

Master I: Architecture et Environnement

Matière: Sciences Pour L'architecture

COURS N° 01
Première partie

PHYSIQUE DE LA CHALEUR

Notions de base

Par: Melle HAMEL khalissa

RÉFÉRENCES

- SZOKOLAY S. V., *Introduction to Architectural Science. The Basis of Sustainable Design*. Architectural Press, AMSTERDAM, BOSTON, HEIDELBERG, LONDON, NEW YORK, OXFORD, PARIS, SAN DIEGO, SAN FRANCISCO, SINGAPORE, SYDNEY, TOKYO, 2008.
- LIÉBARD A. & DE HERDE A., Ed. *Traité d'Architecture et d'Urbanisme Bioclimatiques*, Obser'ER, Paris, 2005.
- CHATELET Alain, FERNANDEZ Pierre, LAVIGNE Pierre, *Architecture climatique, une contribution au développement durable*, Edisud, Aix-en-Provence, 1998.
- COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre, *La conception bioclimatique. Des maisons confortables et économes*, Edition terre vivante, Mens, 2006/2007. (cote : AV4/99)
- OLIVA J-P., *L'isolation écologique, conception, matériaux et mise en œuvre*, Edition terre vivante, Mens, 2001.
- GIVONI B., *L'homme, l'architecture et le climat*, Éditions du Moniteur, Paris, 1978.
- CNAM Paris – Ergonomie – Cours B1 – M. Millanvoye - 2002-2003.
- LIEBARD A. & DE HERDE A., *Guide de l'architecture bioclimatique*, Edition Systèmes solaires, Paris, 2002.
- MOREL N. & GNANSOUNOU E., *Energétique du bâtiment*, nouvelle édition du cours précédemment donné par Claude-Alain Roulet et Arnaud Dauriat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne, 2008.
- TIXIER N., *Bases physiques*, Cours d'environnement thermique et maîtrise énergétique, Ecole d'architecture de Grenoble. (Disponible sur: www.grenoble.archi.fr/etudes/cours-en-ligne-detail.php?ref=tixier-ambiances-thermiques)
- TIXIER N., *L'air en mouvement*, Cours d'environnement thermique et maîtrise énergétique, Ecole d'architecture de Grenoble. (Disponible sur: www.grenoble.archi.fr/etudes/cours-en-ligne-detail.php?ref=tixier-ambiances-thermiques)

Chaleur et température, deux grandeurs de nature différente

La chaleur est l'énergie liée à l'agitation aléatoire des molécules constituant la matière.

La chaleur est la manifestation de l'agitation moléculaire. Plus les molécules s'agitent, plus la chaleur dégagée est importante et inversement, plus on chauffe une molécule, plus elle s'agite (principe du four à micro-ondes).

L'énergie qui intéresse essentiellement l'architecture est la chaleur qui pénètre ou sort d'un édifice sous l'action de différences de température.

Ces deux paramètres sont liés à deux concepts:

- 1) Celui de **quantité**
- 2) Et celui de **potentiel**

La chaleur s'exprime par une quantité (elle se transfère, elle se compte, elle se consomme et donc peut se facturer)

La température exprime un état (et plus exactement un potentiel. Elle ne peut ni se transférer, ni donc se vendre)

*Par: HAMEL KHALISSA***1. Chaleur et température**

Chaleur et température, deux grandeurs de nature différente

La température peut être repérée par une échelle quelconque. On utilise :

1) L'échelle des degrés Celcius

Le zéro correspond à la température de fusion de la glace (repérage).

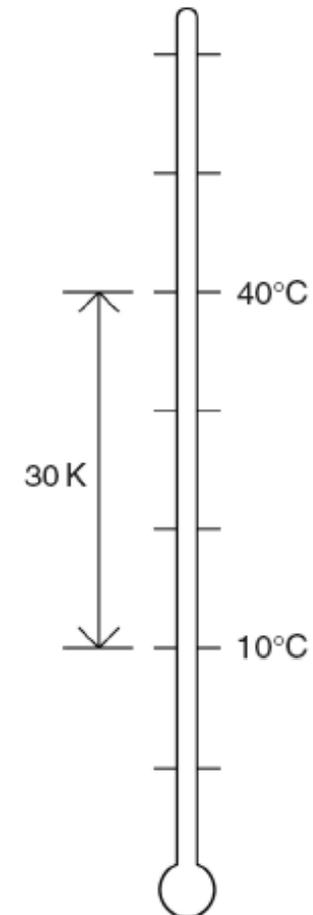
2) L'échelle des degrés Kelvin

L'origine est le zéro absolu (absence total de chaleur) : limite inférieure des températures. Le °K représente le potentiel thermodynamique.

Le 0 absolu correspond à $-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$.

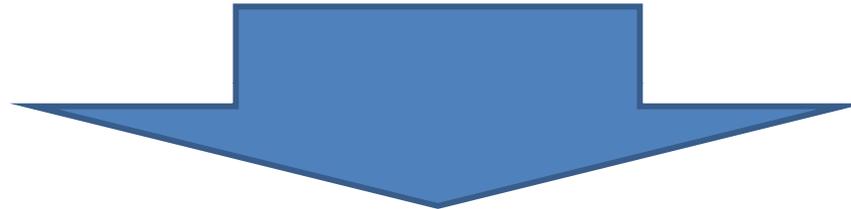
Pour désigner des écarts de température, qu'importe l'échelle utilisée

$$0^{\circ}\text{C} = 273,15^{\circ}\text{K}$$



Par: HAMEL KHALISSA**1. Chaleur et température**

Principe: Il y a transfert d'une quantité de chaleur quand il y a une différence de température (c'est-à-dire une différence de potentiel)



Le transfert de chaleur a lieu de la température la plus haute vers la plus basse.
C'est dans le cas général, en changeant de température qu'un matériau absorbe ou perd une quantité de chaleur.

La chaleur se compte, se transfère et se facture.

La température se mesure mais ne saurait se transférer ni se vendre

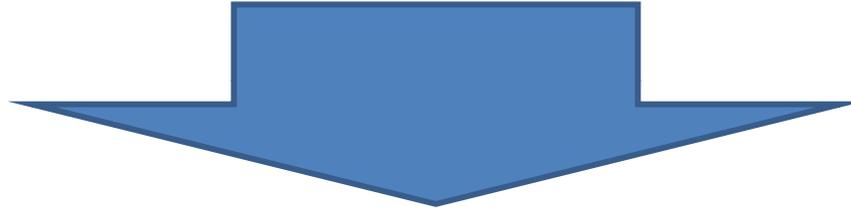
COURS N° 01

PHYSIQUE DE LA CHALEUR

Par: HAMEL KHALISSA

1. Chaleur et température

Lorsqu'un échange de chaleur provoque:



**Un changement de température,
on dit qu'il y a échange de
« chaleur sensible »**

**Un changement d'état, on dit qu'il
y a échange de
« chaleur latente »**

Par: HAMEL KHALISSA

1. Chaleur et température

La chaleur

Principe : Une quantité de chaleur Q s'exprime principalement en **Joule** (unité des énergies)

Il y a d'autres unités que le Joule (ou le Kilojoule kJ) : **la calorie** (cal) et **la thermie**

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ Joule}$$

et

$$1 \text{ th} = 4\,180 \text{ kJ}$$

Mais la quantité des échanges de chaleur dépend du temps (t) pendant lequel ils ont lieu:

On définit **la puissance thermique (P)**

$$P = Q / t$$

l'unité est le Watt (W) ou le Kil Watt (kW)

Q est exprimé en Joule, t est exprimé en seconde.

Pour exprimer la consommation (ex: compteurs électriques), on utilise le Watt.heure (W.h) et le Kilowatt.heure (kW.h) donc ainsi :

$$1 \text{ W.h} = 3\,600 \text{ J}$$

$$1 \text{ kW.h} = 3\,600 \text{ kJ}$$

Par: HAMEL KHALISSA

1. Chaleur et température

La chaleur

Principe : Une quantité de chaleur Q s'exprime principalement en **Joule** (unité des énergies)

SI multiples for joule (J)					
Submultiples			Multiples		
Value	Symbol	Name	Value	Symbol	Name
10^{-1} J	dJ	decijoule	10^1 J	daJ	decajoule
10^{-2} J	cJ	centijoule	10^2 J	hJ	hectojoule
10^{-3} J	mJ	millijoule	10^3 J	kJ	kilojoule
10^{-6} J	μJ	microjoule	10^6 J	MJ	megajoule
10^{-9} J	nJ	nanojoule	10^9 J	GJ	gigajoule
10^{-12} J	pJ	picojoule	10^{12} J	TJ	terajoule
10^{-15} J	fJ	femtojoule	10^{15} J	PJ	petajoule
10^{-18} J	aJ	attojoule	10^{18} J	EJ	exajoule
10^{-21} J	zJ	zeptojoule	10^{21} J	ZJ	zettajoule
10^{-24} J	yJ	yoctojoule	10^{24} J	YJ	yottajoule

Common multiples are in bold face

Par: HAMEL KHALISSA

1. Chaleur et température


شركة توزيع الكهرباء والغاز للوسط
 Société de Distribution de l'Electricité et du Gaz du Centre
 Fourniture d'énergie Electricité et Gaz
 BASSE TENSION / BASSE PRESSION
 Capital Social de 15 Milliards DA
 FACTURE N° 822110408591 établie le 08.05.11

Direction Distribution: Biskra FAX: 033740015
 N° RC: 01/0805455806 N° IS: 096916010012742 Dépannage Electricité: 71 22 22
 N° RIP: 00799999000038010626 N° RIB: 00100386030030016118 Dépannage Gaz: 71 22 22
 Agence Commerciale: BISKRA 2 RUE DU 20 AOÛT BISKRA 73 39 39
 Tél.:

Référence: 07817-74-25261-119 N° RC: CLIENT N° IS:
 Nom et Prénom: Tél.: Fax:
 Adresse lieu de consommation:
 Nom & adresse du Destinataire de facture:

Nous vous prions de bien vouloir régler cette facture par l'un des moyens indiqués au verso pour la période: 2eme Trimestre 2011

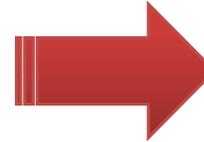
CONSUMMATIONS	TARIF	NUMERO	RELEVÉ DE COMPTEUR			COEF.	CONSUMMATIONS (kWh/THERMIE)
			Index Nouveau	Index Ancien	Différence		
PMD= 6 Kw	E01	304174	13220	12710	510	1,00	510
DMD= 5 m3h	083	106975	21836	20188	1648	9,75	16068

R: Relevé
 E: Estime
 M: Relevé Spéciale

DETAIL DE FACTURATION (en hors taxes)	PREMIERE TRANCHE	DEUXIEME TRANCHE	TROISIEME TRANCHE	PENALITES EXCEPTÉES			
	CONSUMMATION	PRIX UNITAIRE (DA)	CONSUMMATION	PRIX UNITAIRE (DA)	CONSUMMATION	PRIX UNITAIRE (DA)	
ELEC. E01	125,0	1,779	385,0	4,179			131,10
GAZ. 083	1125	0,168	14943	0,324			85,50

CALCUL DES TAXES ET RECAPITULATION	MONTANT HORS TVA (DA)		TVA		MONTANT TOUTES TAXES (DA)
			Taux %	Montant (DA)	
ELEC. E01	1962,38	07		137,36	Le montant de votre consommation moyenne d'énergie par jour: 2099,74 DA / jour
GAZ. 083	5116,03	07		358,12	
DROIT FIXE	100,00				
TAXE HABITATION	75,00			75,95	
TIMBRE	68,00				
Soutien Etat	981,19				Cle EBP: 418 981,19
Contribution aux coûts permanents du système:	15,07 D. A.				
	6340,22		495,48		TOTAL FACTURE A REGLER → 6835,70

La présente facture est arrêtée à la somme de: six mille huit cent trente cinq dinars algériens, 70 cts
 Avant le: 05.11



semestre 2011
CONSUMMATIONS
 (kWh/THERMIE)
 510
 16068

La chaleur spécifique

La chaleur spécifique (la chaleur massique)

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter l'unité de masse d'une substance d'un degré (1°C). Elle est mesurée en J/kg.K.

$$C = Q / \Delta\theta$$

(Quantité de chaleur / accroissement de température) pour une masse 1

Donc Pour chauffer une masse m [kg] d'un matériau de chaleur spécifique C [J/kg K], de la différence de température $\Delta\theta$ [K], il faut une quantité de chaleur Q [J] donnée par l'expression ci-dessous:

$$Q = m . C . \Delta\theta$$

1. Chaleur et température

La chaleur spécifique

Matériau	Chaleur spécifique
Métaux	100 à 800 J/kg.K
Matériaux de maçonnerie (brique, béton)	800 à 1200 J/kg.K
Eau	4176 J/kg.K

Exemples de chaleur massique (kJ / kg.°C) :

Eau :	4,18
Bois sec :	1,67
Air :	1,015
Brique (argile) :	0,92
Verre :	0,77
Acier :	0,50
Cuivre :	0,39

Par: HAMEL KHALISSA**1. Chaleur et température****La chaleur volumique**

Chaleur fournie ou reçue par un matériaux de masse M :

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta T \text{ pour une masse M différente de 1 kg}$$

En architecture, on utilise plutôt le volume comme unité de mesure.

$$M = \rho \cdot V \text{ (\rho étant la masse volumique en kg / m}^3\text{)}$$

On a : $Q = V \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta T$

$\rho \cdot C$ étant la chaleur volumique ($\text{kJ / m}^3 \cdot \text{°C}$) : C'est à dire la quantité de chaleur absorbée ou fournie par 1 m^3 de matériaux dont la température varie de 1°C

Par: HAMEL KHALISSA**1. Chaleur et température****La chaleur latente****La chaleur latente**

La chaleur latente d'une substance est la quantité de chaleur (énergie) absorbée par unité de masse de la substance au changement d'état (de solide au liquide ou liquide à gazeux) sans aucun changement dans la température. Ceci est mesuré en J / kg.

Par exemple pour l'eau:

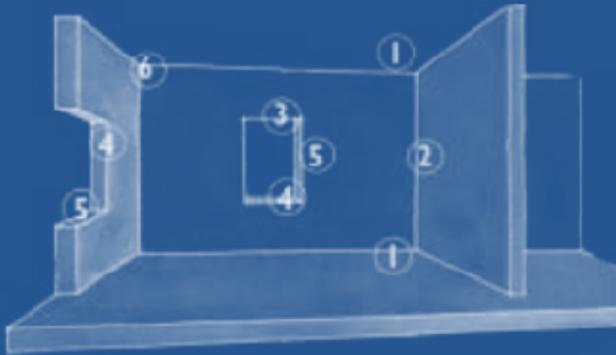
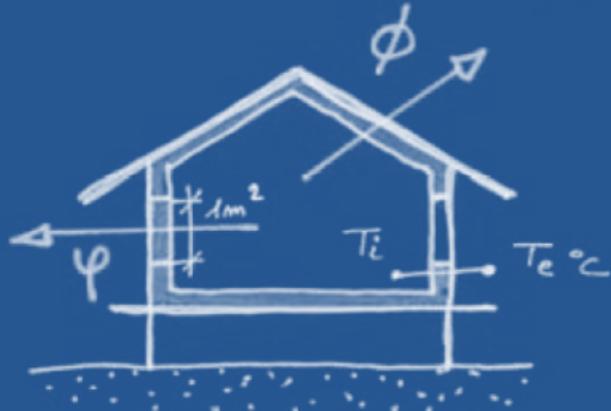
- Chaleur latente de fusion (glace à l'eau) à 0°C = 335 kJ/kg
- Chaleur latente d'évaporation à 100°C = 2261 kJ/kg
- À environ 18°C = 2400 kJ/kg

NB: Pour un changement d'état dans le sens inverse le même montant de la chaleur est libérée.

La thermodynamique est la science de l'écoulement de la chaleur et de ses relations avec le travail mécanique.

La première loi de la thermodynamique est le principe de la **conservation d'énergie**. L'énergie ne peut être créée ou détruite (sauf dans les processus subatomiques), mais seulement convertie d'une forme à l'autre. Dans tout système l'énergie produite doit être égale à l'apport d'énergie, sauf si il y a un + / - de stockage composant.

La deuxième loi de la thermodynamique, est que le transfert de la chaleur (ou énergie) peut avoir lieu spontanément dans une seule direction: **du chaud au froid**, ou plus généralement d'un niveau supérieur à un niveau plus bas (de même que le débit d'eau qui aura lieu uniquement en descente). Seulement avec un apport d'énergie externe qu'une machine pourra offrir de la chaleur dans le sens opposé (eau sera relevé que si elle est pompé).



Les principaux ponts thermiques d'un mur (doc. B. Boulangeot).

- 1 Liaisons murs-plancher ou murs-toiture
- 2 Liaisons refends-façades
- 3 Linteaux
- 4 Appuis de baies
- 5 Liaisons entre tableaux des baies et huisseries
- 6 Angles des murs

Flux : Passage d'un certain nombre de "choses" pendant un temps donné d'un endroit à un autre endroit.

Flux de chaleur : La quantité de chaleur passant au travers de 1 m^2 de paroi pendant 1 seconde

Noté ϕ - l'unité c'est le Watt / m^2 (on parle de densité de flux)

Noté Φ - Quand il s'agit d'une surface S, l'unité est le Watt

L'isolation : principe valable autant pour la stratégie du froid que pour celle du chaud.

L'isolation empêche la chaleur de partir... ou de rentrer !

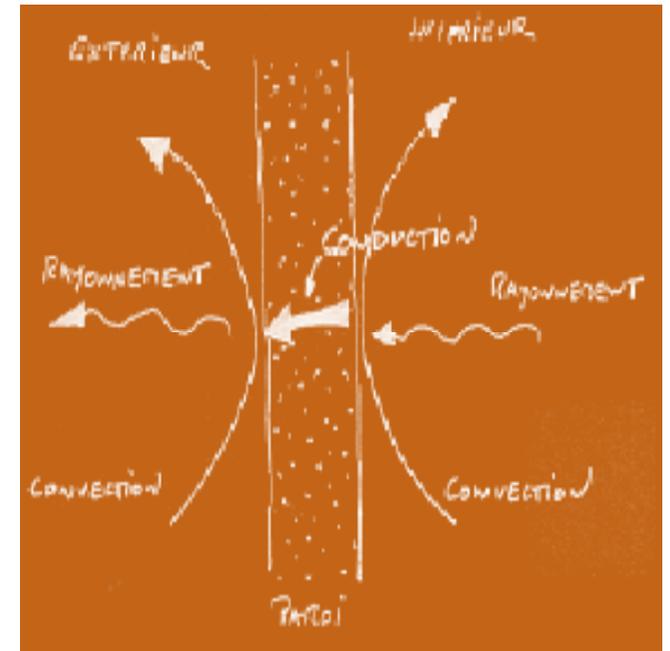
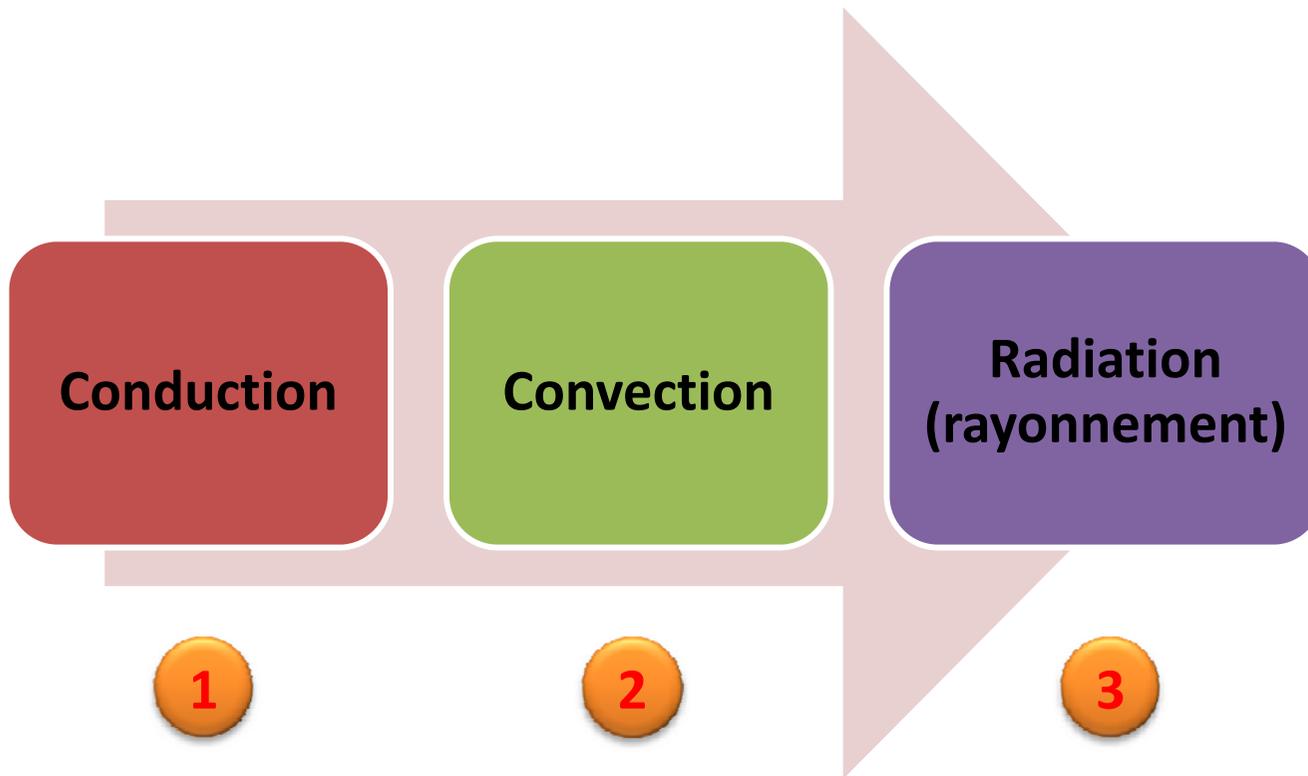
Les déperditions :

- **Surfaciques (parois)**
- **Linéiques (ponts thermiques)**
- **Par renouvellement d'air (infiltrations)**

2. Le flux de chaleur

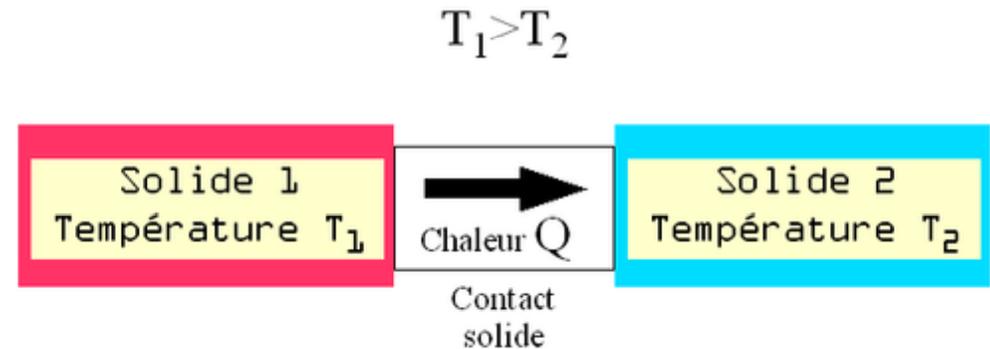
Modes de transfert de chaleur

La chaleur passe naturellement de zones chaudes aux zones froides, en utilisant essentiellement trois modes de transport:

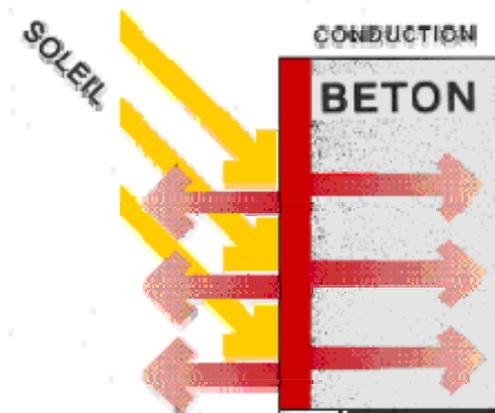


Conduction

La conduction: est la transmission de proche en proche de l'agitation moléculaire par chocs entre molécules;



La chaleur se propage en traversant la paroi de la face la plus chaude vers la face la plus froide. C'est par la conduction que la chaleur traverse les parois de notre habitation.

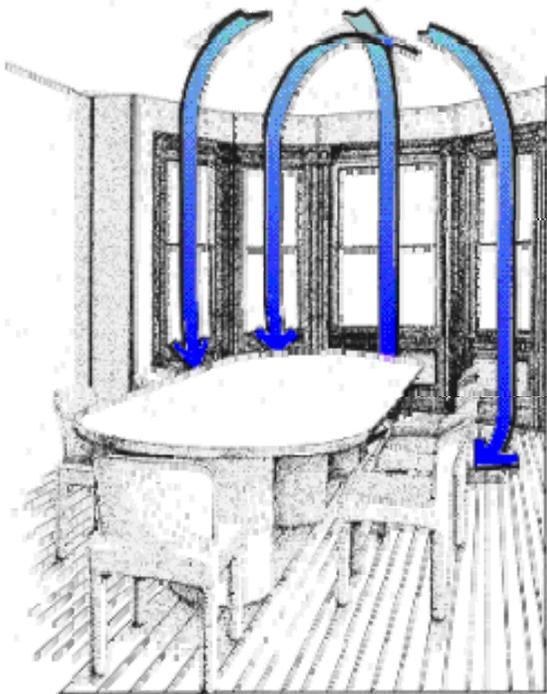
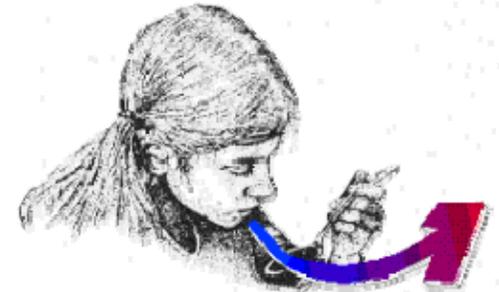
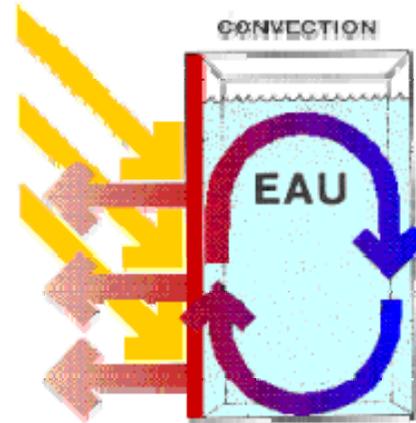


2. Le flux de chaleur

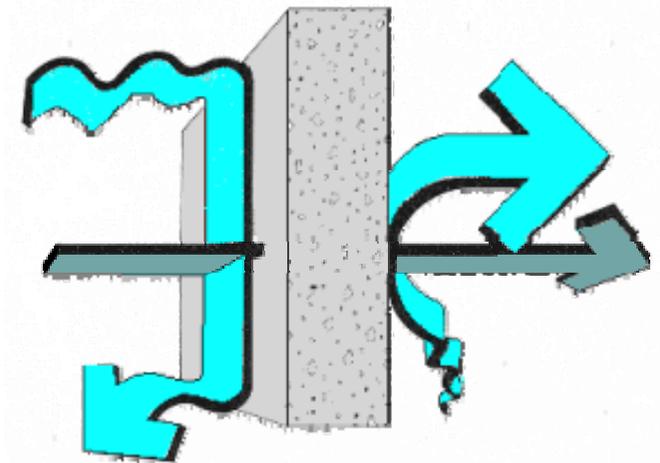
Modes de transfert de chaleur

Convection

La convection, transport de chaleur par transport (naturel ou forcé) de matières chaudes vers une zone froide ou vice versa;



L'air en contact avec la surface des parois s'échauffe ou se refroidit c'est ce qui créé un flux d'air qui transporte la chaleur.

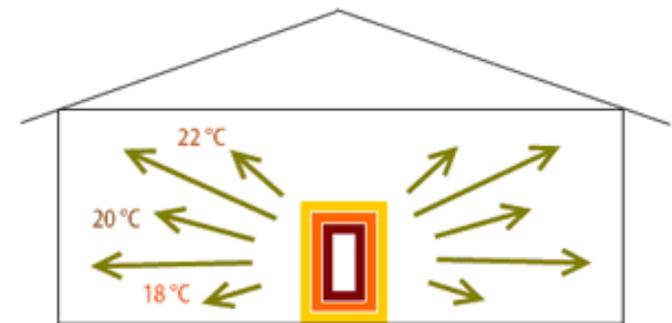
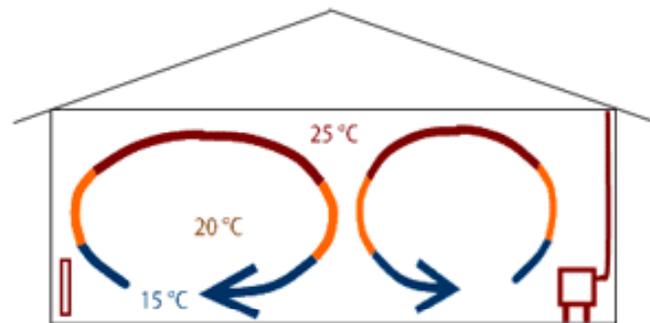
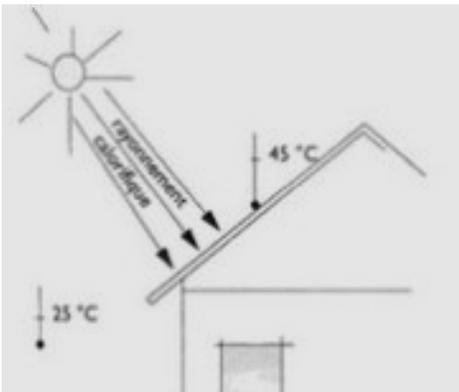
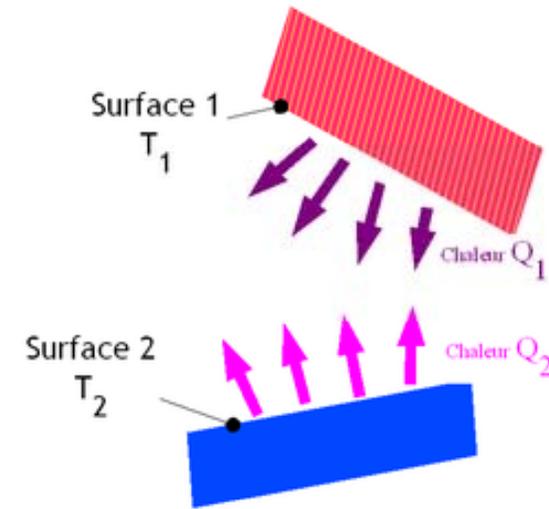


2. Le flux de chaleur

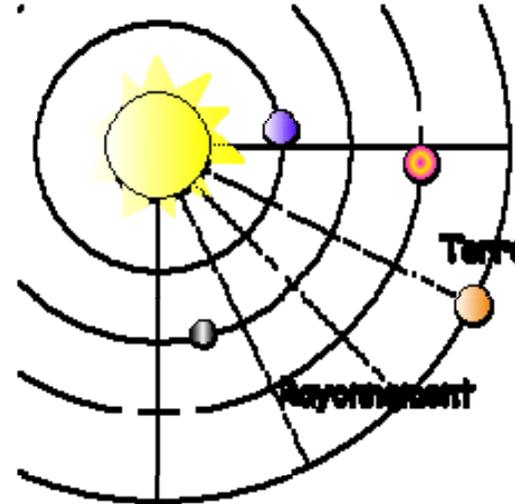
Modes de transfert de chaleur

Radiation (rayonnement)

Le rayonnement, ou transport de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique par les surfaces des corps;



Radiation (rayonnement)



Le rayonnement est fondamentalement différent des deux autres types de transfert de chaleur (conduction & convection), en ce sens que les substances qui échangent de la chaleur n'ont pas besoin d'être en contact l'une avec l'autre. Elles peuvent même être séparées par le vide. La manifestation la plus commune de ce phénomène est celle du rayonnement solaire qui nous parvient sur la terre après avoir parcouru une distance considérable dans le vide spatial.

Le rayonnement est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé.

Par: HAMEL KHALISSA

2. Le flux de chaleur

Modes de transfert de chaleur

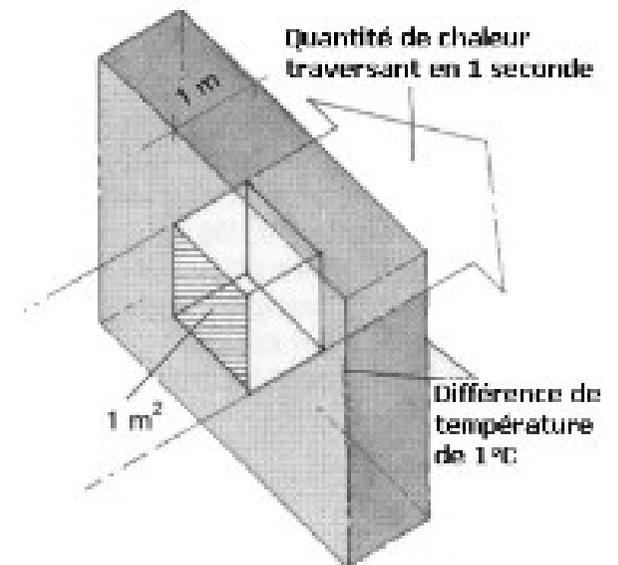
Conduction

Il y a conduction lorsque des molécules se déplacent d'un endroit à un autre et échangent la chaleur qu'elles contiennent.

La conduction dépend d'une propriété essentielle des matériaux appelée:
« la conductivité »

La conductivité thermique est la quantité de chaleur traversant en 1 seconde un matériau de 1m d'épaisseur et d'une surface de 1 m² lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1°C.

➤ Plus la conductivité est petite plus le matériau est isolant.



Elle s'exprime dans le système métrique par la lettre: « λ »

Unité: $W/m^2 \cdot ^\circ C/m = W/m \cdot ^\circ C$

Évolution de la température dans un matériau homogène d'épaisseur e
 (en régime thermique permanent : ΔT entre les deux faces, avec une densité de flux ϕ)

On observe alors l'évolution de température suivante :

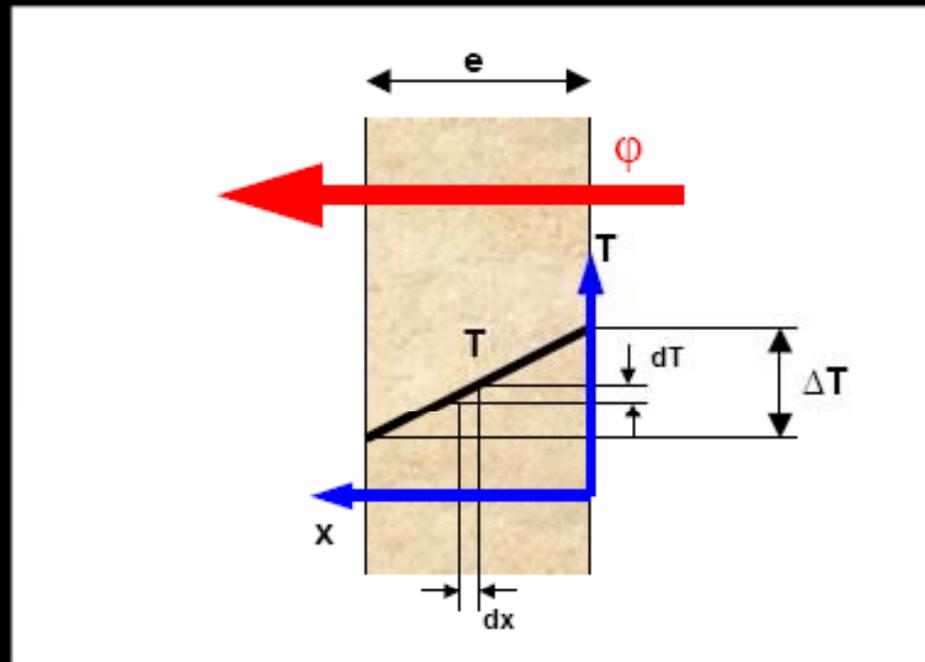


Schéma repris de "Architecture climatique" de Pierre Lavigne, Edisud.

On observe que ϕ est :

- Proportionnel à ΔT
- Inversement proportionnel à e (Δx)
- Dépend du matériaux

(Tiré du cours de Xitier Nicola)

On peut l'écrire sous la forme : $\phi = \lambda \Delta T / e$ λ est la conductivité thermique du matériau en $W / m.^{\circ}C$

Par: HAMEL KHALISSA

2. Le flux de chaleur

Modes de transfert de chaleur

Conduction

Les matériaux à faible conductivité thermique sont considérés comme des matériaux isolants. Ceux-ci ont une structure fibreuse ou poreuse et sont très sensible à l'humidité. Si les pores sont remplis d'eau, la conductivité va augmenter de manière drastique.

Les matériaux avec une structure en mousse (pores fermés) ne sont pas aussi sensibles.

**Conductivité thermique des matériaux courants pour la construction
(en W / m.°C)**

Cuivre	380
Aluminium	230
Zinc	112
Acier	52
Pierres lourdes	3,5 à 2,1
Pierres calcaires	2,9 à 0,95
Béton de granulats lourds	1,75 à 1,15
Terre cuite	1,15
Verre	1,15
Terre comprimée	1,05 à 1
Béton de granulats légers	1,05 à 0,19
Eau	0,59
Plâtres	0,5 à 0,35
Bétons cellulaires (autoclave)	0,33 à 0,16
Bois naturels	0,23 à 0,12
Lièges	0,1 à 0,043
Laine minérale	0,041 à 0,03
Matière plastique alvéolaire	0,044 à 0,02
Air (immobile)	0,0236

Par: HAMEL KHALISSA

2. Le flux de chaleur

Modes de transfert de chaleur

Conduction

Notez que les valeurs données dans le tableau précédant, ce sont des «valeurs déclarées», basée sur des tests de laboratoire. Les conditions d'exploitation dans le transport et sur les sites de construction, telles que les dommages des matériaux d'isolation sont souvent inévitables, réduisant ainsi leurs propriétés isolantes.

➤ Avant d'utiliser les valeurs λ telle valeur U pour les calculs, ils devraient être corrigés par un ou plusieurs facteurs de correction de conductivité: κ (kappa), qui sont cumulatifs:

$$\lambda_{\text{design}} = \lambda_{\text{déclarée}} \times (1 + \kappa_1 + \kappa_2 + \dots)$$

Matériau	Condition d'exploitation	κ
Polystyrène expansé	Entre les couches du béton	0.42
	Entre les couches du mur de maçonnerie	0.10
	En lame d'air ventilée (cavité)	0.30
	Avec enduit de ciment appliqué	0.25
Laine minérale	Entre les couches du mur de maçonnerie	0.10
Polyuréthane	En lame d'air ventilée (cavité)	0.15
Facteurs de correction de conductivité (κ)		

Conduction

Modes de transfert de chaleur

La conductivité est une propriété du matériau, quelle que soit sa forme ou sa taille. La propriété correspondante d'un corps physique (par exemple un mur) est: « **la conductance** » (**U**) mesurée entre les deux surfaces de la paroi.

La conductance exprime la capacité de conduire un flux Φ ou une densité de flux ϕ

$$U = \lambda / e \quad \text{en W / m}^2 \cdot \text{°C}$$

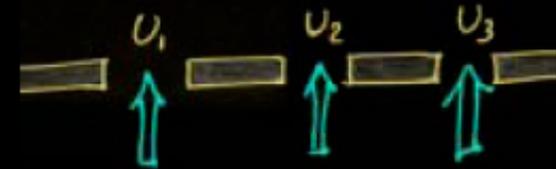
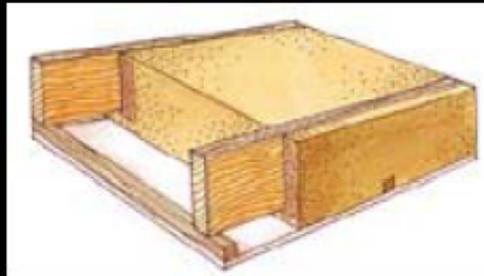
La résistance est l'inverse de la conductance . et inversement !

$$R = e / \lambda \quad \text{en °C. m}^2 / \text{W}$$

2 cas sont à considérer. Lorsque les éléments sont en :

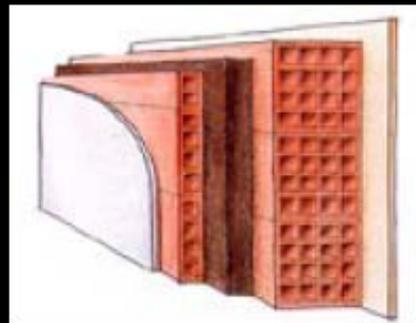
Parallèle :

• On additionne les conductances : $U_{total} = \sum U_n > u = U \cdot S$



Série :

• On additionne les résistances : $R_{total} = \sum R_n > r = R / S$



(Tiré du cours de Xitier Nicola)

Schémas in "L'isolation écologique" de Jean-Pierre Oliva, Ed. Terre vivante

Résistance (ou conductance) d'une paroi

Une paroi est constituée de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs et de conductivités différentes.

Selon les cas, les matériaux sont disposés soit en série, soit en parallèle.

Mais il faut ajouter au calcul des résistances des différentes couches, « **les résistances dites superficielles** ».

Elles correspondent au fait qu'au niveau des surfaces intérieures et extérieures de chaque paroi, il existe deux fines couches d'air quasiment immobiles.

Cette valeur R superficiel dépend de l'inclinaison de la paroi et de la vitesse de l'air (valeurs calculées pour un vent « moyen » à l'extérieur et un air calme à l'intérieur.

Elles sont données par les textes officiels du DTU (Documents techniques unifiés)

Donc, la densité de flux qui traverse (en série) différentes résistances est égale à la somme :

- Une résistance superficielle intérieure ($1 / h_i$)
- Une résistance superficielle extérieure ($1 / h_e$)
- Une résistance de la partie solide de la paroi

Par: HAMEL KHALISSA

2. Le flux de chaleur

Modes de transfert de chaleur

Résistance (ou conductance) d'une paroi

Valeurs des résistances superficielles

Pour les parois verticales, on prend $1/h_i + 1/h_e =$

0,17 pour une paroi intérieur / extérieur

0,22 pour une paroi intérieur / intérieur (espace tampon par exemple)

Pour les parois horizontales, on prend $1/h_i + 1/h_e =$

0,14 pour un plafond intérieur / extérieur

0,18 pour un plafond intérieur / intérieur (combles)

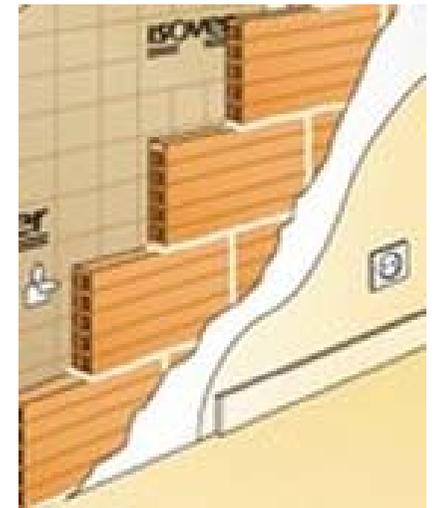
0,22 pour un plancher intérieur / extérieur

0,34 pour un plancher intérieur / intérieur (vide sanitaire, cave)

<p>Paroi d'inclinaison comprise entre 60 et 90°</p> 	<p>Paroi d'inclinaison comprise entre 0 et 60° flux ascendant</p> 	<p>d'inclinaison comprise entre 0 et 60° flux descendant</p> 
<p>e 2 à 10 cm : $R = 0,16$</p>	<p>$e \geq 3$ cm : $R = 0,14$</p>	<p>$e = 2$ cm : $R = 0,17$ $e = 4$ cm : $R = 0,18$ $e \geq 8$ cm : $R = 0,20$</p>

(Tiré du cours de Xitier Nicola)

Une paroi séparant l'intérieur de l'extérieur d'une habitation, constitue un obstacle au flux de chaleur. Une paroi est généralement constituée de plusieurs matériaux superposés (enduit extérieur + parpaing + laine de verre + plaque de plâtre). Dans ce cas, la résistance totale de la paroi est la somme des résistances de l'ensemble des matériaux.



Par: HAMEL KHALISSA

2. Le flux de chaleur

Modes de transfert de chaleur

Résistance (ou conductance) d'une paroi

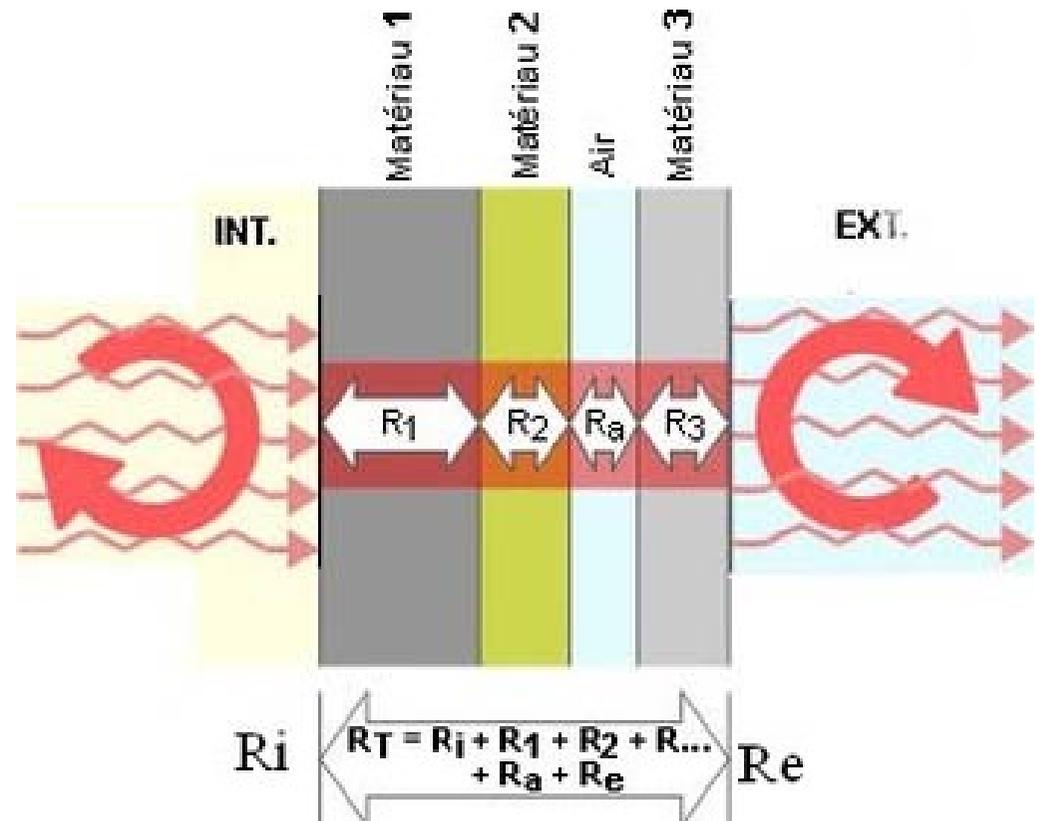
La chaleur va devoir :

-arriver jusqu'à la paroi (par convection et par rayonnement).

-traverser les différentes couches de matériaux constituant la paroi (par conduction).

-en cas de lame d'air, traverser des couches d'air éventuelles (par convection et par rayonnement).

-sortir de la paroi (par convection et par rayonnement).



R_t = La résistance thermique totale de la paroi au transfert de chaleur est la somme des résistances thermiques de l'ensemble des couches de matériaux + la résistance thermique d'échange d'une surface.

$$R_t = R_i + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_e$$

R_t = Résistance totale de la paroi au transfert de chaleur [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$]

R_i = résistance thermique d'échange d'une surface intérieure

R_1 = Résistance du matériau 1 au transfert de chaleur [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$]

R_2 = Résistance du matériau 2 au transfert de chaleur [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$]

R_n = Résistance du matériaux n

R_e = résistance thermique d'échange d'une surface extérieure