

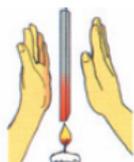
Transferts thermiques



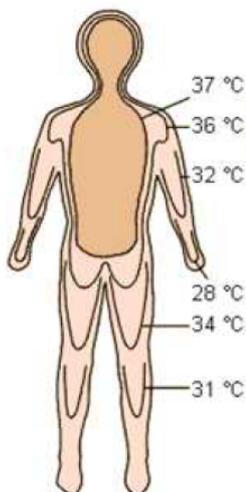
Conduction



Convection



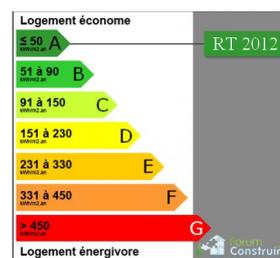
Rayonnement



Confort thermique



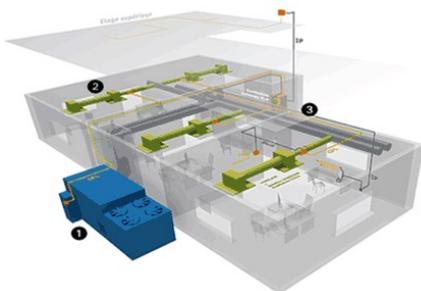
Réglementation



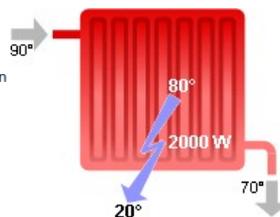
Isolation



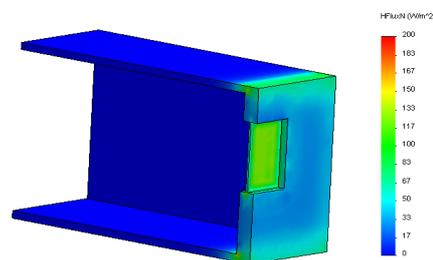
Climatisation



Radiateurs



Modélisation



Mesure



Table des matières

Le confort thermique.....	3
Les notions fondamentales de transferts de thermiques.....	4
Chaleur et température.....	4
Quantité de chaleur.....	4
Puissance thermique.....	5
Flux de chaleur.....	5
Échanges thermiques.....	5
Les modes de transfert thermique.....	6
Transferts thermiques par conduction.....	6
Transferts thermiques par convection.....	7
Transferts thermiques par rayonnement.....	8
Transferts thermique global.....	9
Analogie électrique.....	9
Résistance thermique.....	10
Coefficient de transmission thermique surfacique d'une paroi.....	10
Comportement thermique des bâtiments.....	11
L'isolation des bâtiments.....	11
Optimisation des déperditions par renouvellement d'air.....	14
Le chauffage et la climatisation.....	15
Chauffages électriques.....	15
Chauffage central.....	17
Poêles à bois.....	18
Les climatisations.....	18
Apports solaires.....	19
Apports par les occupants et les équipements.....	20
Modélisation du comportement statique d'un bâtiment.....	21
Modélisation du comportement dynamique d'un bâtiment.....	22
Bilan thermique d'un bâtiment.....	23
Les degrés jour unifiés :.....	23
Calcul du coefficient de transfert thermique d'un bâtiment.....	24
Déperdition.....	26
Calcul du coefficient de déperdition du bâtiment : U_{bat}	26
Interprétation de la balance énergétique d'un bâtiment.....	27
Calcul du besoin calorifique annuel.....	27
Rendement de l'installation de chauffage.....	28
Les réglementations thermiques.....	28
La RT 2005.....	28
RT 2012.....	30
Mesures.....	31
Thermomètre.....	31
Les sondes thermiques.....	31
Mesure à distance.....	33
Annexes.....	34

Le confort thermique

Définition du confort thermique selon ASHRAE et EN ISO 7730 :

« Ce sont les conditions dans lesquelles on ne peut dire si l'on a chaud ou froid vis à vis de son environnement ».

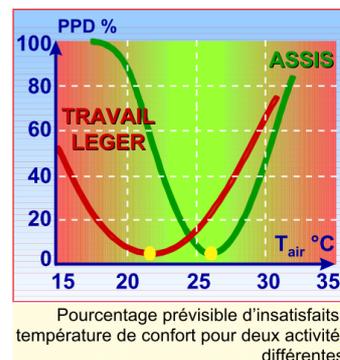
Ce qui induit une certaine subjectivité à la notion de confort ... !

Les deux courbes ci-contre montrent que :

- En fonction de l'activité, la température de confort est différente.
- Il n'y a pas une température qui convienne à tout le monde.

« ...Les sensations thermiques de l'homme sont liées principalement à l'équilibre thermique du corps dans son ensemble. Cet équilibre est influencé par son activité physique et par son vêtement ainsi que par les paramètres de l'environnement :

- température de l'air,
- température moyenne de rayonnement,
- vitesse de l'air,
- humidité de l'air.



Température de l'air normalisées

Pour résoudre le problème de subjectivité, la norme EN 12831 définit les températures normales en fonction des locaux.

Locaux types	Température intérieure de base [°C]
- Hôpitaux - Salons d'habillage - Salles d'eau, salles de douches	21
- Locaux d'habitation courants - Bureaux, salles de cours et de conférence - Cafés, cafétérias, restaurants	19
- Magasins, musées (vêtements d'extérieur conservés)	17
- Cuisines professionnelles - Gymnases	15
- Ateliers d'activité physique assez intense	12
- locaux de manutention lourde	10
- Garages chauffés (vêtements extérieurs conservés)	5

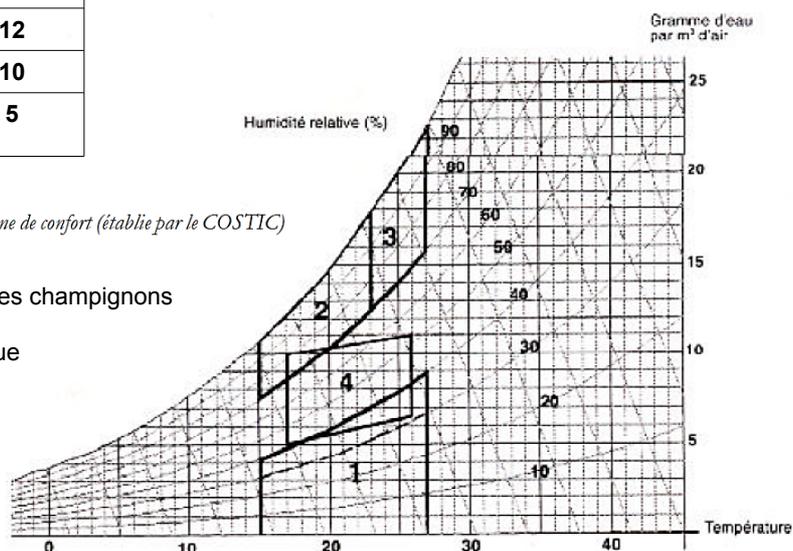
Vitesse de l'air :

Vitesse résiduelle de confort (m/s)	
Locaux d'hébergement, hôpitaux bureaux, salles de cours et de conférence	0,12
Locaux commerciaux Atelier	0,17
Locaux sportifs, grands magasins, bâtiments du transport, locaux industriels	0,25

Humidité de l'air :

- Zone 1 : Trop sec
Zone 2 et 3 : Développement des bactéries et des champignons
Zone 3 : Développement des acariens
Zone 4 : Polygone de confort hygrothermique

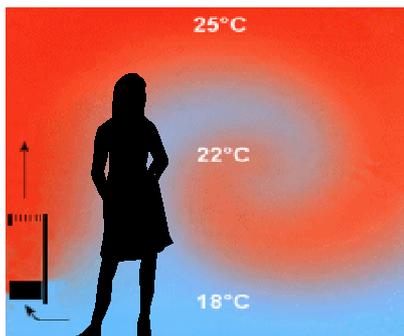
zone de confort (établie par le COSTIC)



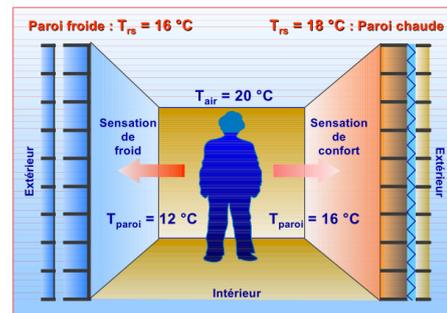
L'inconfort thermique :

L'inconfort thermique peut être causé par un refroidissement ou un réchauffement local non désiré du corps.
Les causes d'inconfort local les plus courantes sont :

- l'absence de chaleur rayonnante comme celle du soleil ou d'un poêle ou d'un mur chaud ...
- l'asymétrie horizontale de température,
- l'hétérogénéité verticale de la température,
- la vitesse de l'air (les courants d'air),
- l'humidité de l'air (trop sec ou trop humide)



**hétérogénéité verticale
de la température**



Source : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique

**Asymétrie horizontale
de la température**

Ce sont essentiellement les paramètres liés à la température qui sont au cœur des préoccupations de ce qui suit.

Les notions fondamentales de transferts de thermiques

Chaleur et température

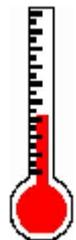
La **chaleur** est une énergie créée par l'agitation des particules d'un corps.

La **température** représente l'état d'échauffement d'un corps.

La température peut s'exprimer en degré Celsius « °C » ou en Kelvin « K ». $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273$

0 °K représente la température la plus basse possible, on l'appelle le zéro absolu.

A cette température il n'y a plus d'agitation particulaire.



Quantité de chaleur

La **quantité de chaleur** est l'énergie calorifique échangée ou contenue par un corps. Elle est notée Q .

Son unité est le joule « J ».

Pour élever la température d'un corps de masse M de T_1 à T_2 , Il faut une quantité de chaleur :

$$Q = M \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad C_p \text{ est la chaleur massique du corps.}$$

A noter que si le corps refroidit de T_2 à T_1 , il restituera la même quantité de chaleur Q qui sera comptée avec un signe moins du point de vue du corps considéré.

Remarque : La chaleur latente de changement d'état sans application directe dans la thermique des bâtiments n'est pas étudiée ici.

Puissance thermique

La **puissance thermique** correspond à un débit de chaleur $P = \Phi = \frac{dQ}{dt}$,

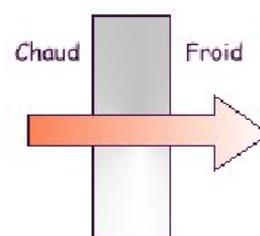
La puissance s'exprime en «J/s» ou Watts «W».

Flux de chaleur

Le **Flux de chaleur** est la puissance thermique par unité de surface. Il est noté φ il s'exprime en W/m^2 .
Comme la chaleur elle même, il va du CHAUD vers le FROID.

Le flux total à travers une surface est noté Φ en W.

$\Phi = \varphi \cdot S$ Avec S l'aire de la surface traversée par φ

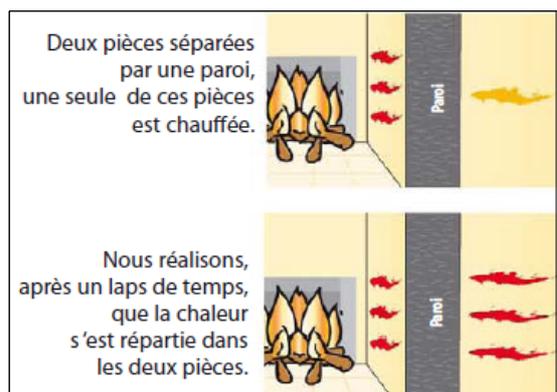


Échanges thermiques

Le *Principe zéro de la thermodynamique* stipule que :

- Deux corps en contact prolongé se mettent en équilibre thermique.
- Deux corps en équilibre thermique avec un troisième sont en équilibre thermique entre eux.
- Tous les corps en équilibre thermique entre eux ont la même température.

On en déduit donc que pour qu'il y ait transfert d'énergie, il faut une différence de température.



Catalogue Réseau pro

Les échanges thermiques entre solides, fluides ou gaz chaud et froid sont dus à plusieurs phénomènes :

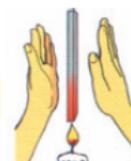
Conduction



Convection



Rayonnement



Les modes de transfert thermique

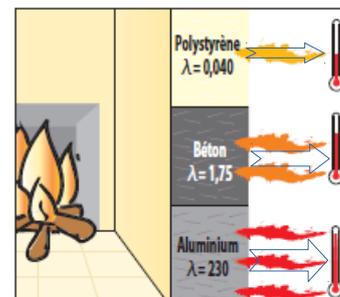
Transferts thermiques par conduction



La conduction est la transmission de la chaleur à l'intérieur d'un matériau.

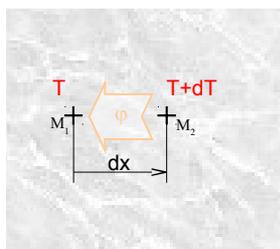
La conductivité thermique λ traduit l'aptitude du milieu à transmettre la chaleur.

Les valeurs de conductivité thermique des principaux matériaux sont données en annexe.



Catalogue Réseau pro

Equation de la conductivité :



Imaginons deux points M_1 et point M_2 , très proches l'un de l'autre. La distance qui les sépare est dx (elle est infime).

Le point M_1 est à la température T_1

Le point M_2 est à une température très proche : $T_2 = T_1 + dT$

On a la relation suivante :

$$\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Avec :

φ le flux de chaleur en W/m^2
 λ la conductivité en $W/(m \cdot ^\circ C)$
 T la température en $^\circ C$ ou $^\circ K$
 x la position en m

Remarque :

Le flux est dans le sens opposé à dx quant dT est positif. Ceci explique le signe moins dans la relation ci-dessus.

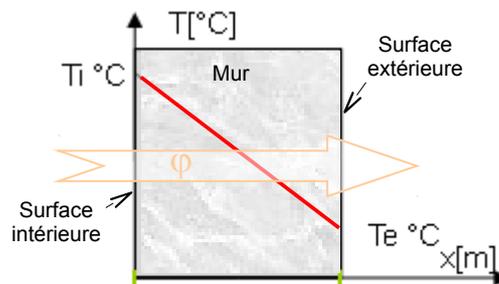
Hypothèses d'un régime permanent dans un matériau homogène :

- Si le matériau est homogène alors λ est constante.
- Si les températures sont constantes alors φ est constant.

Avec ces 2 hypothèses : $\frac{dT}{dx} = a = Cste = -\frac{\varphi}{\lambda}$

L'équation des températures dans la paroi est donc de la forme :

$$T(x) = ax + b$$



Profil de température dans un mur
(D. COURNET)

Transferts thermiques par convection

Le phénomène

La convection est un phénomène de propagation de la chaleur par transport de matière.

Ce phénomène ne concerne donc que les fluides (liquide ou gazeux).

Exemple : Convection naturelle au sein d'un convecteur.

La convection naturelle

Exemple : L'air chaud moins dense monte et l'air froid plus dense descend.

L'air se déplace donc.

De tels déplacements s'appellent des *mouvements de convection*.

La convection forcée

La convection est dite forcée quand un phénomène autre que la thermique provoque le déplacement du fluide. Exemples : Vent, ventilateur, ...

Le transfert thermique est plus rapide que dans le cas de convection naturelle.

Expression du flux de convection

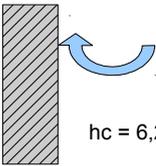
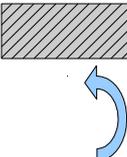
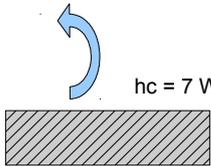
$$\text{Avec } \varphi = h_c \cdot (T_s - T_\infty)$$

- φ le flux de chaleur en W/m^2
- h_c : coefficient d'échange par convection en $W/(^{\circ}C.m^2)$
- T_s La température en surface de la paroi en $^{\circ}C$ ou K
- T_∞ la température à l'infini, c'est à dire suffisamment loin de la paroi en $^{\circ}C$ ou K

Ordres de grandeur dans le cas de l'air.

En convection naturelle :

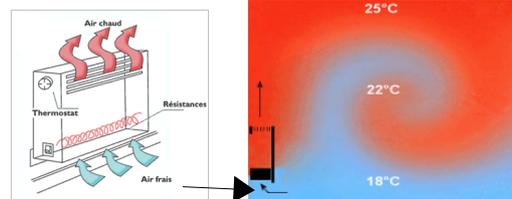
Puisque l'air chaud monte, l'intensité de la convection naturelle **dépend de l'orientation** de la paroi d'échange.

Paroi verticale	Paroi horizontale type plafond	Paroi horizontale type plancher
		
$h_c = 6,25 W/(^{\circ}C.m^2)$	$h_c = 5 W/(^{\circ}C.m^2)$	$h_c = 7 W/(^{\circ}C.m^2)$

En convection forcée :

La convection forcée dépend essentiellement de la vitesse de déplacement du fluide indépendamment de l'orientation de la surface d'échange.

Dans le cas d'un mur en extérieur avec un **vent moyen** on peut prendre : $h_c = 30 W/(^{\circ}C.m^2)$



Convection naturelle
<http://www.radiateur-electrique.org/convecteur-electrique.php>



Convection forcée
Ventilateur Bestron

Transferts thermiques par rayonnement



Le phénomène

Wikipédia :

« Par définition, le transfert se fait par rayonnement électromagnétique. Quelle que soit sa température, un corps émet un rayonnement thermique, celui-ci est plus ou moins intense selon cette température. La longueur d'onde à laquelle est émise ce rayonnement dépend aussi de cette température. Ainsi, le rayonnement thermique émis par le Soleil est situé principalement dans le visible. Des corps plus froids comme les mammifères émettent quant à eux dans l'[infrarouge](#). »

Exemple :

Le soleil nous chauffe à distance en traversant l'espace vide où il n'y a donc ni conduction, ni convection. Ce mode de transfert de la chaleur est le **rayonnement** électromagnétique.

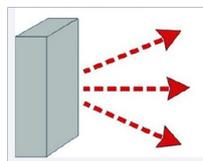
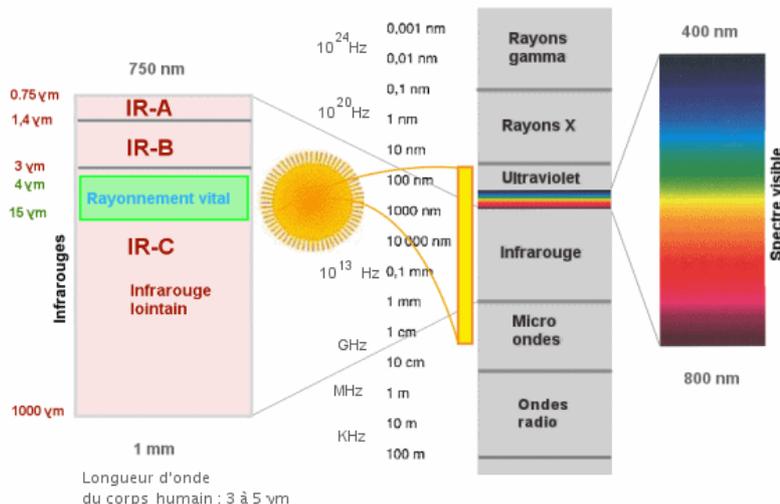


Une partie de ce rayonnement électromagnétique est visible. C'est la lumière visible.

Nous percevons les couleurs de l'arc en ciel, mais les autres couleurs nous chauffent aussi :

Les **Ultra violets** ont des fréquences plus élevées que les couleurs visibles

Les **Infrarouges** ont des fréquences plus faibles que les couleurs visibles.



Rayonnement d'un corps
(Mémento Technique du bâtiment - CERTU)

Tous les corps visibles dont la température excède 0°K émettent un rayonnement. De même tous les corps perçoivent le rayonnement des autres corps.

La couleur intervient dans l'échange thermique par rayonnement :

Les **corps noirs** sont les plus sensibles aux rayonnements. C'est pourquoi les tubes d'un chauffe-eau solaire sont noirs.

Les **corps blanc** le sont beaucoup moins. C'est pourquoi les maisons des pays chauds sont plutôt blanches pour éviter de trop chauffer.

Les matériaux métalliques bloquent le rayonnement. C'est pourquoi les couvertures de survie ou les isolants minces sont métallisés.



Complément d'optique :

Si un objet nous apparaît avec une couleur, c'est qu'il réfléchit les rayons lumineux correspondant à cette couleur et qu'il absorbe les autres. C'est pourquoi la couleur des objets ne nous apparaît que le jour et pas la nuit. Le noir correspond à l'absence de lumière. Un corps noir ne reflète aucune lumière et absorbe donc tout le rayonnement lumineux.

Expression du flux thermique rayonnant émis par une paroi

La chaleur échangée par rayonnement dépend de la température des corps et de leur émissivité (liée à leur couleur). Une expression simplifiée du flux de chaleur par rayonnement est la suivante :

$$\varphi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4)$$

Avec : φ : le flux de chaleur en W/m^2

ε : l'émissivité du matériau (sans unité), voir les **valeurs en annexe**.

σ : la constante de Stefan – Boltzmann (**$5,6703 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$**)

T_s : la température en surface de la paroi en °C ou K

T_∞ : la température à l'infini, c'est à dire suffisamment loin de la paroi en °C ou K

Irradiation du soleil

Le rayonnement solaire se décompose en deux rayonnements :

Rayonnement solaire "global" = "rayonnement direct" + "rayonnement diffus"

A l'ombre, on est principalement exposé au rayonnement diffus.

L'irradiation I_R s'exprime en $kW \cdot h/m^2$

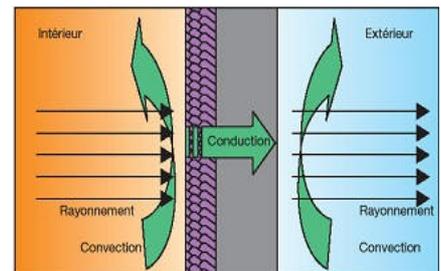
Calsol est un logiciel en ligne qui permet d'estimer entre autre l'irradiation (voir en **annexe** un exemple de résultat).

Transferts thermique global

Conduction, convection et rayonnement ont été présentés séparément mais ces trois modes de transferts cohabitent.

Ainsi pour une paroi on retrouve les 3 phénomènes qui s'additionnent :

- **Conduction** à l'intérieur des matériaux
- **Convection** et **Rayonnement** entre l'air ambiant (intérieur et extérieur) et la paroi.



Analogie électrique

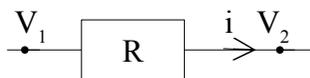
La conduction thermique dans les solides est semblable à celle de l'électricité dans les conducteurs électriques.

Dans un conducteur, le *flux d'électricité* est entraîné par une **différence de potentiel** et le *flux de chaleur* est lui entraîné par une **différence de température**.

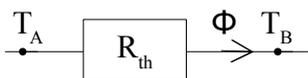
Conduction électrique	Conduction thermique
Potentiel électrique : V (V)	Température : T (K)
Intensité électrique : I (A)	Flux thermique : Φ (W)
Différence de potentiel : $U = \Delta V = V_1 - V_2$	Différence de température : $\Delta T = T_1 - T_2$
Résistance électrique = R (Ω)	Résistance thermique : $R_{\text{thermique}}$ ($^{\circ}K/W$)
Conductivité électrique σ ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	Conductivité thermique λ ($W/m \cdot ^{\circ}K$)

Résistance thermique

Par analogie avec l'électricité on peut mettre en parallèle les relations suivantes :



Électricité : $U = V_1 - V_2 = RI$



Thermique : $T_A - T_B = R_{th} \cdot \Phi = r_{th} \cdot \Phi$
 $^{\circ}K = K/W \times W = m^2 \cdot ^{\circ}K/W \times W/m^2$

On peut donc définir une *résistance thermique*, jouant dans le transfert de chaleur un rôle comparable à la *résistance électrique*.

Dans le Plan : $R = \frac{e}{\lambda \cdot S}$ en $^{\circ}K / W$

Avec : e est l'épaisseur de la paroi (m)

λ est la conductivité thermique de la paroi ($W/m \cdot ^{\circ}K$)

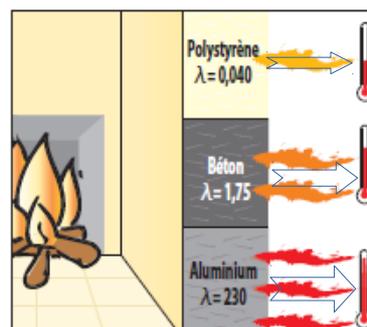
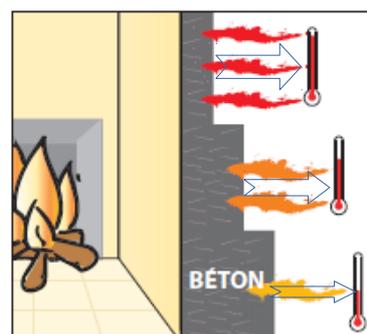
S est la surface de la paroi (m^2)

Comme illustré ci-contre, la résistance thermique dépend de la nature du matériau et de ses dimensions.

Remarque :

Les professionnels utilisent couramment la résistance thermique pour $1 m^2$ d'isolant pour comparer leurs performances.

Ils devraient la noter « r » mais beaucoup la note R. Il faut donc être vigilant avant de prendre pour les calculs des valeurs issues des catalogues.



Catalogue Réseau
pro

$$r = \frac{e}{\lambda} \text{ en } m^2 \cdot K/W \quad \text{et donc : } R = \frac{r}{S}$$

Coefficient de transmission thermique surfacique d'une paroi

L'inverse de la résistance thermique est le coefficient de transmission surfacique.

$$U = \frac{1}{r_p} \text{ en } W / m^2 \cdot K$$

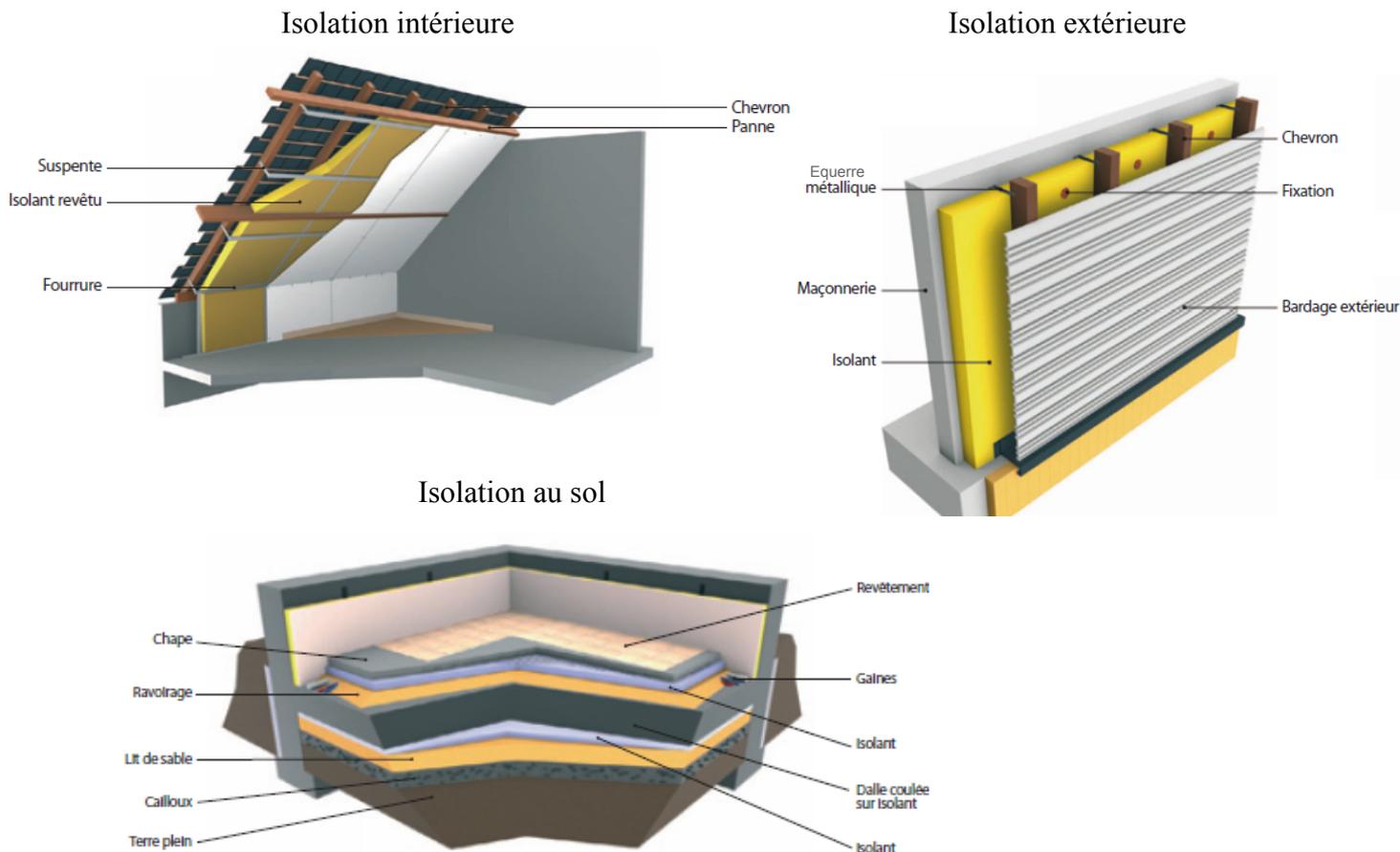
La notion de Ubat est très utilisée. Elle définit pour un bâtiment, le coefficient moyen de transmission des surfaces en contact avec l'extérieur. Elle permet de comparer la qualité de l'isolation de différents bâtiments.

Comportement thermique des bâtiments

L'amélioration du comportement thermique des bâtiments passe par l'optimisation de l'isolation et des pertes par renouvellement d'air.

L'isolation des bâtiments

Structures courantes des isolations



Optimisation des pertes par conduction

Rappel de la page 10 :

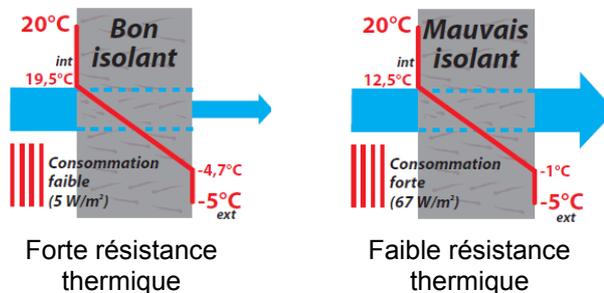
$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

Avec : e est l'épaisseur de la paroi

λ est la conductivité thermique de la paroi

S est la surface de la paroi

Chacun des 3 paramètres ci-dessus fait l'objet d'une optimisation pour améliorer l'isolation d'un bâtiment.



Optimisation de la conductivité λ

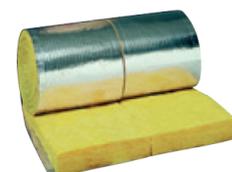
L'air étant un très bon isolant, on essaiera autant que possible d'enfermer des volumes d'air qui serviront d'isolants.

C'est le principe de beaucoup d'isolants classiques comme la laine de verre qui est en grande partie isolante grâce à l'air qu'elle emprisonne.

Le choix des matériaux pour la construction et pour les isolants est très importants.

Remarque : En complément de la résistance thermique certains isolants intègrent une feuille métallisée pour bloquer les déperditions de chaleur par rayonnement.

Voir tableau de valeurs en annexe et le catalogue Réseau pro pour plus de détail.



Le verre est un mauvais isolant.

Là encore l'air peut améliorer la situation. Le double vitrage permet d'enfermer une fine couche d'air (ou de gaz) entre deux couches de verre.

L'air ainsi emprisonné augmente considérablement la résistance thermique du vitrage.

	Simple vitrage	Double vitrage
Résistance thermique unitaire : r ($m^2.K/W$)	0,17	0,3

Il n'en reste pas moins que d'un point de vue isolation, il faudrait limiter les surfaces vitrées.

Par contre les surfaces vitrées permettent de récupérer la chaleur et la lumière du soleil. Globalement une surface vitrée astucieusement définie peut donc être bénéfique pour la globalité d'un bâtiment.

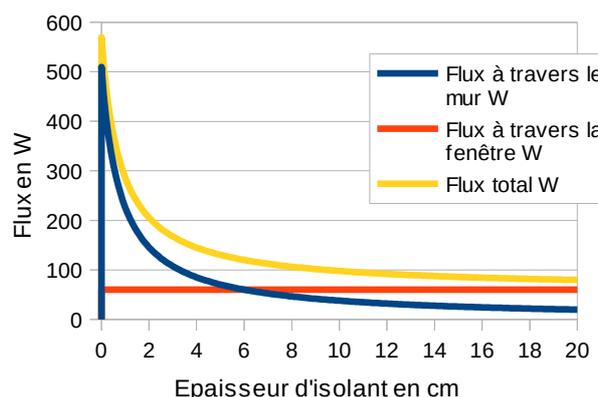
Optimisation de l'épaisseur e

D'un point de vue thermique, il est intéressant d'augmenter l'épaisseur des isolants.

« Un gros pull tient plus chaud qu'un Tee shirt »

Techniquement une forte épaisseur d'isolant peut être difficile à installer en particulier dans le cas d'une rénovation.

En effet, une forte épaisseur isolant sur l'intérieur vient diminuer l'espace habitable et en extérieur peut conduire à des modifications lourdes (ossature, charpente, toiture, ...).



Le graphique ci-contre montre l'influence de l'épaisseur d'isolant sur les déperditions thermiques.

Le calcul s'appuie sur une paroi de $9m^2$ au total dont $1m^2$ vitré en double vitrage.

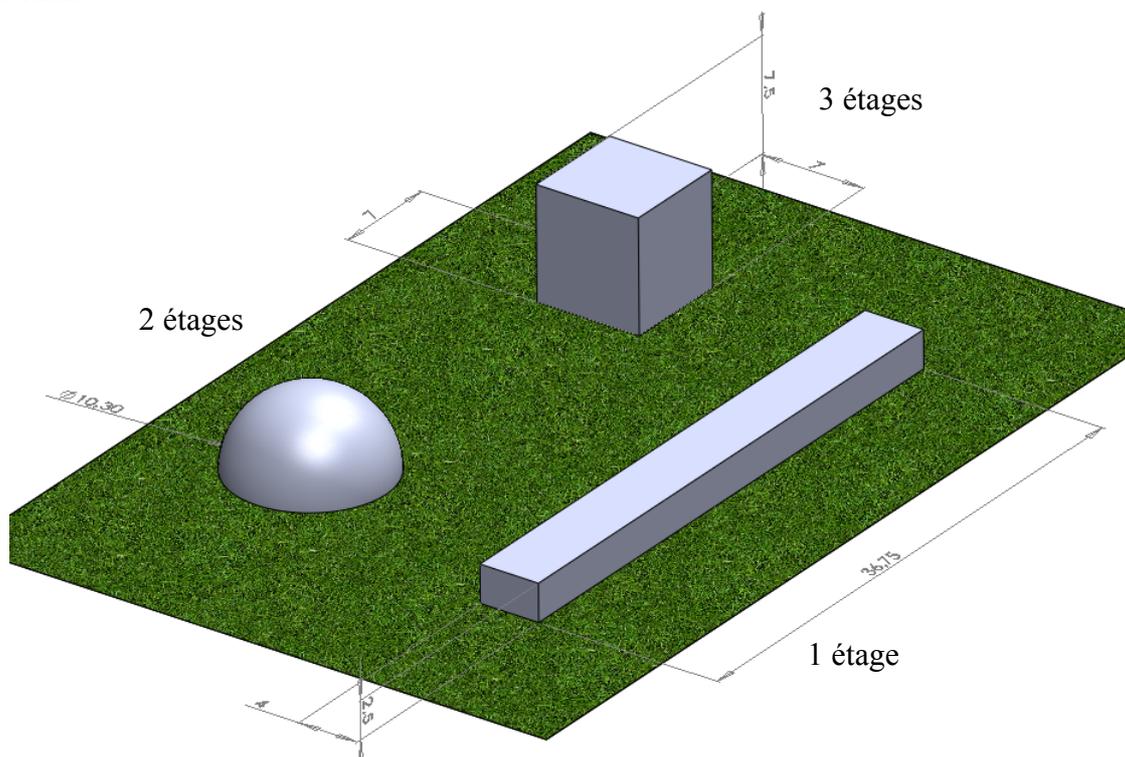
On peut remarquer que les premiers 5 cm divisent par 4 les déperditions. En passant l'épaisseur de 5 à 10cm, les déperditions sont divisées par 2. Au-delà en passant de 10 à 20 cm par exemple, le gain n'est plus que de 20%.

La part des pertes thermiques par la vitre est constante et devient prépondérante à partir de 15cm d'isolant. Au-delà il est sans doute plus efficace de travailler sur les fenêtres en utilisant des volets par exemples.

Optimisation de la surface d'échange S

Pour améliorer l'isolation d'un bâtiment, il faut tant que possible réduire sa surface d'échange avec l'extérieur.

A titre d'exemple se trouvent ci-dessous 3 modèles de bâtiments ayant la même surface habitable et représentés à la même échelle.



Bâtiment	Nbre d'étages	Dimensions			Surface habitable	Surface d'échange
		l = 4 m	L = 36,75 m	H = 2,5 m		
En longueur	1	l = 4 m	L = 36,75 m	H = 2,5 m	147 m ²	334 m ²
Cubique	3	L = 7 m		H = 7,5 m	147 m ²	242 m ²
Dôme	2	D = 10,3 m			147 m ²	167 m ²

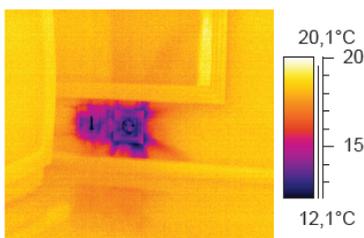
On peut constater que la surface d'échange thermique avec l'extérieur dépend très sensiblement de la forme du bâtiment.

De manière générale plus un bâtiment sera « ramassé » plus sa surface d'échange sera réduite.

Optimisation des déperditions par renouvellement d'air

Le renouvellement de l'air peut être du à une mauvaise étanchéité à l'air du bâtiment.

Les prises sont une source classique de prise d'air extérieure comme montré ci-dessous.



Thermographie infra-rouge :
Prises électriques

Les VMC double flux ou les puits canadiens apportent des solutions à cette contradiction.

Pour limiter les pertes thermiques par renouvellement de l'air, il faut donc **améliorer étanchéité à l'air des bâtiments**

Cependant pour des raisons d'hygiène l'air doit être renouvelé. A titre d'exemple pour les locaux professionnels :

Débits hygiéniques minimum en m ³ /h.m ²	
Bureau individuel	2,9
Bureau commun	2,5
Salle de réunion	8,6
Auditoire, salle de conférence	23
Restaurant, cafétéria	11,5
Classe	8,6
Jardin d'enfants	10,1

Calcul des pertes thermiques par renouvellement de l'air

On détermine les débits d'air (en m³/h) sortant du logement. Ces débits évaluent :

- La perméabilité des ouvrants, des coffres de volets roulants, des parois
- La ventilation
- Les ouvertures libres (cheminées...)

Les déperditions par renouvellement d'air valent :

$$Q_{ventilation} = C_{pair} \cdot q_v \cdot t \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

Avec : $Q_{ventilation}$ en $W \cdot h$

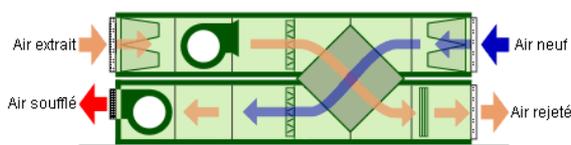
C_{pair} La capacité calorifique de l'air $C_{pair} = 0,34 Wh / (m^3 \cdot K)$

q_v le débit d'air en m^3/h

T_{int} et T_{ext} la température du local et celle extérieure

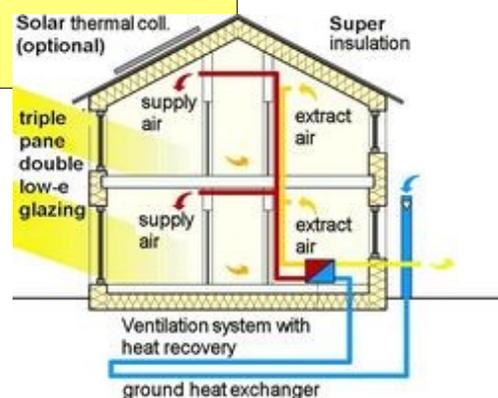
t le temps que dure la ventilation en h

Optimisations



La VMC double flux

L'air neuf extérieur va croiser l'air extrait de la pièce à travers l'échangeur et va ainsi se réchauffer. Toute la chaleur de l'air extrait n'est pas perdue.



Le puit canadien

L'air insufflé dans la maison est aspiré dans un long tuyau enterré. L'hiver l'air se réchauffe en passant dans la terre d'entrer dans la maison. L'été c'est l'inverse.

Le chauffage et la climatisation

Chauffages électriques

Un site pour aller plus loin : « <http://www.radiateur-electrique.org/> »

Par chaleur forte : Les convecteurs

Un courant électrique circule dans la résistance.

Par effet Joule, il provoque un échauffement.

La puissance thermique générée est :

$$P_{th} = \frac{U^2}{R}$$

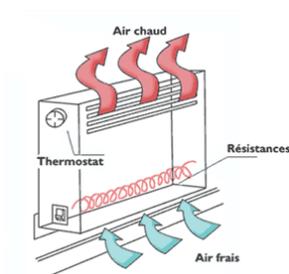
U est la valeur efficace de la tension d'alimentation (U= 230 V en France).

Avantages :

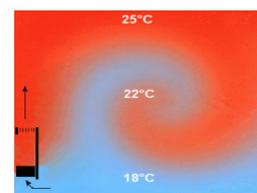
- Monte rapidement en température
- Peut être mis à profit pour assécher les atmosphères trop humides,
- Faible encombrement, léger, facile à installer,
- **Petit prix.**

Inconvénients :

- Mauvaise répartition de la chaleur,
- Chauffe par intermittence en créant des vagues de chaleur,
- Stratification : l'air chaud va au plafond obligeant à chauffer davantage à hauteur humaine,
- Environ 30% de surconsommation par rapport au chauffage radiant basse température,
- Dessèche l'air ambiant,
- Les parois et les objets ne sont pas réchauffés, ce qui laisse persister la sensation de froid



Convecteur électrique
(<http://www.e-dometlux.fr/53-convecteur>)



L'emploi de ce type de chauffage devrait être réservé à des cas très particuliers de pièces de petite taille, utilisé épisodiquement seulement.

Par chaleur forte : Les radiateurs à halogène



Le radiateur à halogène ou à quartz produit un rayonnement électrique Infrarouge Court (IRC) haute température, émis par un tube contenant un gaz halogène et un filament de tungstène porté à une température pouvant atteindre 2200 degrés.

¾ de l'énergie électrique est convertie en rayonnement.

Avantages :

- La **chaleur rayonnée** réchauffe directement les personnes et les objets comme lors d'une exposition au soleil,
- la sensation de chaleur est immédiate,
- pas de stratification de l'air,
- bon marché, léger, facile à installer et à transporter.

Inconvénients :

- La lampe doit être remplacée toutes les 5000 heures,
- Fonctionnant par à-coups,
- la grille est portée à une température très élevée,

Chaleur douce : Convecteurs

L'amélioration par rapport aux précédents tient dans la régulation. Une modulation de l'alimentation au lieu d'un pilotage en tout ou rien permet de diminuer la température des résistances et de les alimenter en permanence.

Les mouvements d'air convectifs et les vagues de chaleur sont moins forts qu'avec un convecteur de base.

La consommation est diminuée.

Chaleur douce : Chauffages électriques à accumulation

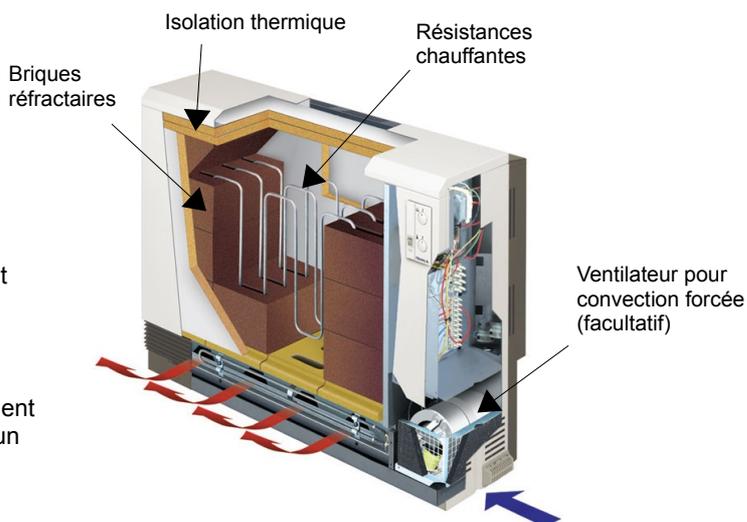
Ils permettent de ne consommer du courant que pendant les heures creuses et de restituer la chaleur tout le reste du temps.

Avantages :

- Ils offrent une température régulière.
- Leur température est faible ce qui limite les mouvements convectifs.
- Permettent des **économie** en ne consommant qu'en heures creuses.

Inconvénients :

- La diffusion de la chaleur restant essentiellement convective, ils ne présentent pas le confort d'un rayonnement.
- Ils sont volumineux et très lourds.
- Il faut souscrire en contrat heures creuses.
- Ils sont relativement chers.



Chaleur douce : Radiateurs à infrarouges lointains

Ils diffusent la chaleur par rayonnement comme le soleil.

Ils sont constitué d'une résistance surfacique associé à des matériaux ayant une forte émissivité (miroir, panneau en verre, ...)

Avantages :

- Très bon confort thermique du au **rayonnement**
- **Peu énergivore**,
- Chaleur homogène
- La qualité de l'air n'est pas modifiée

Inconvénients :

- Ne doit pas être utilisé si les parois sont mal isolées,
- l'espace devant le radiateur doit être totalement dégagé,
- assez coûteux à l'achat.



Chauffage central

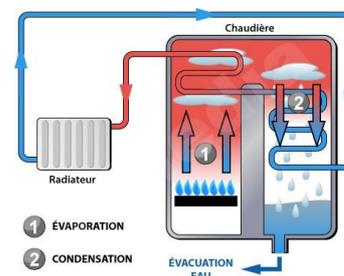
Les radiateurs sont traversés par de l'eau préalablement chauffée par une chaudière ou une pompe à chaleur.

Il existe une assez grande variété de chaudières :

- Fuel
 - Gaz
 - Bois
 - Électrique
 - ...
- } A condensation comme illustré ci-contre pour les plus performantes

Il existe aussi une assez grande variété de pompes à chaleur :

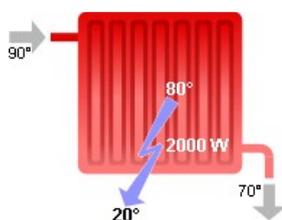
- Air - Eau
- Sol - eau avec captage horizontale
- Sol - eau avec captage verticale
- ...



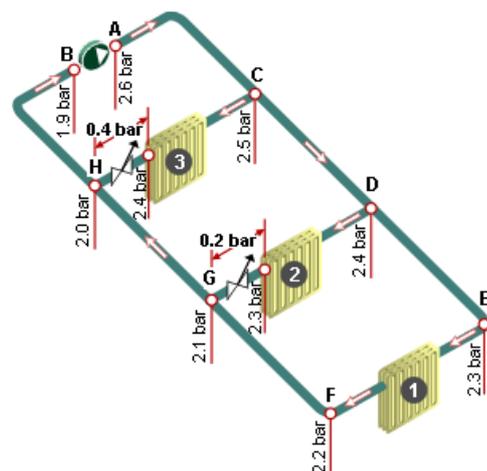
Avec radiateurs

L'eau chaude est poussée dans les radiateurs par une pompe appelée circulateur. Un système de vannes est en général utile pour assurer un niveau de pression et donc un débit équivalent dans tous les radiateurs.

La puissance thermique fournie par un radiateur dépend :



- De la température de l'eau à l'entrée
- De la température de l'eau à la sortie
- De la surface du radiateur
- De la température de la pièce.

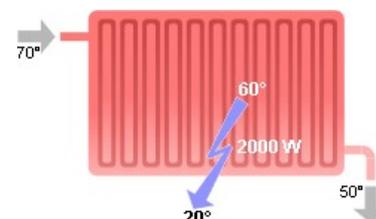


Exemple de dimensionnement d'un radiateur :

Imaginons que l'étude thermique d'une pièce montre qu'il faut un radiateur de 2000W.

Dans un catalogue on peut trouver un radiateur de 2000W dimensionné en régime 90/70. Cela signifie que l'eau entre dans le radiateur à 90°C, qu'elle cède 2000W de chaleur au local à 20°C et sort avec une température de 70°C (voir illustration ci-dessus)

Si on choisit un radiateur de 2000W en régime 70/50, la différence de température entre le locale et la température moyenne du radiateur est plus faible (60°C - 20°C) au lieu de (80°C - 20°C). Pour fournir la même puissance la surface du radiateur sera plus importante.



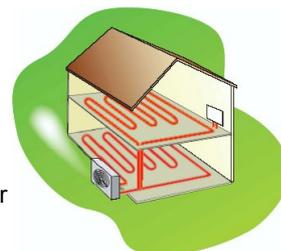
La relation qui permet de dimensionner un radiateur en fonction de sa température moyenne à partir de donnée de référence d'un catalogue est la suivante :

$$S = S_{ref} \cdot \left(\frac{T_{ref} - 20^{\circ}C}{T_{moy} - 20^{\circ}C} \right)^{1,3}$$

Avec plancher chauffant

L'avantage d'un plancher chauffant est sa grande superficie comparée à celle d'un radiateur. Ceci permet d'y faire circuler une eau à basse température (environ 25°C). Ceci est très avantageux si ils sont alimentés par une pompe à chaleur.

Par ailleurs la température des pièces est très stable et homogène, une partie important de la chaleur est transmise par rayonnement.



Poêles à bois

Les poêles transmettent la chaleur essentiellement par rayonnements ce qui est intéressant pour le confort.

Par contre ils ne constituent qu'un seul point de chauffe et doivent donc souvent être associés à d'autres modes de chauffage pour les points les plus éloignés.

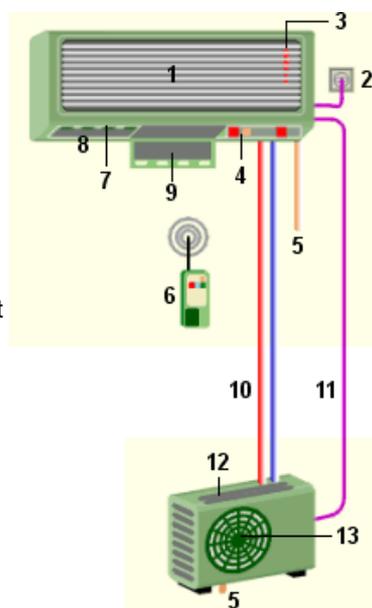


Les climatisations.

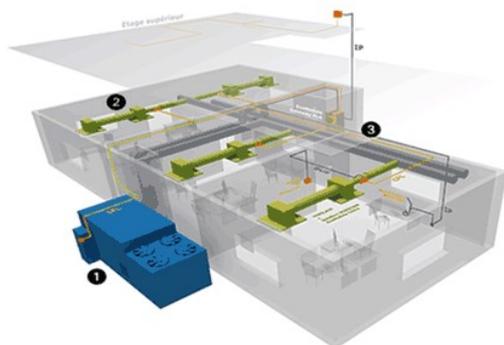
La climatisation fonctionne sur le principe du réfrigérateur. Un fluide calo-porteur est refroidi par le groupe de climatisation. Le fluide calo-porteur est acheminé jusqu'à un échangeur de chaleur. L'air du local est pulsé à travers cet échangeur et en ressort refroidit



Les climatisations actuelles refroidissent donc l'air ambiant mais n'agisse pas sur la température des surfaces des locaux et donc n'en diminuent pas le rayonnement.



- 1 : air repris dans le local
- 2 : alimentation électrique
- 3 : sonde de température de reprise d'air
- 4 : commande unité intérieure
- 5 : évacuation des condensats
- 6 : télécommande
- 7 : volet réglable
- 8 : air soufflé dans le local
- 9 : filtre à air
- 10 : liaison du fluide frigorigène R22
- 11 : raccordement électrique
- 12 : air repris à l'extérieur
- 13 : air soufflé à l'extérieur



Certains bâtiments professionnels et commerciaux sont équipés de **groupes de conditionnement** de l'air qui en règle le température et qui assurent en plus la maîtrise de l'humidité et la filtration.

Les pompes à chaleur et les climatisations fonctionnent sur le même principe. Les **climatisations réversibles** sont des machines qui assurent à elles seules le chauffages l'hiver et la climatisation l'été.

Apports solaires

Les apports solaires sont un avantage l'hiver et un inconvénient l'été.

Dans tous les cas, les apports solaires dépendent de l'ensoleillement du site considéré, des surfaces réceptrices équivalentes et de l'orientation. On commence par calculer les apports solaires maximaux compte tenu de l'exposition, de la date et de l'orientation. On tient également compte des phénomènes de masques qui apparaissent ponctuellement (soleil caché derrière une colline, un immeuble ...)

Rappel :

Le rayonnement solaire se décompose en deux rayonnements :

Rayonnement solaire "global" = "rayonnement direct" + "rayonnement diffus"

Note : A l'ombre, on est principalement exposé au rayonnement diffus.

Pour un mois considéré, on calcule la somme des apports solaires reçus sur toutes les surfaces exposées en Wh.

Calsol est un logiciel en ligne qui permet d'estimer entre autre l'irradiation (voir en annexe un exemple de résultat).

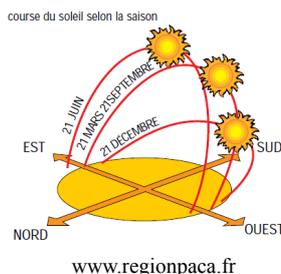
Protections solaires :

L'optimisation des apports solaires peut par exemple passer par l'installation d'une casquette sur le bâtiment.

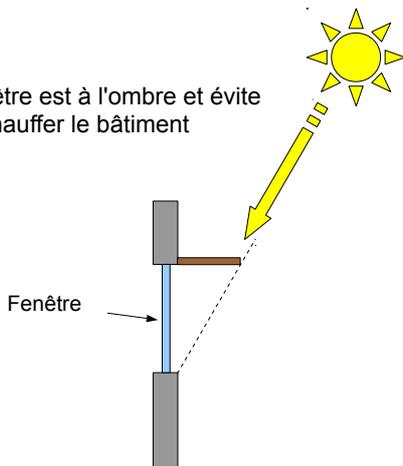
Principe :

Comme illustré ci-contre, la hauteur du soleil dans le ciel à une heure donnée dépend de la saison.

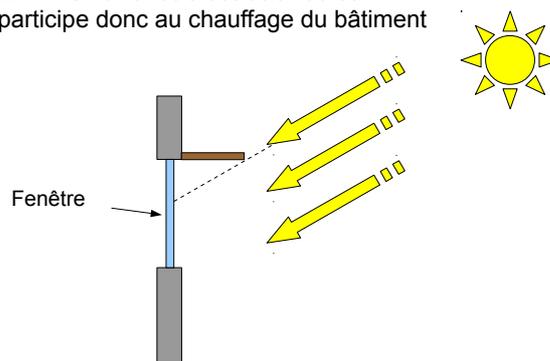
La casquette évite que le soleil ne chauffe trop le bâtiment l'été et permet de profiter du soleil l'hiver.



En **été** la fenêtre est à l'ombre et évite ainsi de surchauffer le bâtiment



En **hiver** la fenêtre est éclairée et participe donc au chauffage du bâtiment

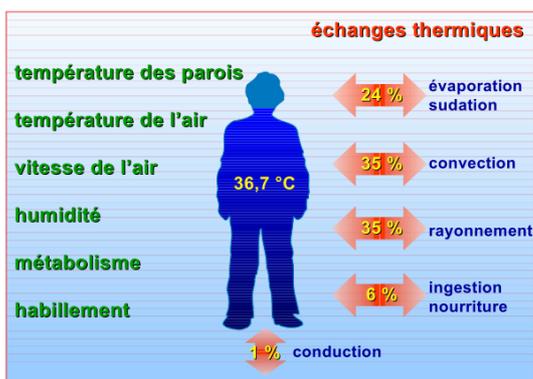


Apports par les occupants et les équipements

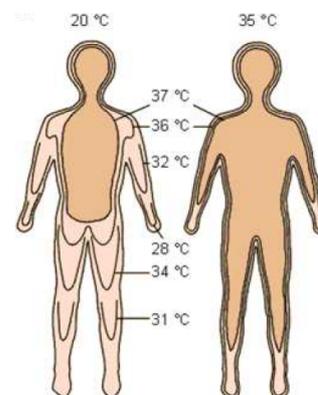
L'homme : Une machine thermique

L'homme, pour assurer ses fonctions vitales, dégrade des substrats énergétiques en permanence, en consommant de l'oxygène, en produisant du CO₂, de la vapeur d'eau et en dégageant de l'énergie.

La chaleur dégagée par le métabolisme est évacuée du corps au rythme de sa production (sinon la température du corps ne serait pas constante). Pour être évacuée cette chaleur peut prendre différents chemins :



Source : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique



La puissance dissipée par une personne est en moyenne de 70W.

Aspect réglementaire

La production de chaleur interne peut être calculée en additionnant :

- Les équipements, et leur production thermique élémentaire.
- Les personnes, qui dégagent de la chaleur et de l'air chaud par leur respiration.

Les règles de prise en compte de ces apports dépendent des réglementations en vigueur.

La réglementation RT 2000 proposait par exemple une évaluation simplifiée des apports internes, 4 Watts par m² de surface habitable est proposée .

Cette valeur prenait en compte les émissions corporelles des occupants, les appareils ménagers, etc...

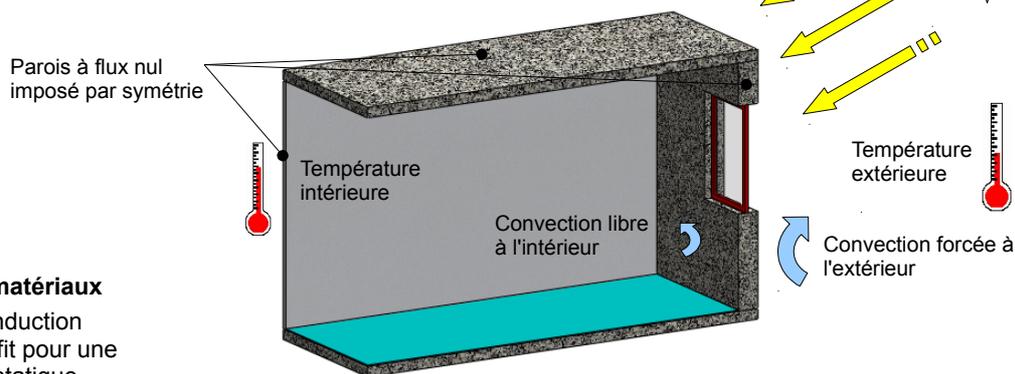
Exemple : Un logement de 115 m² occupé par quatre personnes. $QI = 4 \times 115 \times 24 = 11040 \text{ Wh}$ (11,04 kWh) Ce qui représente 460 W par heure.

Modélisation du comportement statique d'un bâtiment

Les paramètres intervenants dans la modélisation du comportement statique d'un bâtiment :

- **Les conditions limites constantes :**
 - Températures extérieures et intérieures
 - Convection (fonction de la force du vent)
 - Rayonnement (fonction de l'ensoleillement)
 - Des valeurs de flux imposée (nulle le plus souvent)

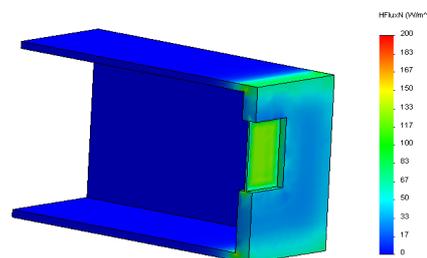
Remarque : La radiation des parois elles même est souvent négligée.



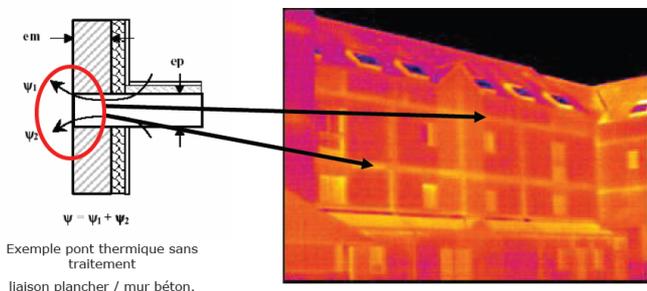
- **Grandeur matériaux**
 - La conduction thermique suffit pour une modélisation statique

Résultats obtenus :

- La température de différents points ou zone du bâtiment
- Les flux de chaleur à travers les différentes surfaces



Les calculs peuvent être comparés à des mesures faites par exemple avec une caméra thermique.



De tels modèles permettent d'identifier les causes des pertes les plus importantes et donc d'optimiser l'efficacité d'un investissement par exemple (fenêtre, toiture, murs, ...).

Ils permettent aussi de mettre en évidence les **ponts thermiques**.

Ils démontre facilement l'efficacité d'une isolation extérieure par rapport à une isolation intérieure.

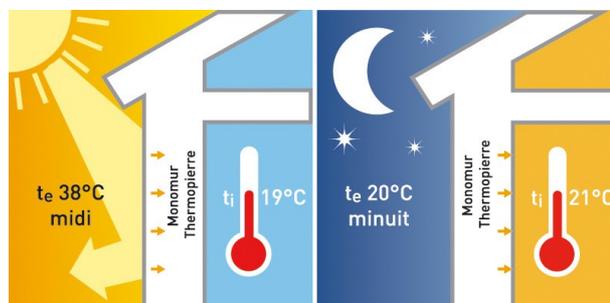
Les pertes par pont thermiques sont estimées avec la relation : $Q = k_L \cdot L$ où L est la longueur du pont thermique.
(voir le calcul de déperdition dans ce qui suit).

Modélisation du comportement dynamique d'un bâtiment

Les parois d'un bâtiment ont une masse.

Elles peuvent donc :

1. **Emmagasiner de la chaleur** au moment le plus chaud et ainsi limiter l'élévation de température
2. **Restituer la chaleur** au moment le plus froid et ainsi éviter que la température ne descende trop bas.

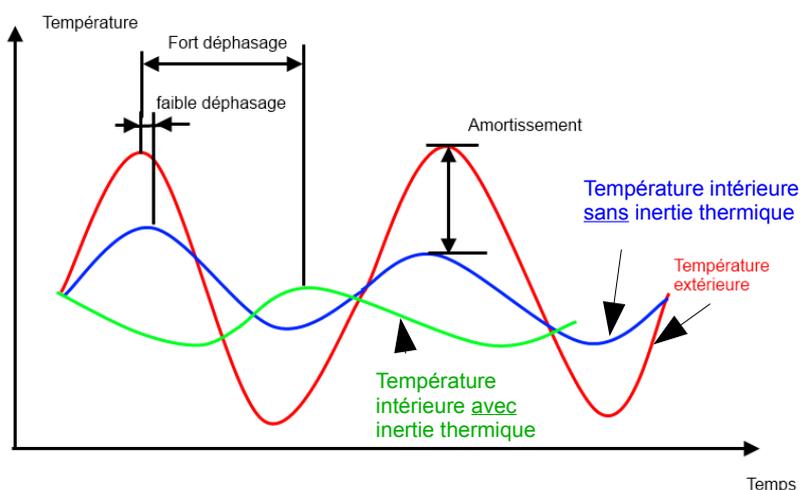


Cette fonction qui tempère les écarts de température s'appelle l'inertie thermique. Elle est en général recherchée puisqu'elle aide à stabiliser la température intérieure.

Pour voir son influence dans les modèles de calcul, il faut des modèles dynamiques.

Les différences par rapport à un modèle statique viennent des conditions limites (température, convection, rayonnement, ...) qui évoluent en fonction du temps.

Pour que l'inertie thermique puisse être modélisée, il faut en plus renseigner les valeurs de masse volumique et de capacité calorifique des différents matériaux.



Les résultats obtenus peuvent être les courbes d'évolution des températures en fonction du temps.

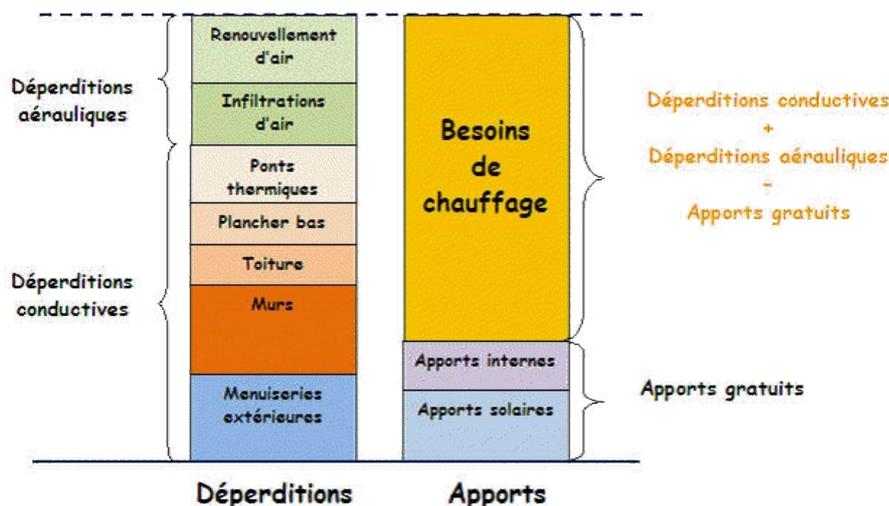
Les courbes ci-contre montrent l'atténuation des pics de température que permet l'inertie thermique et aussi le décalage dans le temps (appelé déphasage) du moment le plus chaud. Ce déphasage peut être très intéressant pour profiter de la chaleur du jour pendant la soirée quand la température extérieure commence à retomber.

L'association de murs en pierre ou en brique et de verrière peut ainsi être intéressante. Cette association reste cependant délicate à mettre au point pour être efficace.



Bilan thermique d'un bâtiment

Comme dans tout bilan la somme des apports est égale à la somme des pertes.



Les degrés jour unifiés :

Les degrés jour unifiés ou DJU permettent de réaliser des estimations de consommation d'énergie thermique pour le chauffage d'un bâtiment en proportion de la rigueur de l'hiver. Ils sont calculés généralement sur une base de 18°C (température extérieure inférieure ou égale à 18°C) pour une période de chauffe de 232 jours allant du 1er octobre au 20 mai.

Il existe deux méthodes de calcul des DJU donnant des résultats différents :

- une méthode dite "Météo" avec un calcul simple
- une méthode dite "Professionnels de l'énergie" avec un calcul plus élaboré conforme à la méthode réglementaire du Costic (centre d'études et de formation pour le génie climatique et l'équipement technique du bâtiment).

Dans la méthode "Météo", le nombre de degrés jours unifiés base 18 DJU_{18} est déterminé comme suit :

$$DJU_{18} = \sum [n_i \cdot (18 - \theta_i)] \quad \text{avec} \quad DJU_{18} = \text{degrés jour unifiés de base } 18^\circ\text{C en } ^\circ\text{C.jours}$$

θ_i = température moyenne journalière $\theta_i = (\theta_{\min} + \theta_{\max})/2$
 n_i = nombres de jours à la température θ_i

Il n'y a pas de DJU négatifs. En France, le total annuel moyen va de 1400 DJU pour la côte Corse à 3800 DJU dans le Jura. Pour un hiver de rigueur moyenne le nombre de DJU se situe entre 2000 et 3000 pour la majeure partie du territoire métropolitain.

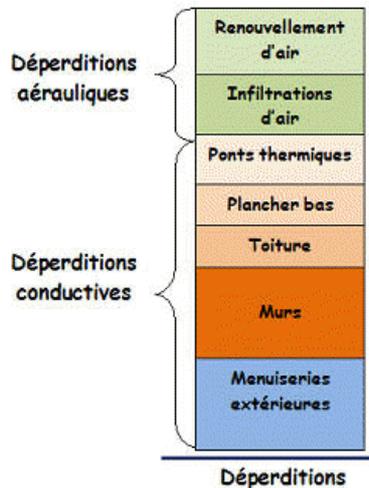
Pour plus de détails sur le calcul des DJU selon les deux méthodes : <http://climatheque.meteo.fr/Docs/DJC-methode.pdf>

A titre d'exemple : Le DJU_{18} de la Seine Maritime est : 2961 °C.J

Calcul du coefficient de transfert thermique d'un bâtiment

Le but est ici de calculer pour chaque déperdition identifiée ci-dessous le coefficient de transfert thermique en $W/°K$.

Prenons l'exemple simple d'une chambre d'étudiant au milieu d'un immeuble et traitée seule.



Longueur = 3,8 m
Largeur = 3 m
Hauteur = 2,3 m

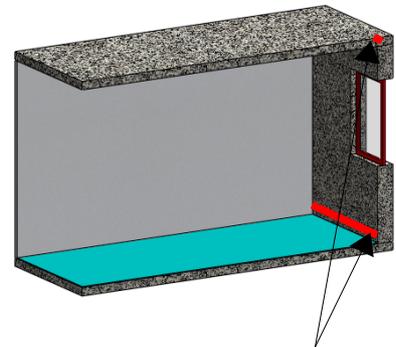
Surface double vitrage = 1,2 m^2
 $r_{\text{vitre}} = 0,3 \text{ m}^2 \cdot K/W$

Épaisseur du mûr en béton : 200 mm
Conductivité du béton $\lambda = 1 \text{ W/m.K}$

Isolant intérieur en polyuréthane : $r = 3 \text{ m}^2 \cdot K/W$

Résistance de surface intérieure : $r_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot K/W$

Résistance de surface extérieure : $r_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot K/W$



2 ponts thermiques
 $K_L = 0,25 \text{ W/m.K}$

Le débit de la VMC est de 2,9 m^3/h

Elle fonctionne 2 heures par jour

La capacité calorifique de l'air est : $C_{\text{pair}} = 0,34 \text{ Wh}/(m^3 \cdot K)$

Correction :

1) Déperditions aérauliques (Voir p.14).

* Pour une journée et pour un ΔT de $1°K$ (en Wh).

$$Q = C_{\text{pair}} \times q_v \times t \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

$$Wh = \frac{Wh}{m^3 K} \times \frac{m^3}{h} \times h \times K$$

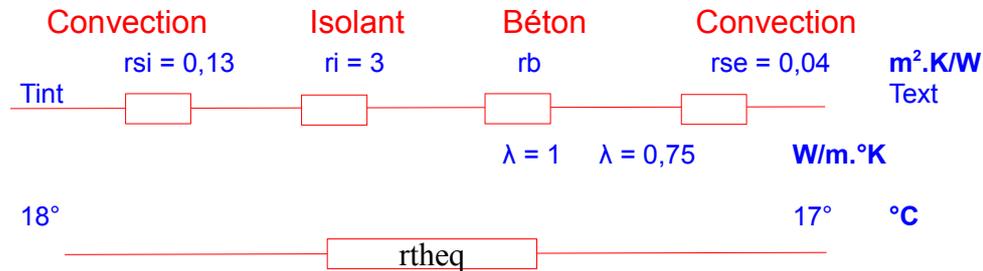
$$Q = 0,34 \times 2,9 \times 2 \times 1 = 1,972 \text{ Wh}$$

* Calcul du coefficient de pertes aéraulique moyen sur 24h.

$$D_{\text{pa}} = \frac{Q}{24} = \frac{Wh}{h} = \frac{1,972}{24} = 0,0822 \text{ W}/°K$$

2) Déperditions conductive (en W/K) (Voir p.10).

* A travers le mur.



$$r_b = \frac{e}{\lambda} = \frac{m}{w/m.K} = \frac{0,2}{1} = 0,2 m^2.K/W$$

$$r_{theq} = \sum \text{des } r = r_{si} + r_i + r_b + r_{se}$$

$$r_{theq} = 0,13 + 3 + 0,2 + 0,04 = 3,37 m^2.K/W$$

$$R_{mur} = \frac{r_{theq}}{S} = \frac{3,37}{3 \times 2,3 - 1,2} = \frac{3,37}{5,7} = 0,5912 K/W$$

$$U_{mur} = \frac{1}{R_{mur}} = \frac{1}{0,5912} = 1,6913 W/K$$

* A travers les vitres. (Voir P.10)

$$R_{vitre} = \frac{\sum r_v}{S_v} = \frac{0,3+0,13+0,04}{1,2} = 0,3916 K/W$$

$$U_{vitre} = \frac{1}{R_{vitre}} = \frac{1}{0,3916} = 2,553 W/K$$

* A travers les ponts thermiques.(Voir P.21)

$$U_{pther} = K_L \times L_{pth} = 0,25 \times 2 \times 3 = 1,5 W/K$$

Coefficient de transfert thermique

Le coefficient de transfert thermique H est la somme des grandeurs encadrées. Elle sert au calcul du besoin calorifique annuel qui suit.

Pour la chambre d'étudiant précédente située à Rouen :

Coefficient de transfert thermique global :

$$H = D_{pa} + U_{mur} + U_{vitre} + U_{pther}$$

$$H = 0,0822 + 1,6913 + 2,553 + 1,5$$

$$H = 5,8265 \text{ W/K}$$

Déperdition

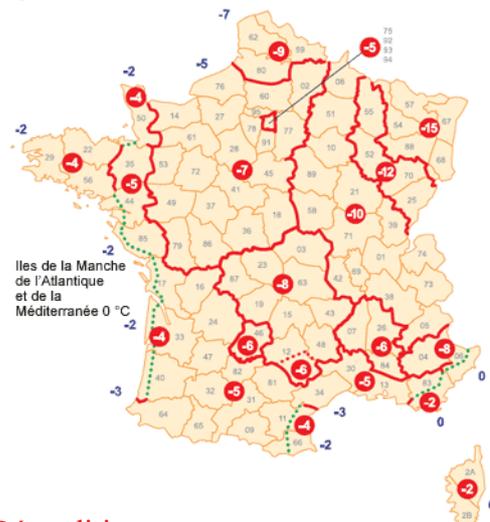
La déperdition en W permet d'estimer la puissance thermique nécessaire au chauffage du bâtiment.

Elle fait intervenir $\theta_{ext\ base}$: la température extérieure de base. Cela correspond à la température minimale moyenne en hiver.

Elle est fixée par la réglementation thermique en fonction de la zone géographique et de l'altitude (voir carte ci-contre).

Carte des températures de base

La puissance de chauffage à installer est déterminée à partir de la température extérieure de base (soit la température minimale quotidienne constatée cinq fois au moins au cours d'une année) figurant ci-dessous :



$$Dep = H \cdot (18 - T_{ext\ base})$$

Pour la chambre d'étudiant précédente située à Rouen :

Déperditions :

$$Dep = H \times (18 - T_{ext})$$

$$Dep = 5,82 \times (18 - (-7))$$

$$Dep = 145,5 \text{ W}$$

Calcul du coefficient de déperdition du bâtiment : U_{bat}

Le U_{bat} est la déperdition globale par m^2 d'enveloppe du bâtiment.

$$U_{bat} = \frac{H}{S_{enveloppe}} \quad \text{Avec :} \quad \begin{array}{l} U_{bat} \text{ en } W/(m^2.K) \\ H \text{ en } W/K \\ S_{enveloppe} \text{ en } m^2 \end{array}$$

Il permet de comparer la qualité d'isolation de différents bâtiments.

A titre d'information :

- U bat= 2 pour une maison ancienne sans isolation
- U bat= 1,5 pour une maison ancienne avec isolation
- U bat= 1,1 pour une maison d'après 1990
- U bat= 0,9 pour une maison RT 2000
- U bat= 0,8 pour une maison RT 2005
- U bat= 0,6 pour une très bonne isolation
- U bat= 0,4 pour une maison bioclimatique

Pour la chambre d'étudiant précédente située à Rouen :

$$\text{Coefficient } U_{bat} = \frac{H}{S_{enveloppe}} = \frac{5,8265}{2,3 \times 3} = 0,844 \text{ W/m}^2.K$$

Rendement de l'installation de chauffage

Le rendement de génération représente le rapport entre l'énergie utile fournie (réchauffage d'eau, d'air...) et l'énergie consommée (électricité, combustion...).

Par exemple, pour une chaudière actuelle au gaz naturel avec un rendement de 90%, l'eau ne récupère, sous forme d'énergie calorifique, que 90% de l'énergie de combustion du gaz. Les pertes sont essentiellement des pertes calorifiques dans les fumées pour 8%, et des pertes de rayonnement thermique de la chaudière pour 2%.

Énergie	Rendement de génération
Électrique (effet joule)	1
PAC	2 à 4
Chaudières à bois (bûches)	0,75
Chaudières à bois (granulés)	0,9
Fioul (Haut Rendement)	0,9
Propane (Haut rendement)	0,9
Propane (Condensation)	1,1
Gaz Naturel (Haut rendement)	0,9
Gaz Naturel (Condensation)	1,1
Solaire appoint électrique	1,3 à 1,5
Solaire appoint bois	0,82 à 0,88

Les réglementations thermiques

La RT 2005

La RT 2005 (réglementation thermique 2005) est une norme devant être appliquée à toutes les constructions neuves dont le permis de construire a été déposé à partir du 1er septembre 2006.

Elle correspond aux engagements nationaux en matière de réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Elle découle en particulier du protocole de Kyoto.

Son but est de réduire les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Son application passe par un étude thermique des bâtiments.

Cette étude consiste à comparer le projet avec un bâtiment fictif de référence

Projet



- Une géométrie
 - Des composants et équipements
- Bâtiment de référence**



- Même géométrie
- Des composants et équipements de référence définis par la réglementation

Limitation de la consommation énergétique primaire du bâtiment

La consommation du bâtiment en projet pour le chauffage, l'eau chaude, la climatisation, les auxiliaires doit être inférieure à celle du bâtiment de référence.

$$Cep \leq Cep_{ref}$$

Cep exprime en kWhep/m²/an

Remarque : Différence entre **énergie finale** et **énergie primaire**.

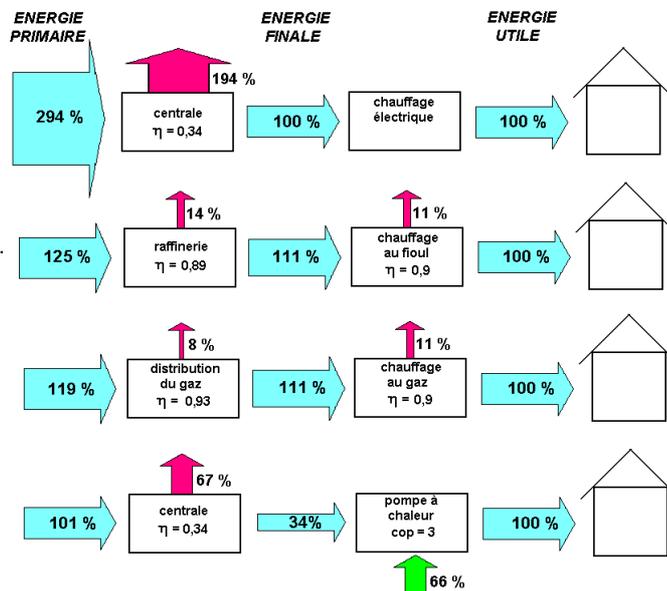
L'énergie finale est celle consommée par l'utilisateur

L'énergie primaire comprend l'énergie finale + la l'énergie consommée pour la production et le transport de celle-ci.

Ci-contre est illustré le bilan énergétique pour différentes solutions de chauffage.

En France, on considère les équivalences suivantes

- 1 kWh gaz = 1 kWh_{ep}
- 1 kWh fioul = 1 kWh_{ep}
- 1 kWh élec = 2.58 kWh_{ep}



Limitation de la température intérieure atteinte en été sans recours à la climatisation

La température atteinte dans le bâtiment en projet doit être inférieure à celle qui serait atteinte dans le bâtiment de référence.

$$T_{ic} \leq T_{ic,ref}$$

Exigence de performances minimales pour une série de composants et équipements.

Isolation

Système de chauffage

eau chaude sanitaire

dispositif de suivi de consommations

Caractéristiques thermiques minimales : Les garde-fous

Indépendamment du bâtiment de référence, les logements doivent avoir une Cep inférieure aux valeurs définies dans le tableau ci-dessous.

Zone climatique*	Combustibles fossiles	Chauffage électrique (y compris pompes à chaleur)
H1	130 kWh primaire/m ² /an	250 kWh primaire/m ² /an
H2	110 kWh primaire/m ² /an	190 kWh primaire/m ² /an
H3	80 kWh primaire/m ² /an	130 kWh primaire/m ² /an

* les zones climatiques sont définies dans l'arrêté (H1 : nord, à H3 : zone méditerranéenne)

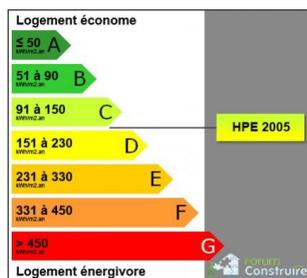
Les m² ci-dessus correspondent à la surface habitable (SHON).



Réglementation et labellisation

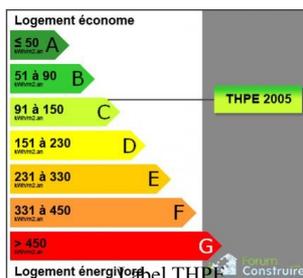
Pour être réglementaire par rapport à la RT2005, la consommation de la maison doit donc être comprise , entre 120 et 220kWh/m²/an

Il existe en plus des labels qui attestent d'une performance énergétique supérieure au minimum. Ceux sont :



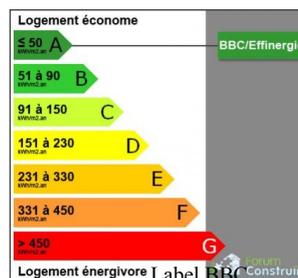
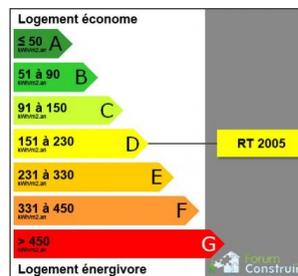
Label HPE

(Haute performance énergétique)
Consommation inférieure de 10% par rapport à la RT2005



Label THPE

(Très haute performance énergétique)
Consommation inférieure de 20% par rapport à la RT2005



(Bâtiment basse consommation)
Consommation inférieure à 50 kWh/m²/an

RT 2012

La RT 2012 fait suite au Grenelle de l'environnement.

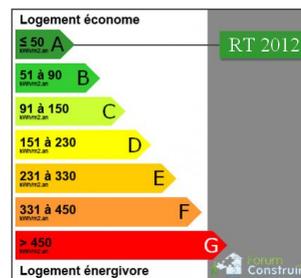
La RT 2012 équivaut au label BBC de la RT2005.

La RT 2012 ne fait plus intervenir de notion de bâtiment de référence.

Elle impose une Cep ≤ 50 kWh/m²/an.

Elle impose en plus un certain nombre de contraintes technologiques :

- Recours aux énergies renouvelables
- Obligation de traiter les ponts thermiques
- Obligation de traiter la perméabilité à l'air
- ...



Mesures

Dans le domaine de la thermique des bâtiments, les mesures consistent essentiellement en des mesures de température.

Ces mesures permettent ensuite de calculer des flux de chaleur ou de vérifier les modèles de calcul utilisés en conception.

Nous commençons par le système le plus simple : le thermomètre. Ce sera l'occasion d'aborder quelques notions élémentaires de métrologie.

Thermomètre

Un thermomètre est composé d'un réservoir d'alcool en général maintenant (de mercure jadis) et d'un tube très fin appuyé sur une règle graduée en °C par exemple.

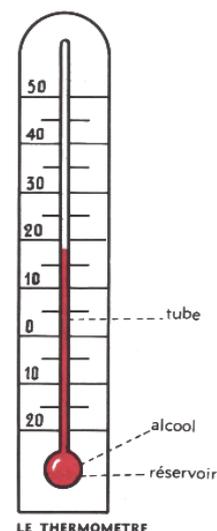
Le principe du thermomètre est basé sur la dilatation des corps.

En chauffant par exemple l'alcool prend plus de volume et son niveau monte tout simplement dans le tube.

Un étalonnage du système est évidemment nécessaire pour définir la graduation.

Cet étalonnage peut être réalisé grâce à de l'eau glacée (à 0°C) et de l'eau bouillante (à 100°C).

Il est à noter que la température mesurée est celle de l'alcool contenue dans le réservoir. Ce n'est pas forcément celle de l'air ambiant par exemple si le thermomètre est placé au soleil par exemple.



Cette remarque doit attirer l'attention sur l'importance des protocoles de mesures.

De tel thermomètres ne permettent pas un enregistrement automatique des températures. Les sondes présentées dans ce qui suit répondent à ce besoin.

Les sondes thermiques

On répertorie 3 types de sondes :

- les thermocouples,
- les thermistances (appelées aussi "CTN"),
- les capteurs à résistance métallique (appelés aussi "Pt100").

Beaucoup de multimètres sont directement équipés pour recevoir une sonde.

Elles se différencient au niveau de :

- l'étendue de mesure,
- la précision,
- du temps de réponse,
- la robustesse,
- la forme.

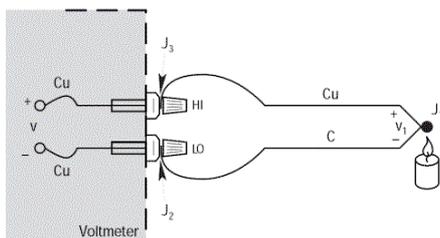
Deux sites pour plus de détails :

<http://aviatechno.free.fr/thermo/thermo00.php>

http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_15577.htm



Les thermocouples



Le principe :

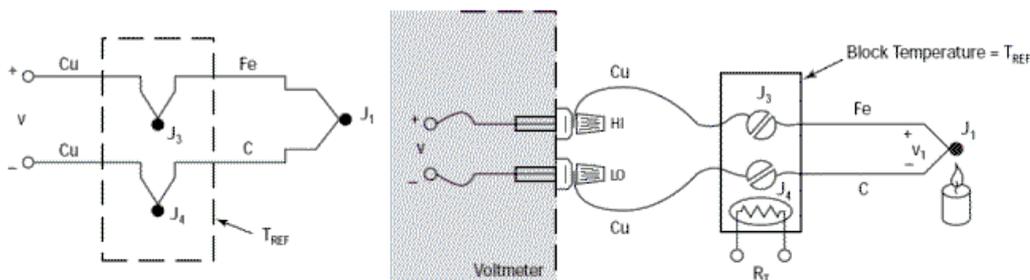
Quand deux métaux (cuivre Cu et constantan C par exemple) sont en contact ou soudés entre eux et forment ainsi une jonction (J1), une variation de température provoque l'apparition d'une tension aux bornes de J1.

C'est l'effet Seebeck.

La tension générée est proportionnelle à la température de la jonction. Une mesure de la tension permet donc de connaître la température.

A noter cependant que les raccordements sur le voltmètre, donne aussi lieu à des jonctions. Dans le cas ci-contre la jonction J2 (CU-C) annule l'effet de la jonction J1 (C-CU). Une mesure de la température ambiante n'est donc pas possible avec ce système.

Pour résoudre ce problème, il faut en fait imposer la température des jonctions parasites ou mesurer leur température par un autre système (une thermistance R_t par exemple) et appliquer une correction aux mesures de tension.



Malgré cette complication le thermocouple reste intéressant car il supporte en fonction de leur type (T, J ou K) une large étendue de mesure que ne supporte pas tous les autres systèmes (voir le tableau de comparaison des sondes page suivante).

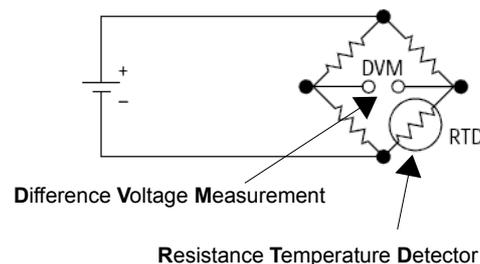
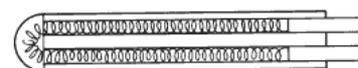
Les thermistances

Humphrey Davy découvrit que la résistance électrique des métaux dépendait de leur température.

En mesurant la résistance d'un fil, on peut donc mesurer sa température.

Les variations de résistance étant très faibles, leur mesure passe par l'utilisation d'un pont Wheatstone.

La mesure de DVM donne une image de la RTD.



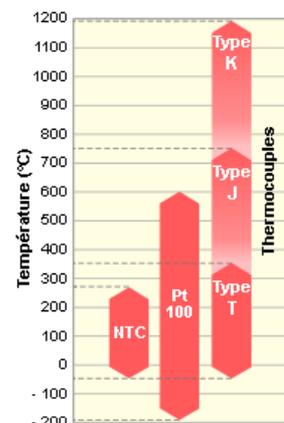
Les "Pt100" :

William Siemens a mis au point un thermomètre sur ce principe en utilisant du platine. Ce matériau permet des mesures de température allant de -250°C à 950°C .

Les PT100 sont des sondes très courantes de nos jours. Elles sont en platine (Pt) et leur particularité est d'avoir une résistance de 100 ohms à 0°C .

Comparaison des sondes thermiques et domaines d'utilisation.

Type de sonde	Précision de la sonde	Temps de réponse	Coût	Solidité
Thermocouple	+ ou - 1°C	+ (10 .. 30 sec)	+	+
Thermistance	> + ou - 0,5°C	0 (1 min)	0	+
Pt 100	de + ou - 0,1°C à + ou - 0,4°C	- (5 à 10 min)	-	-



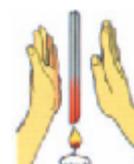
Mesure à distance

Principe physique

Chaque objet émet un rayonnement infrarouges qui dépend de sa température et de son émissivité (voir paragraphe sur le rayonnement si besoin).

La mesure de température en surface à distance consiste à mesurer la chaleur reçue depuis cette surface et en calculer la température connaissant l'émissivité de la surface.

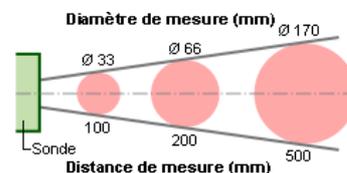
En pratique l'émissivité des surfaces fait l'objet de grosses approximations ce qui rend les mesures peu précises.



Précision

La précision (+ ou - 2 °C) est dépendante :

- De l'émissivité de la surface mesurée. Remarque : La mesure sur un métal nu est impossible.
- De la présence de particule dans l'ambiance (brouillard de vapeur, de poussières, ...).
- De la propreté de la lentille de l'appareil.
- De l'angle de mesure et de la distance de mesure. Le résultat de la mesure est en fait une moyenne de la température de la surface vue par l'appareil.



Matériel

Sonde infra rouge

Les thermomètres infrarouges permettent de mesurer la température d'une surface, sans contact. Ils conviennent particulièrement pour les mauvais conducteurs de chaleur (céramique, caoutchouc, matières synthétiques, ...), pour la mesure de la température de pièces en mouvement, zones inaccessibles au toucher (plafond), des pièces sous tension électrique, ...



Caméra thermique

Basée sur le même principe que les sondes infrarouges, elles donnent une image dépendant de la température.

Dans le bâtiment elles sont utilisées pour :

- La détection des points faibles de l'isolation.
- Vérification des températures des canalisations et installations de chauffage, notamment pour le contrôle des planchers chauffants.
- Vérification des armoires électriques par visualisation des surchauffes des connexions, ou de certains composants.



Gisement solaire

Calsol est un logiciel en ligne qui permet d'estimer entre autre l'irradiation.



INES Education - Logiciel CALSOL - Gisement solaire
estimation de l'énergie solaire disponible avec masque



Choix de la ville :
 Prendre en compte un masque :
 Inclinaison du plan :
 Orientation du plan :
 Albédo du sol :

[Cliquer ici pour valider votre choix et lancer les calculs](#)

Irradiation sur un plan horizontal en kWh/m² par jour ou en kWh/m² cumulés

[Sources](#)

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Globale (IGH)	0.81	1.5	2.78	4.17	5	5.36	5.36	4.42	3.14	1.97	1.06	0.69	3.03
Directe (IBH)	0.23	0.51	1.21	1.96	2.3	2.44	2.54	2	1.33	0.79	0.35	0.19	1.33
Diffuse (IDH)	0.58	0.99	1.57	2.21	2.7	2.92	2.82	2.42	1.81	1.18	0.71	0.5	1.7

Irradiation sur un plan d'inclinaison 0° et d'orientation 0°.

[Comparaisons](#)

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Directe (IBP)	0.23	0.51	1.21	1.96	2.3	2.44	2.54	2	1.33	0.79	0.35	0.19	1.33
Diffuse (IDP)	0.58	0.99	1.57	2.21	2.7	2.92	2.82	2.42	1.81	1.18	0.71	0.5	1.7
Réfléchie (IRP)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Globale (IGP)	0.81	1.5	2.78	4.17	5	5.36	5.36	4.42	3.14	1.97	1.06	0.69	3.03

Émissivité de quelques matériaux courants :

Matériaux	Émissivité
Acier doux	0.20 - 0.32
Acier inoxydable poli	0.075
Argile	0.91
Béton	0.92
Bois naturel	0.90 - 0.95
Brique rouge	0.9 - 0.93
Carbone (graphite)	0.98
Corps noir théorique	1.0
Glace (eau gelée)	0.97
Papier adhésif blanc	0.93
Verre	0.92