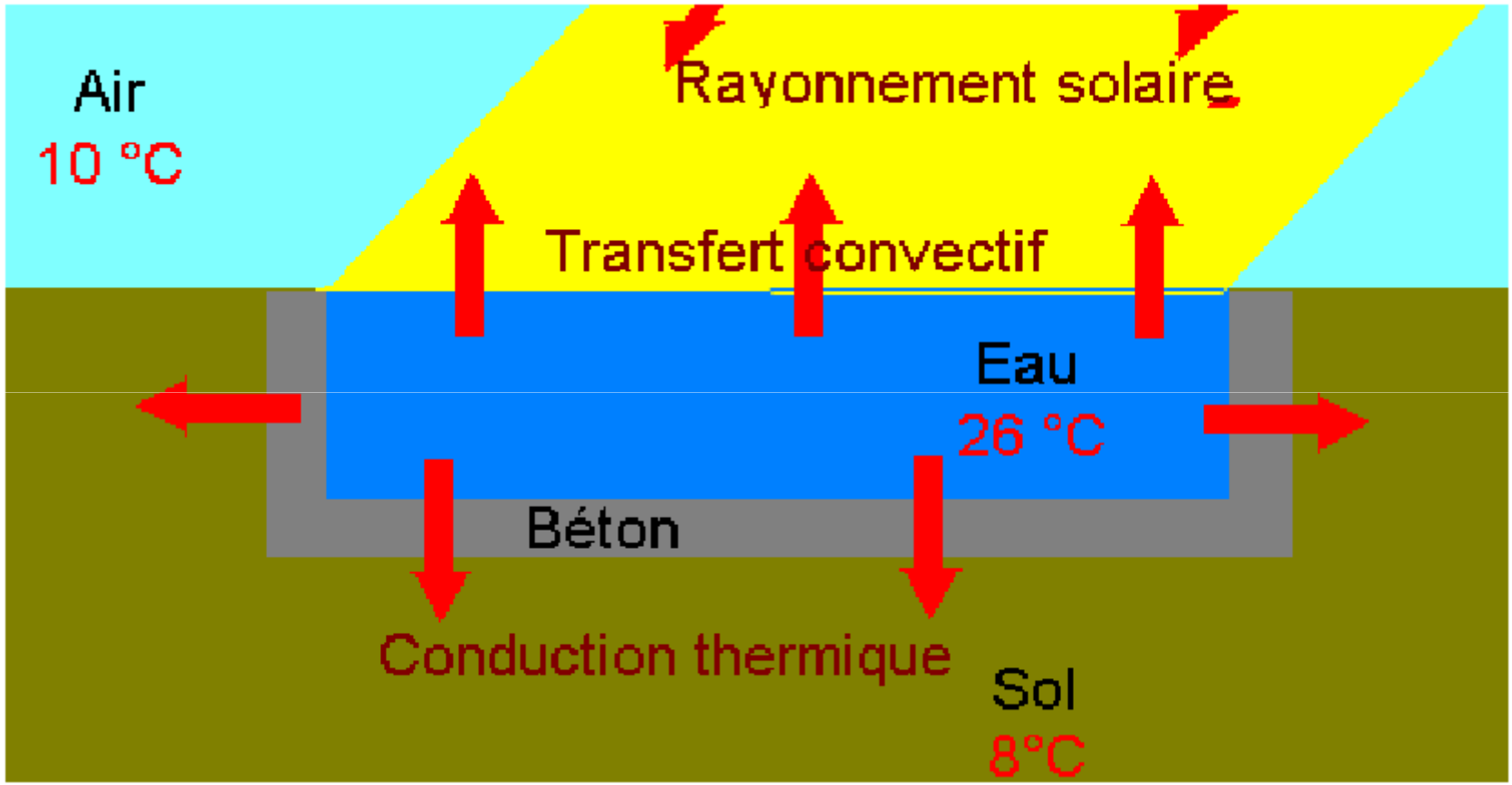
T_{surr}: température des surfaces autour [K]

Il peut être pratique de linéariser cette équation par l'ajout d'un coefficient de rayonnement:

$$q''_{rad} = h_r\left(T_s - T_{surr}\right)$$

$$h_r = \sigma\left(\varepsilon T_s^4 - \alpha T_{surr}^4\right) \Big/ \left(T_s - T_{surr}\right)$$

Exemple : Apports thermiques et déperditions d'une piscine



4. Régimes du transfert de chaleur

4.1 Régime permanent

En régime permanent, le temps n'est pas une variable intervenant dans les problèmes: la distribution de température est indépendante du temps ainsi que les flux de chaleur.

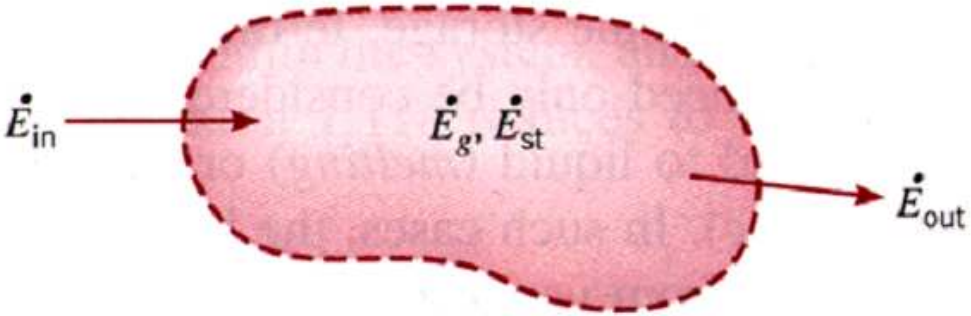
4.2 Régime transitoire

En régime transitoire, les flux de chaleur ainsi que les distributions de température sont des fonctions du temps. Nous verrons seulement la conduction unidimensionnelle en régime transitoire au chapitre 5

5. Principe de la conservation de l'énergie

1ière loi de la thermodynamique:

Le taux d'accroissement de l'énergie stocké dans un volume de contrôle doit égaler le taux auquel l'énergie entre dans le volume de contrôle moins le taux d'énergie sortant du volume de contrôle plus le taux d'énergie générée à l'intérieur des frontières du volume de contrôle.



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

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps (en l'absence de changement d'état):

$$\dot{E}_{st} = \rho V C \frac{\partial T}{\partial t} \qquad [W]$$

ρ: Masse volumique (kg m^{-3}), V: Volume (m^3), C: Chaleur spécifique (J kg^{-1} $°C^{-1}$), T: Température (°C),t: Temps

L'énergie générée intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$\dot{E}_g = \dot{q} V$$

$\dot{q}$: Densité volumique d'énergie générée (W/m^3), V: Volume (m^3)

6. Méthode de résolution des problèmes de TdC

1- Qu'est-ce qui est Connu? (comprendre l'énoncé)

2- Qu'est-ce qui est demandé? (comprendre la ou les questions)

3- Identifier les modes et lieux du TdC (schéma)

4- Emettre des hypothèses simplificatrices pertinentes et définir le volume de contrôle

5- Analyser en considérant les conditions initiales et aux limites

6- Elaborer la solution

7- Commenter la solution (sens physique, pertinence des hypothèses)

Exemple

Dans un four, les gaz de combustion sont séparés de l'air ambiant à 25°C, par un mur en briques d'épaisseur 15cm. La conductivité thermique du mur est de 1,2 W/mK et émissivité de sa surface est de 0,8.

En régime permanent, la température mesurée au niveau de la surface extérieure est de 100°C.

Le transfert par convection à l'air au voisinage de cette surface est caractérisé par un coefficient d'échange h=20W/m2K.

Quelle est la température de la surface intérieure?