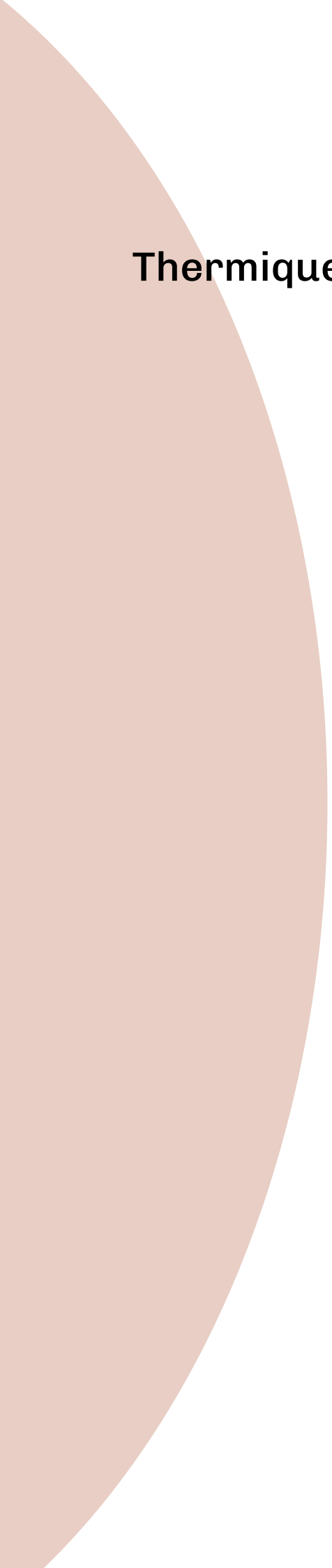




Thermique du bâtiment

Table des matières

1. Problématique et contexte actuel	3
1.1. Le Constat aujourd'hui.....	3
1.2. Thermique du bâtiment.....	3
1.3. Bilan énergétique de la France.....	4
1.4. Objectifs de le France.....	6
2. Notion de confort thermique	7
2.1. Confort thermique	7
2.2. Déperditions et apports énergétiques.....	8
3. Définitions fondamentales	9
3.1. Les définitions.....	9
3.2. Distinction énergie et puissance.....	9
3.3. Energie consommée.....	11
3.4. Les modes de transfert d'énergie thermique.....	11
3.5. Les trois modes de transfert de chaleur	11
4. Performance énergétique d'un bâtiment	15
4.1. Quantification des principales déperditions énergétiques	15
4.2. Les ponts thermiques.....	17
4.3. Le sol	18
4.4. Le renouvellement d'air	18
5. Les déperditions à travers les parois	19
5.1. Les parois.....	19
5.2. Les transferts dans les parois	20
5.3. Analogie électrique.....	23

1. Problématique et contexte actuel

1.1. Le Constat aujourd'hui

A l'heure où les gisements d'énergies fossiles se raréfient, où le nucléaire suscite nombreux questionnements, le coût des énergies et la quantité de gaz à effet de serre ne cessent d'augmenter. Une crise énergétique se profile de nouveau à l'horizon et les économies d'énergie sont de nouveau au cœur de l'actualité et des préoccupations.



Grenelle environnement

 **Fondamental**

Une des conséquences de cela est une accumulation excessive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, perturbant ainsi le climat et les températures à la surface de notre planète.

1.2. Thermique du bâtiment

 **Méthode**

Mais pourquoi en parle-t-on dans ce cours sur la thermique du bâtiment ? La réponse est simple : Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie et le deuxième émetteur de CO₂ à l'échelle mondiale (essentiellement dû au chauffage et climatisation). Il est donc au cœur de cette problématique énergétique et environnementale. Ce pourquoi, ces quinze dernières années, de nombreuses rencontres ont eu lieu entre pays développés, afin de décider de la marche à suivre et de la faire évoluer pour diminuer nos consommations d'énergie et nos émissions de gaz à effet de serre.

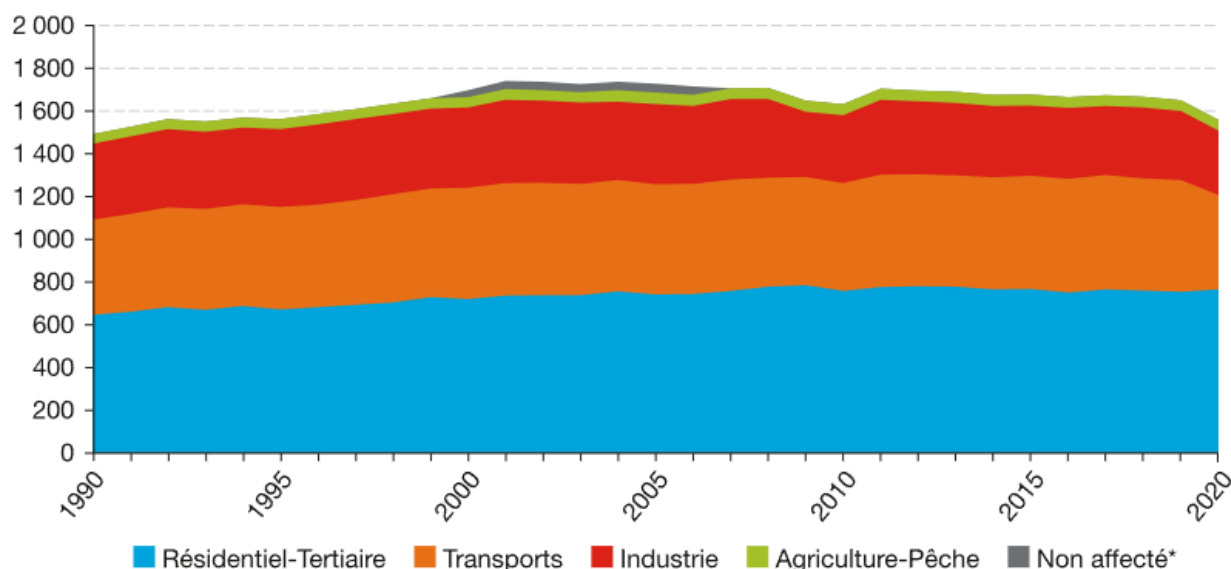
Le point de départ se situe dans la conception des bâtiments et en particulier de leur enveloppe. Nous allons voir dans les pages de ce cours comment on doit procéder. Mais commençons d'abord par mettre ce contexte actuel en perspective avec des chiffres clés.

1.3. Bilan énergétique de la France

Consommation finale par secteur

Total : 1 562 TWh en 2020 (données corrigées des variations climatiques)

En TWh (données corrigées des variations climatiques)



Consommation finale par secteur

La répartition de la chaleur par secteur consommateur n'est pas disponible entre 2000 et 2006.

Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine.

À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.

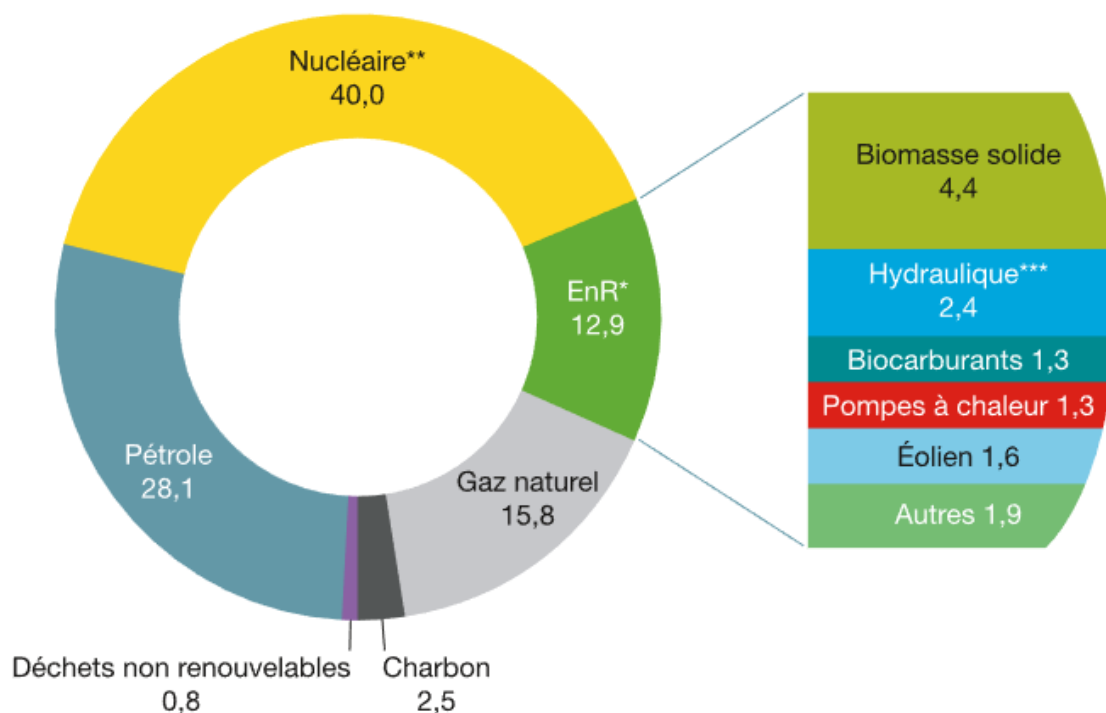
La consommation finale à usage énergétique, corrigée des variations climatiques, s'élève à 1 562 TWh en 2020 et est en forte baisse par rapport à 2019 (- 5,6 %) du fait de la pandémie liée au coronavirus. Après une croissance quasi continue entre 1990 et 2001, cette consommation s'est ensuite infléchi (- 0,3 % en moyenne annuelle entre 2001 et 2019). Le résidentiel-tertiaire est de plus en plus prédominant : sa part dans la consommation énergétique est passée de 43 % en 1990 à 49 % en 2020. À l'inverse, celle de l'industrie a diminué de 24 % à 19 %, tandis que celle des transports, fortement affectés par les restrictions de circulation en 2020, a baissé de 30 % à 28 % et que celle de l'agriculture est restée stable à 3 %.

Les consommateurs finaux d'énergie ont dépensé 159 Md€ en 2019. C'est dans le résidentiel-tertiaire que cette dépense est la plus élevée (45 %), juste devant les transports (44 %). L'industrie ne représente que 9 % de cette dépense et l'agriculture 2 %.

Répartition de la consommation d'énergie primaire en France

Total : 2 571 TWh en 2020 (données non corrigées des variations climatiques)

En % (données non corrigées des variations climatiques)



Energie primaire en France

* EnR : énergies renouvelables.

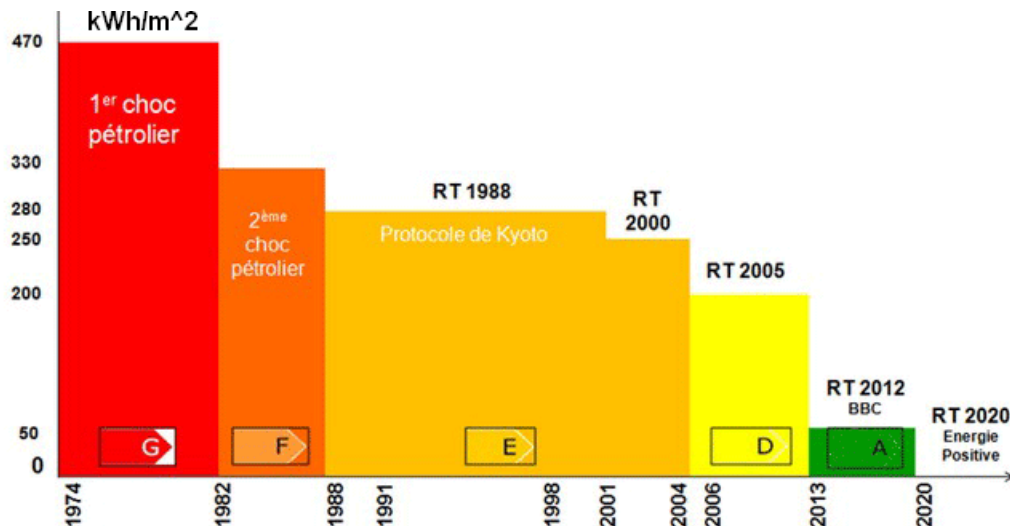
** Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompes réalisées par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie, mais cette dernière demeure marginale comparée à la production nucléaire.

*** Hydraulique hors pompes.

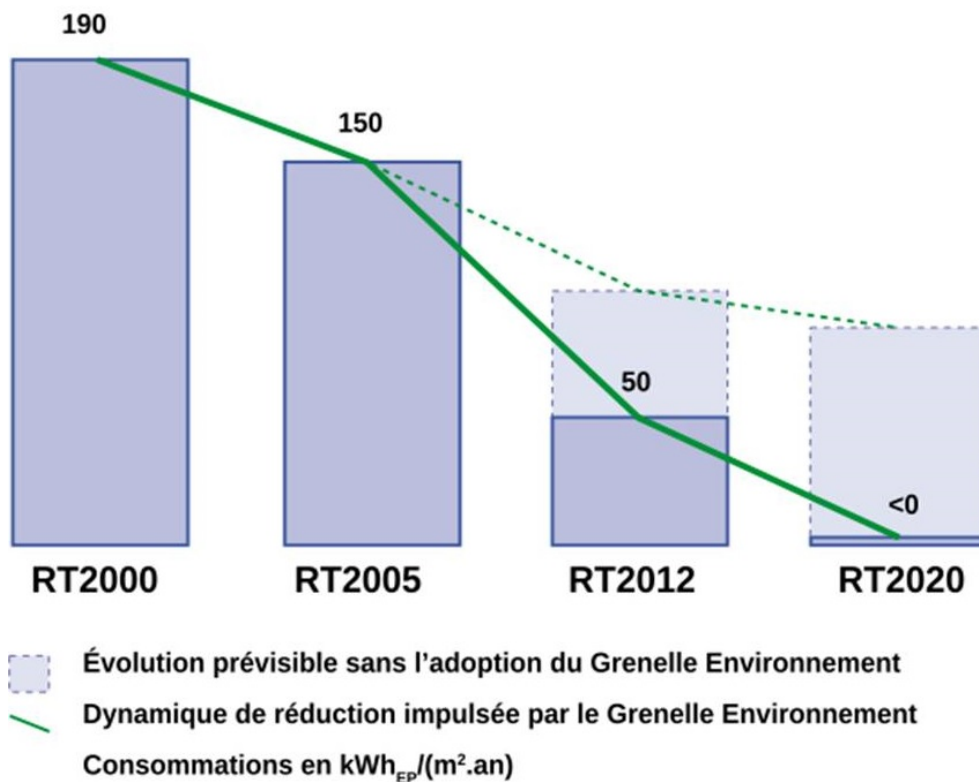
Champ : France entière (y compris DROM).

La consommation primaire de la France s'élève à 2 571 TWh en 2020 (en données non corrigées des variations climatiques). Le bouquet énergétique primaire réel de la France se compose de 40 % de nucléaire, 28 % de pétrole, 16 % de gaz naturel, 14 % d'énergies renouvelables et déchets et 2 % de charbon. Le bois-énergie, qui représente la quasi-totalité de la biomasse solide, demeure la première source d'énergie renouvelable consommée en France, loin devant l'électricité d'origine hydraulique. Son principal usage est le chauffage.

1.4. Objectifs de le France



Evolution de la consommation



Evolution des réglementations

Le but des réglementations thermiques est de progressivement baisser les consommations en augmentant les exigences. En effet, ces dernières ayant un impact direct sur le coût de la construction, car elles influent directement sur la qualité nécessaire des matériaux et de la mise en œuvre afin d'obtenir le résultat visé, il est important de laisser le temps aux entreprises et industriels de s'adapter aux changements.

2. Notion de confort thermique

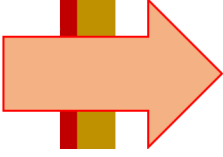
2.1. Confort thermique

Nous venons de voir que le secteur Résidentiel – Tertiaire était un gros consommateur d'énergie, en grande partie à cause du chauffage et de la climatisation. L'être humain a besoin de se sentir en situation de confort visuel, acoustique et thermique. Ici, nous allons nous concentrer sur le dernier point. Pour être en situation de confort thermique, il faut que l'air ambiant soit à la bonne température :

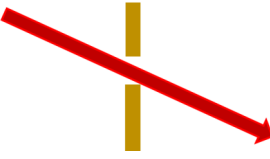
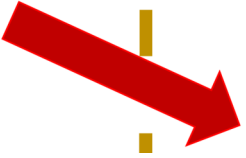
- Hiver : entre 19 et 20°C
- Eté : 26 °C et 27°C

En effet, le corps humain est sensible à une différence de température et non à une température précise. Il faut donc constamment s'assurer que l'air ambiant soit toujours à la bonne température, car les échanges entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment sont permanents.

Echanges de chaleur suivant l'épaisseur de l'isolant

Isolation	Illustration	Perte de chaleur	Besoin de chauffage
Faible		Forte	Fort
Forte		Faible	Faible

Echanges de chaleur suivant l'apport solaire

Apport solaire	Illustration	Besoin de chauffage
Faible		Fort
Fort		Faible

💡 Fondamental

On recherche donc la bonne combinaison entre de faibles déperditions et un grand apport solaire gratuit afin de faire baisser le besoin de chauffage.

Ceci est le point de départ c'est seulement ensuite qu'on fera le choix du type de chauffage

2.2. Déperditions et apports énergétiques

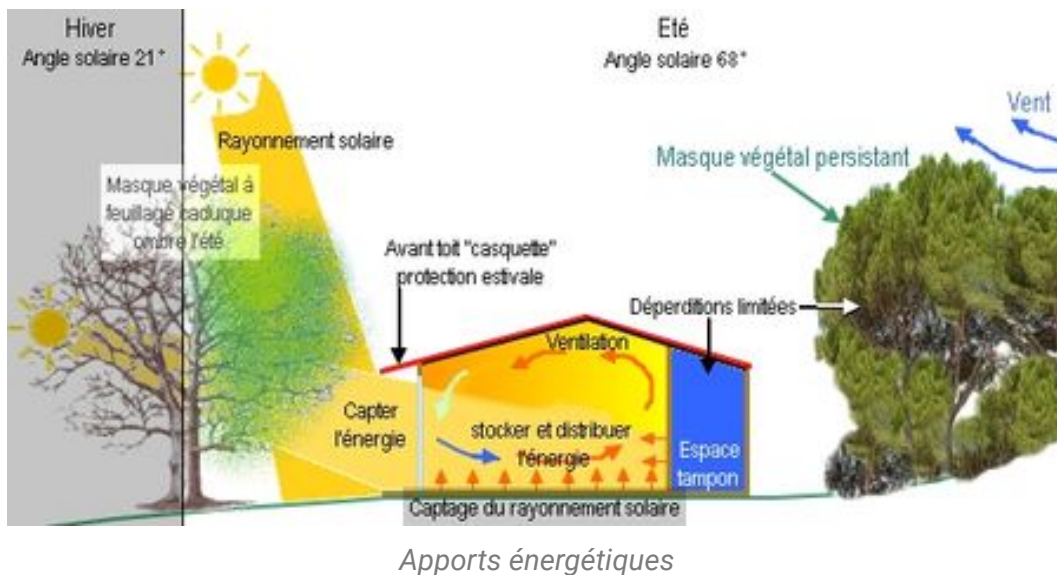
Déperditions

Les déperditions à travers l'enveloppe d'un bâtiment se situent à tous les niveaux. Il sera donc important de toutes les prendre en compte.



Apports

- Apports intérieurs : le chauffage est la source principale des apports intérieurs, on prendra un soin tout particulier au rendement énergétique du système de chauffage. La respiration et le rayonnement humains, l'électroménager et le multimédia sont aussi des sources potentielles d'apport énergétique. Il s'agira de les multiplier l'hiver et de les réduire au maximum l'été.
- Apport extérieur : le rayonnement solaire est une source importante d'apport énergétique gratuit. Le choix de l'orientation et des menuiseries et de la distribution des pièces intérieures devient primordial dans la dynamique énergétique.



3. Définitions fondamentales

3.1. Les définitions

La thermique

Az Définition

La thermique est la partie de la science qui traite de l'utilisation de l'énergie pour la production de chaleur ou de froid. C'est le mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de température entre deux objets ou deux milieux.

Déperditions thermiques

Az Définition

C'est la perte de chaleur que subit un bâtiment (échanges de fluide avec l'extérieur). Elle est d'autant plus significative quand l'isolation thermique est faible, ou que lorsque la différence de température est importante.

Les déperditions thermiques se produisent de trois façons :

- les déperditions à travers les parois, dites surfaciques
- les déperditions par ponts thermiques, dites linéiques
- les déperditions par renouvellement d'air, dites aérauliques

Conductivité thermique

Az Définition

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant, c'est l'effet recherché dans le bâtiment.

3.2. Distinction énergie et puissance

Energie

Az Définition

Elle caractérise la capacité à produire des actions, à modifier la température d'un corps ou à transformer la matière et qui se mesure communément en kWh mais en Joule dans le système international. Dans la thermique du bâtiment, elle exprimera un besoin ou une consommation de chauffage.

Puissance

Az Définition

C'est l'énergie fournie à un système par un autre par unité de temps. Elle se mesure en kW mais en Watt dans le système international. Dans la thermique du bâtiment, elle exprimera une perte instantanée de chaleur. Elle permettra de déterminer la puissance de chauffage nécessaire pour atteindre la température de confort souhaitée.

Les unités

Rappel

Les unités qui nous intéressent dans ce cours

Grandeur dérivée	Nom spécial de l'unité	Expression de l'unité en unités de base	Expression de l'unité en d'autres unités SI
force	newton	$(N=kg\cdot m\cdot s^{-2})$	
énergie, travail, quantité de chaleur	joule	$(J=kg\cdot m^2\cdot s^{-2})$	(Nm)
puissance, flux énergétique	watt	$(W=kg\cdot m^2\cdot s^{-3})$	(J/s)

Ici 3 unités parmi 22 unités SI ayant un nom spécial et un symbole particulier

Rappel

Facteur	Nom	Symbole	Facteur	Nom	Symbole
10^1	déca	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^6	méga	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	téra	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	péta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y

Préfixes du SI

3.3. Energie consommée

Dans la thermique du bâtiment, la quantité d'énergie consommée est mesurée en kWh. Elle correspond à celle consommée par un appareil de 1 000 watts (soit 1 kW) de puissance pendant une durée d'une heure.

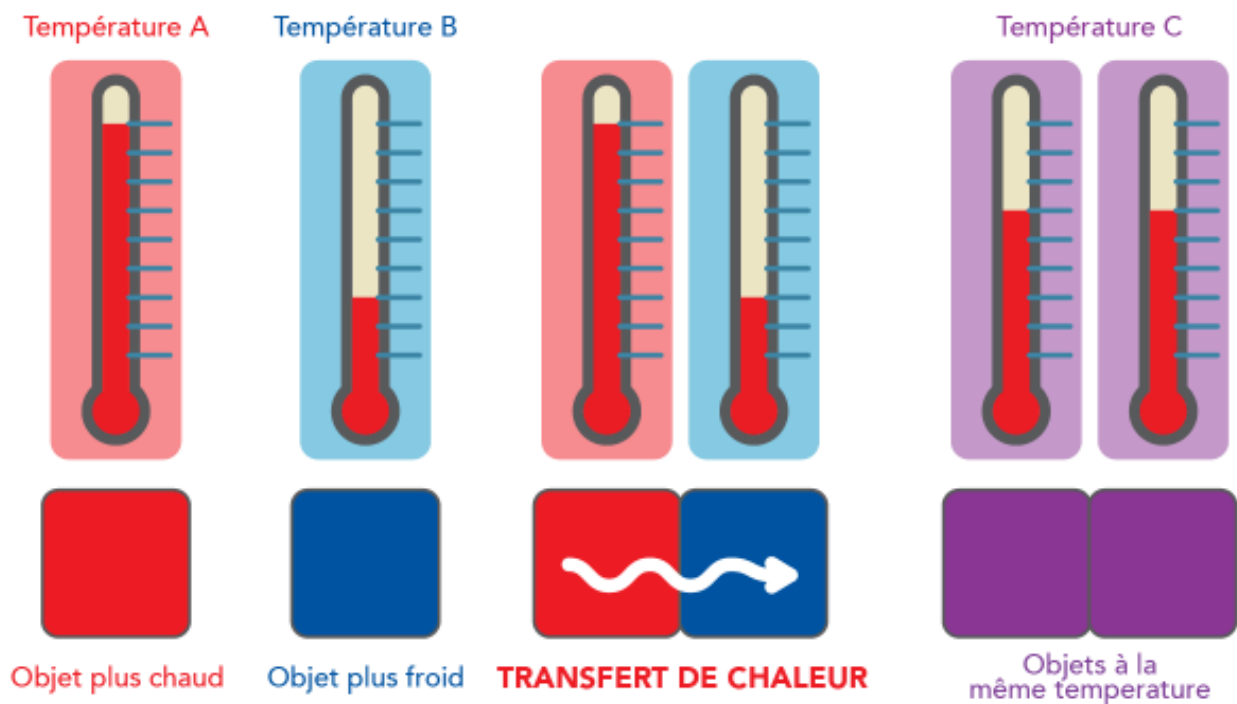
Quelques ordres de grandeur:

- 1 litre de fuel équivaut à 10 kWh
- 1 m³ de gaz naturel équivaut à 10 kWh
- 1 kg de bois sec équivaut à 4,5 kWh

3.4. Les modes de transfert d'énergie thermique

La chaleur se propage naturellement du corps le plus chaud vers le corps le plus froid

Le « froid » et le « chaud » sont deux choses complètement relatives et subjectives. L'un n'existe pas sans l'autre. Il est donc de rigueur de les évoquer en parlant de différence de température.

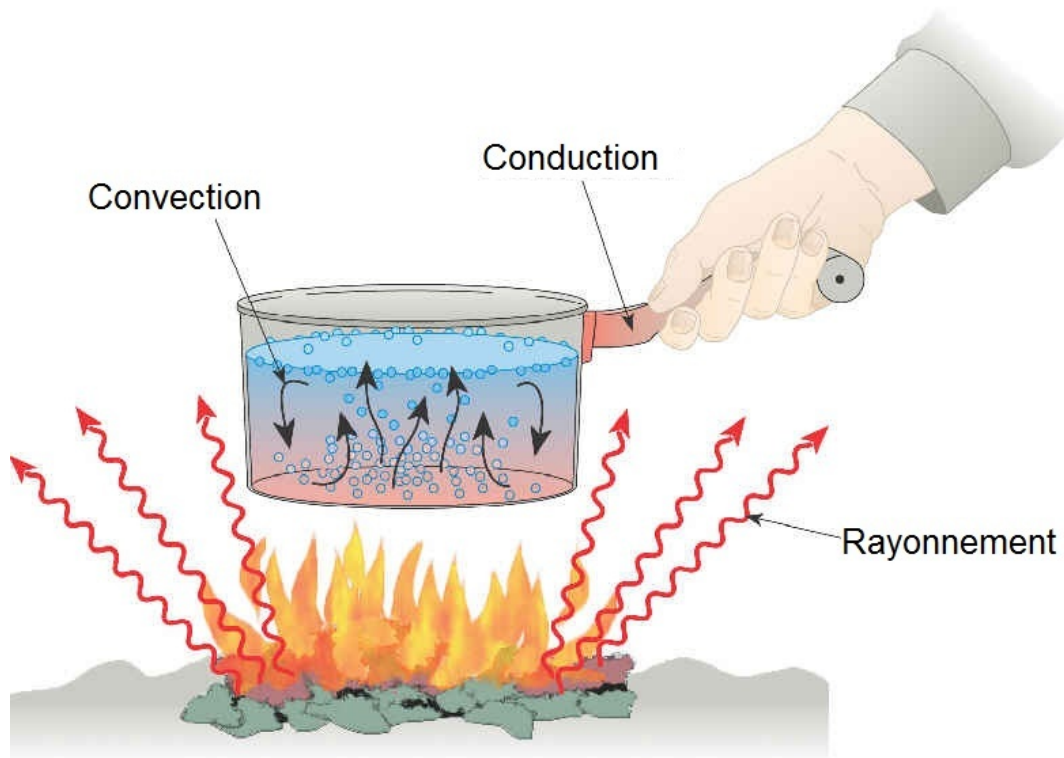


Du chaud vers le froid

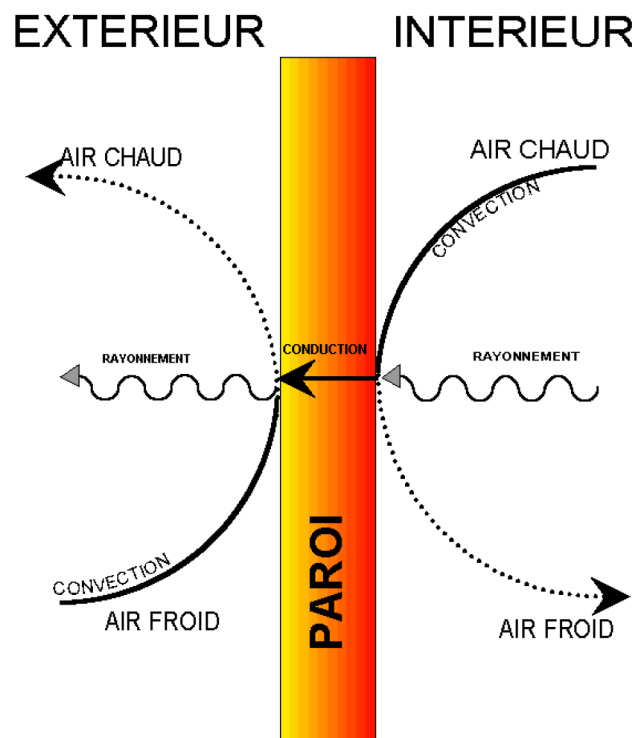
3.5. Les trois modes de transfert de chaleur

Une illustration des trois modes de transfert de la chaleur

- le rayonnement provoqué par les flammes.
- La conduction entre le manche métallique et la main
- la convection dans le liquide qui bout, mais aussi la convection due aux flammes, en direction de la main



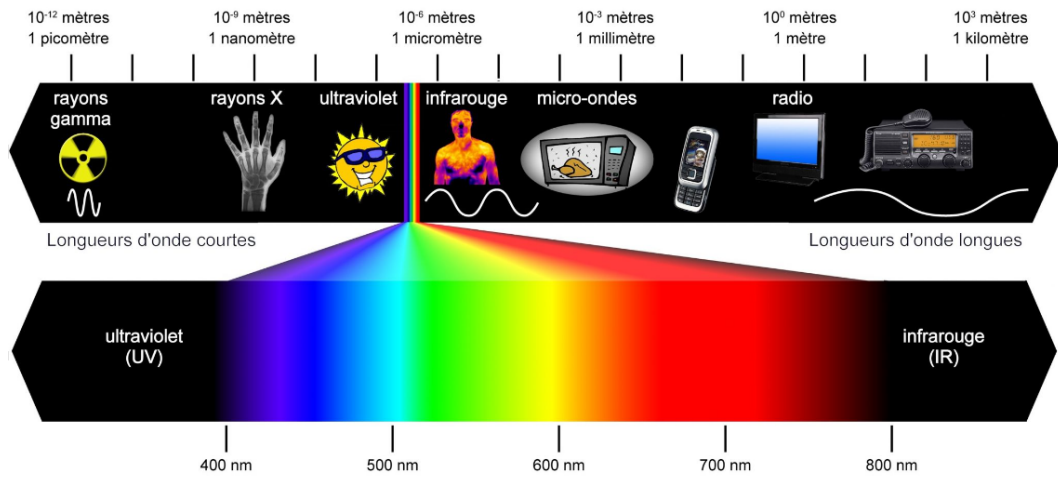
Casserole



Paroi

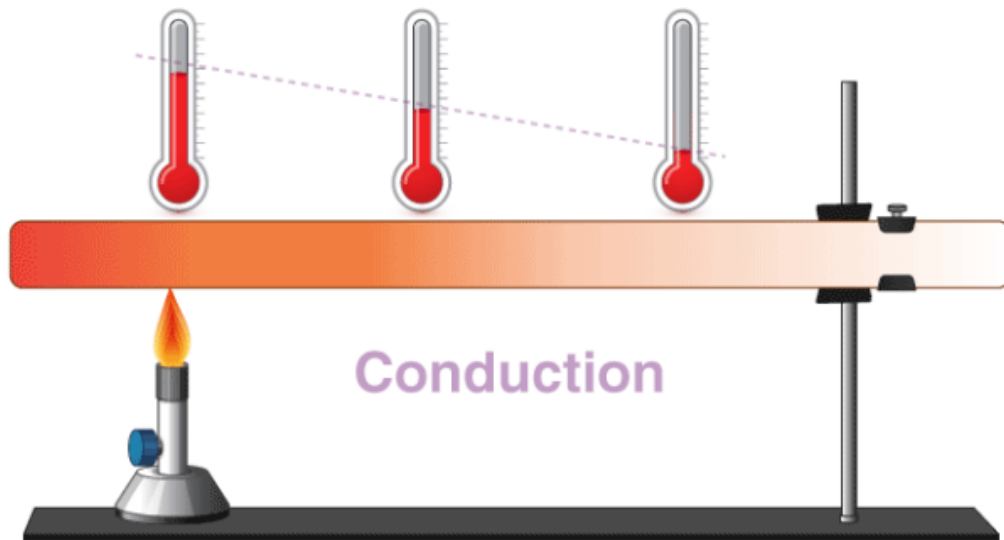
Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est le transfert d'énergie par ondes électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques transportent l'énergie à travers le vide spatial. Le rayonnement thermique est la façon dont le soleil chauffe la terre. Son énergie voyage sous forme d'ondes dans l'espace, et non à travers des atomes ou des molécules. D'autres objets chauds, tels qu'un grille-pain, votre corps ou un micro-ondes utilisent aussi le rayonnement.



La conduction

La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement.

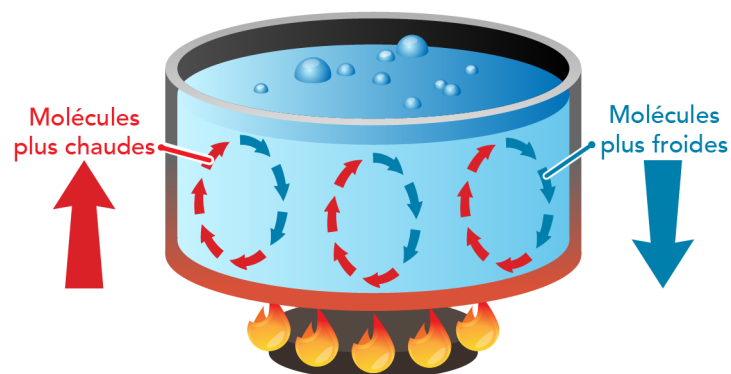


La conduction

La convection

La convection est un mouvement dans un gaz ou un liquide qui est causé par des différences de température.

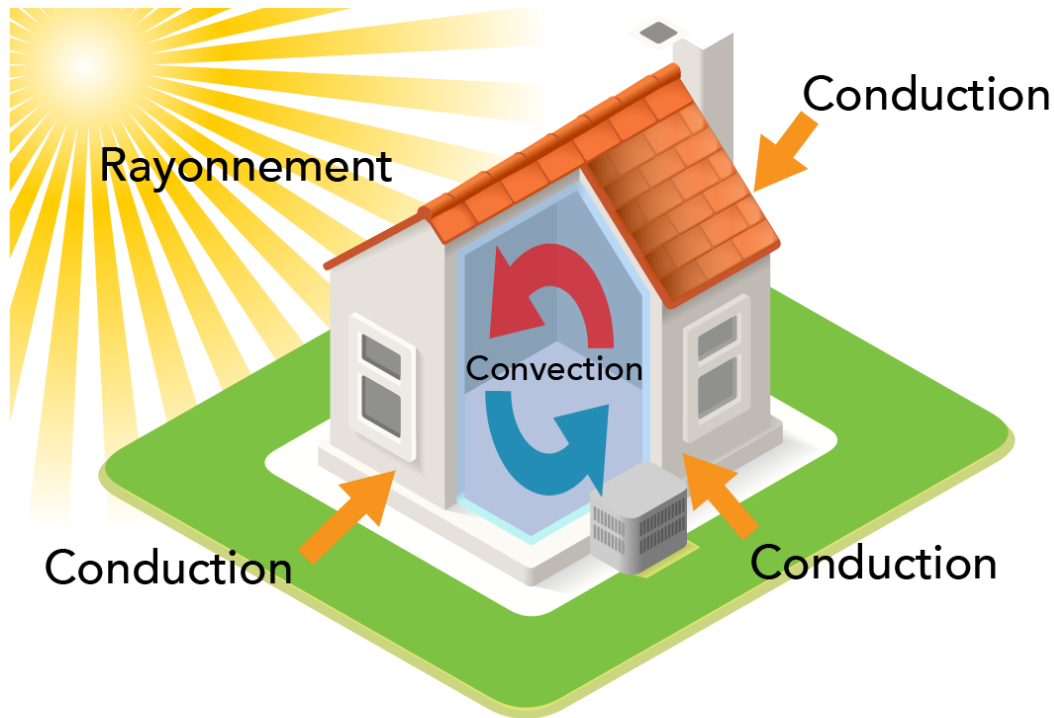
CONVECTION



La convection

Transfert de chaleur dans une maison

- La conduction peut réchauffer la maison en été. La chaleur de l'air extérieur est transférée dans la maison par les murs ou le toit. En hiver, elle la refroidit. La chaleur de l'air chaud à l'intérieur de la maison est transférée à l'extérieur par les murs ou le toit.
- Le phénomène de convection se produit dans chacune des pièces, alors que l'air plus chaud s'élève vers le plafond et que l'air plus frais revient vers le plancher. La convection explique en outre pourquoi il fait toujours plus chaud au rez-de-chaussée qu'au sous-sol.
- Enfin, le rayonnement thermique transfère la chaleur du Soleil au toit de la maison, aux fenêtres, etc.



Les transferts thermiques d'une maison

4. Performance énergétique d'un bâtiment

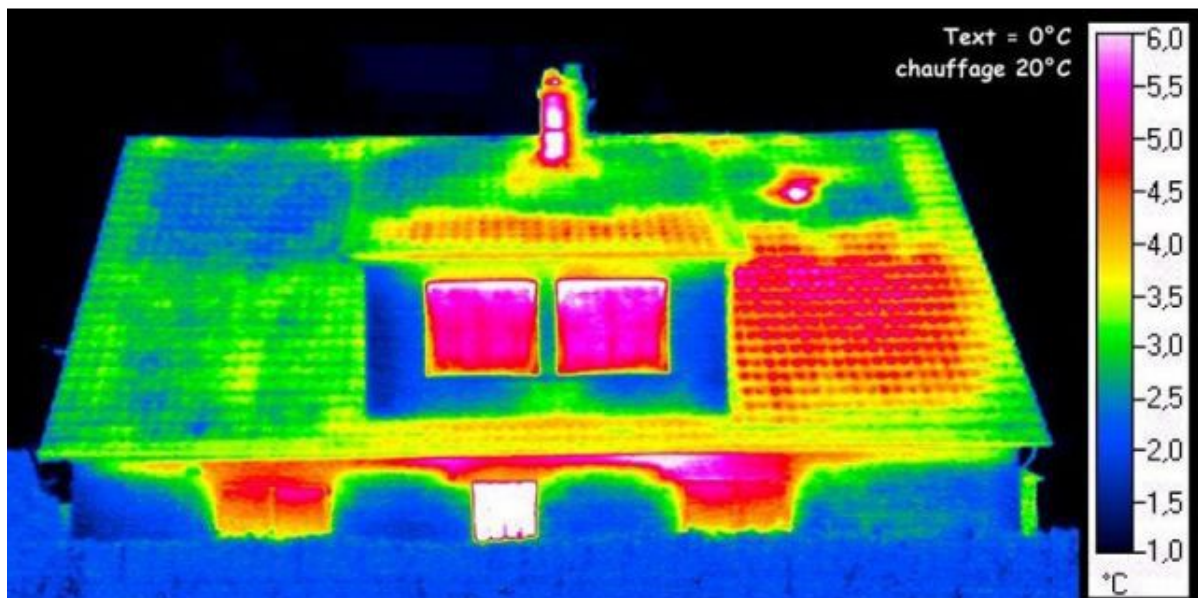
4.1. Quantification des principales déperditions énergétiques

Illustration



Les combles et la toiture

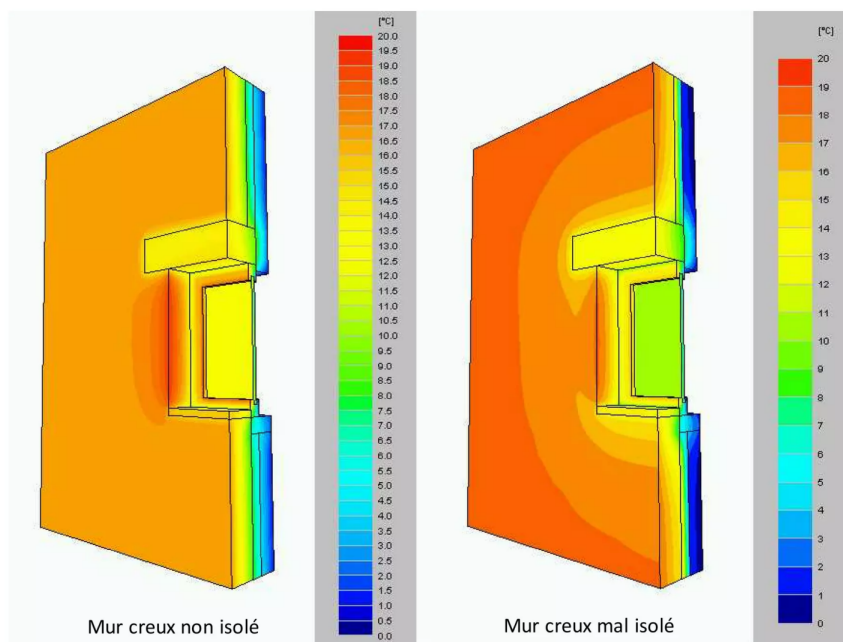
Ils constituent la 1ère zone de perte de chaleur : $\approx 30\%$. Ils doivent être isolés en priorité, l'air chaud monte et si la toiture ou les combles sont mal isolés, les pertes énergétiques sont importantes.



Thermique d'un toit

Les parois verticales ; le mur manteau

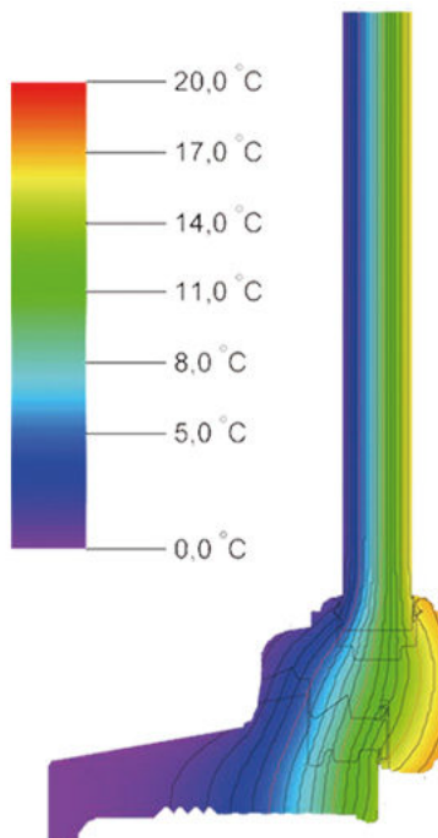
Pour éviter au maximum les déperditions de chaleur, il est important que les murs soient bien isolés. Après le toit, les murs sont la deuxième source de perte de chaleur.



Thermique paroi

Les menuiseries extérieures

Environ 15 % de la chaleur s'échappe par les fenêtres. La qualité de la structure de la menuiserie est très importante, une fenêtre bas de gamme finit par mal fermer et mal isoler. Le choix du matériau également va également influencer sur la performance globale de la fenêtre. Le PVC, le bois ou l'aluminium sont très répandus.



Thermique d'une fenêtre

4.2. Les ponts thermiques

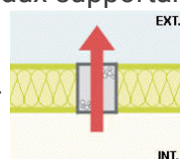
Il s'agit d'une discontinuité dans l'isolation qui est due à des contraintes structurelles ou de mise en œuvre. Ils peuvent représenter jusqu'à 5 à 7% des déperditions. Malgré ce faible pourcentage, il est très important de les traiter. A ces endroits, en hiver, la température superficielle de l'enveloppe est plus basse que celle des surfaces environnantes. Il peut y avoir de la condensation qui s'y forme créant ensuite des désordres.

- des dépenses énergétiques
- un inconfort sur le plan de l'hygiène
- une détérioration progressive des matériaux ; moisissure, altération de la peinture/enduit/papier peint, altération de l'isolant etc...

Ces ponts thermiques découlent, en général de contraintes :

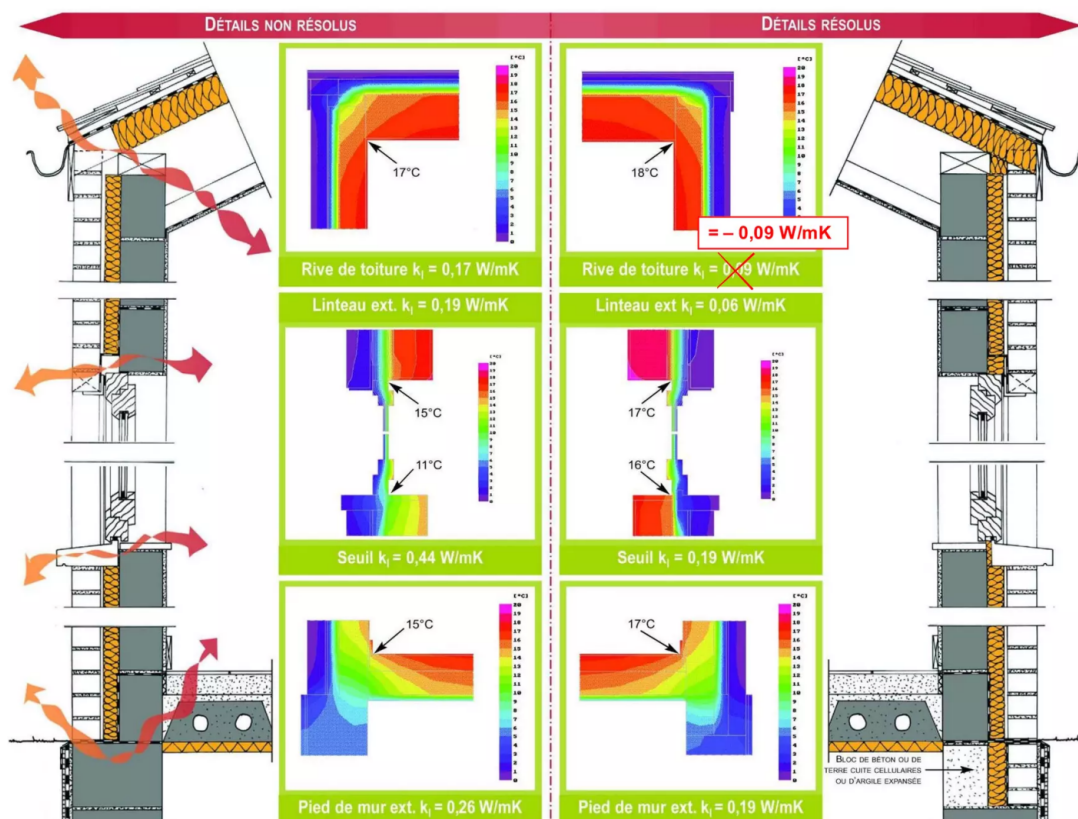
- **constructives** liées à l'ajout nécessaire de matériaux supportant les chargements extérieurs

sous la forme de poutre ou poteaux par exemple.



- **géométriques** liées à un changement de section de matériau. Par exemple à la présence

d'un balcon, mur de refend, coffret de volet roulant, etc...



Ponts thermiques

4.3. Le sol

Environ 7 à 10% des pertes de chaleur peuvent s'effectuer par le sol. Un revêtement (plancher, moquette) isole déjà un peu, mais il ne suffit pas. Il est nécessaire d'isoler en fonction du type de sol. Le vide sanitaire de 60 à 80 cm de hauteur entre votre sol et la terre ventilé sous les sols est une bonne solution éviter les éventuels problèmes d'humidité (écoulements d'eau, etc.) mais ne constitue en aucun cas une isolation. En effet, l'air n'y est pas immobile. Dans le cas d'une dalle sans vide sanitaire, la confection d'un hériçon est obligatoire pour éviter les remonter d'humidité par capillarité.

En construction, un hériçon est une couche de moellons placés « sur chant », soit de pierres concassées ou roulées de quelque 25 cm d'épaisseur. Posé sur un sol en terre battue recouvert d'un centimètre de chaux hydraulique, le hériçon sert d'assise à une dalle sur terre-plein et aussi à bloquer les remontées d'humidité, en remplacement d'un vide sanitaire. On appelle cette structure « hériçon » car les pierres sont dressées à la verticale un peu comme les piquants d'un hériçon. Les vides entre les pierres et le faible nombre de points de contact entre elles font que l'eau, s'il y en a un peu sous la maison, ne peut pas remonter par capillarité. Cette technique a évolué. On a mis des cailloux propres, parfois du sable stérile. Dans ce dernier cas, il y a beaucoup de points de contact entre les divers grains et l'eau, l'humidité peut donc remonter par capillarité. Pour éviter ce problème, avant de couler la dalle, on tend une feuille de polyane sur l'ensemble, ou du béton hydrofugé.



Hériçon

4.4. Le renouvellement d'air

Le renouvellement de l'air doit être suffisant du point de vue de l'hygiène, mais il doit être le plus réduit possible pour éviter les déperditions énergétiques dues à l'air froid entrant. Pour ce faire, on privilégiera les ventilations avec capteurs hygrométriques ou double flux qui sont munies d'un échangeur thermique air/air.

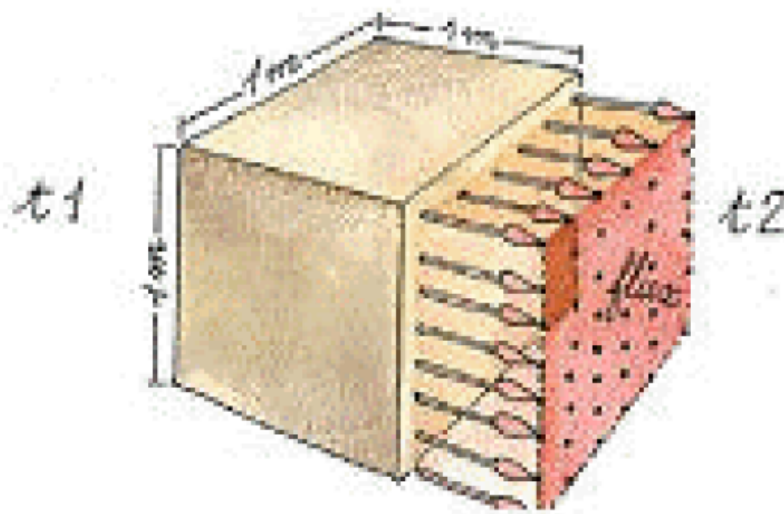
5. Les déperditions à travers les parois

5.1. Les parois

Beaucoup d'éléments d'une construction ; les murs, les fenêtres et les toits ont une épaisseur faible par rapport aux deux autres dimensions. Ces éléments sont appelés plaques en résistances des matériaux. Leur modélisation thermique feront l'objet de notre étude.

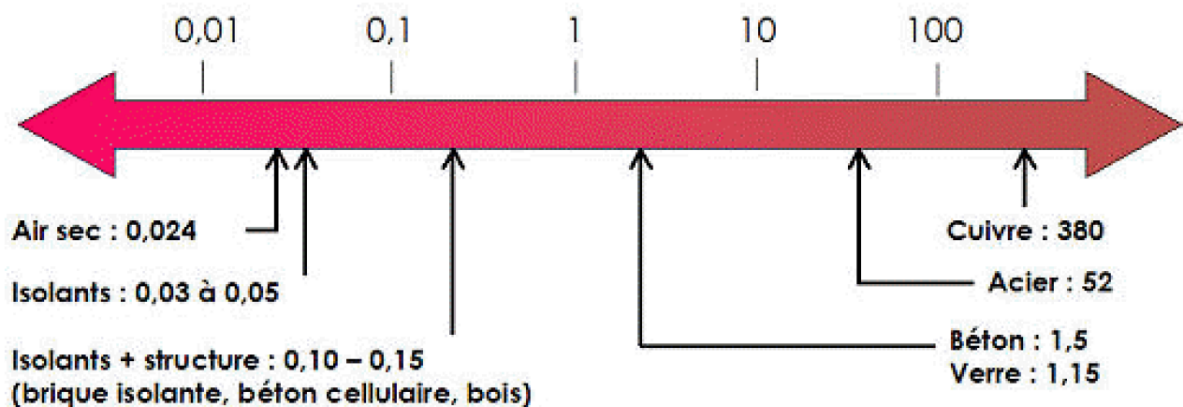
La conductivité thermique λ

La conductivité thermique λ (lambda) est la puissance (en Watts) qui traverse 1 m^2 de paroi sur 1 mètre d'épaisseur, lorsqu'elle est soumise à une différence de température de 1°C . **Elle se mesure en W/m.K**



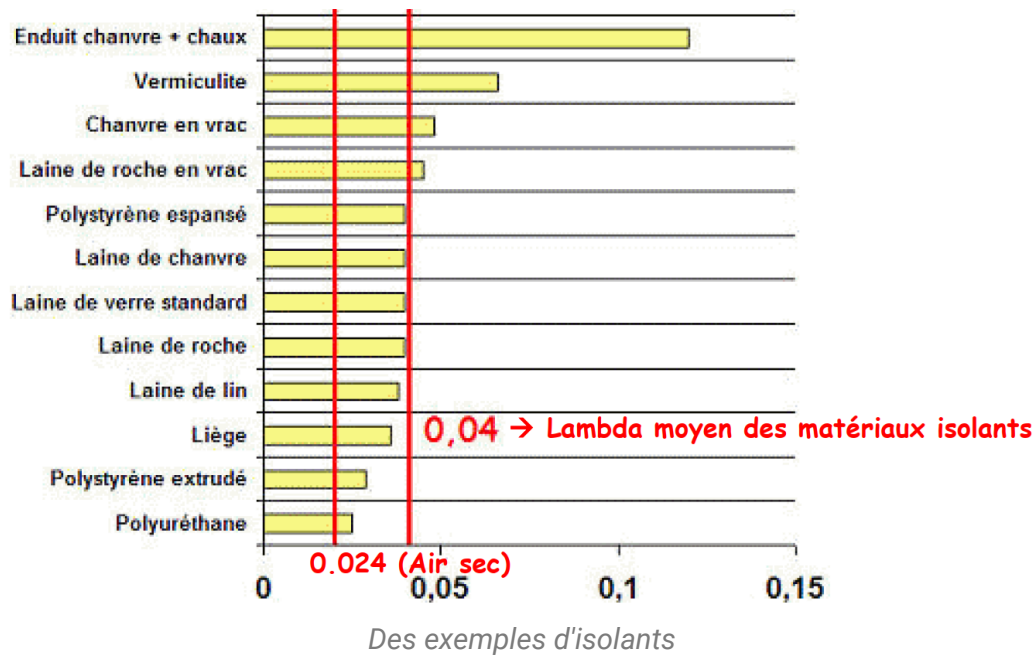
Détermination λ

Ordre de grandeur



Ordre de grandeur

- L'air est un très bon isolant mais à condition d'être immobilisé. L'air en mouvement évacue la chaleur. C'est en effet l'air « emprisonné » dans les matériaux qui procure leur capacité isolante.
- Un lien qui répertorie la conductivité thermique de plus de 1000 matériaux.



La résistance thermique (R_{th})

La capacité d'un matériau à résister au transfert de chaleur est appelée « résistance thermique » ou R. Plus R est élevé, plus le produit est isolant. **Exprimée en $m^2.K/W$** . R s'obtient par le rapport de l'épaisseur en mètres sur la conductivité thermique du matériau.

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

On peut ainsi dire que « R » évalue la conductivité du matériau pour une épaisseur donnée.

Coefficient de déperdition thermique (U)

La déperdition thermique surfacique d'une paroi représente l'inverse de la résistance thermique totale.

$$U = \frac{1}{R_{th}}$$

U est la puissance qui traverse $1m^2$ de surface pour une différence de température de $1^\circ C$ entre l'intérieur et l'extérieur. **Son unité s'exprime en $W/m^2.K$** .

Elle se mesure en prenant en compte la résistance thermique de la paroi et la somme des résistances superficielles intérieures et extérieures.

Plus la déperdition thermique U est faible, plus la paroi est performante thermiquement.

5.2. Les transferts dans les parois

Flux de chaleur

La conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse, et est décrite par la loi dite de Fourier. Elle traduit la variation de la température au travers d'un milieu. Cette loi qui n'est pas à retenir sous cette forme s'écrit en trois dimensions de la manière suivante :

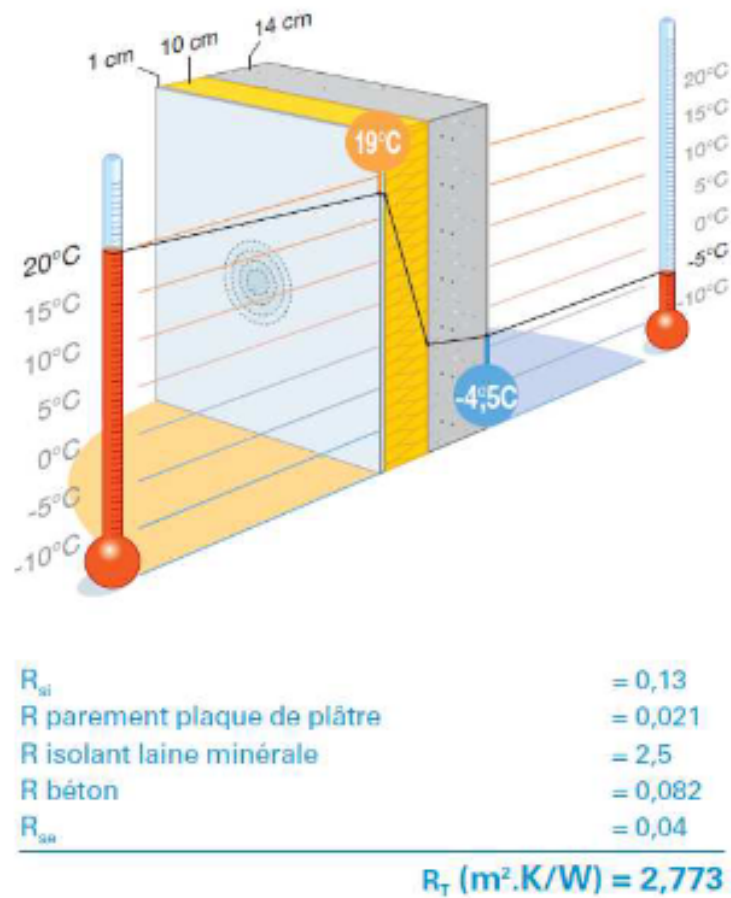
$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$$

La loi de Fourier est une loi phénoménologique analogue à la loi d'Ohm pour la conduction électrique.

Az Définition

Nous la retiendrons pour une paroi sous la forme suivante :

Chute de température dans une paroi isolée



Flux dans une paroi

Expression de la densité de flux entre l'intérieur et l'extérieur

$$\varphi = U(T_i - T_e) = \frac{(T_i - T_e)}{R_t} = U \Delta T$$

- φ : flux en W/m^2
- T_e : température extérieure en $^{\circ}C$
- T_i : température intérieure en $^{\circ}C$
- U : coefficient de déperdition thermique en W/m^2K
- R : résistance thermique en m^2K/W

Échelle kelvin des températures

Rappel

L'échelle des températures Celsius est, par définition, la température absolue décalée en origine de 273,15 K :

$$T_K = T_C + 273,15$$

Avec :

- T_K la température en kelvins
- T_C la température en degrés Celsius

On en déduit que :

- le zéro absolu est situé à $-273,15\text{ °C}$
- Les températures en kelvins ne sont jamais négatives
- les intervalles de l'échelle du degré Celsius sont identiques à ceux du kelvin.

Az Définition

Expression du flux entre l'intérieur et l'extérieur au travers d'une paroi de surface S :

$$\Phi = \frac{S \cdot \Delta T}{R_{th}}$$

- Φ : flux en W
- S : surface en m^2

Quantité de chaleur

Dans la notion de chaleur massique, il y a la notion de stockage d'énergie.

Il faut un certain temps d'ensoleillement pour chauffer une pierre, et une pierre reste encore chaude la nuit après un fort ensoleillement.

$$Q = m \cdot C \cdot (T_{finale} - T_{initiale})$$

- Q : quantité de chaleur en [J]
- m : masse en [kg]
- C : chaleur massique en [J/kg.K].

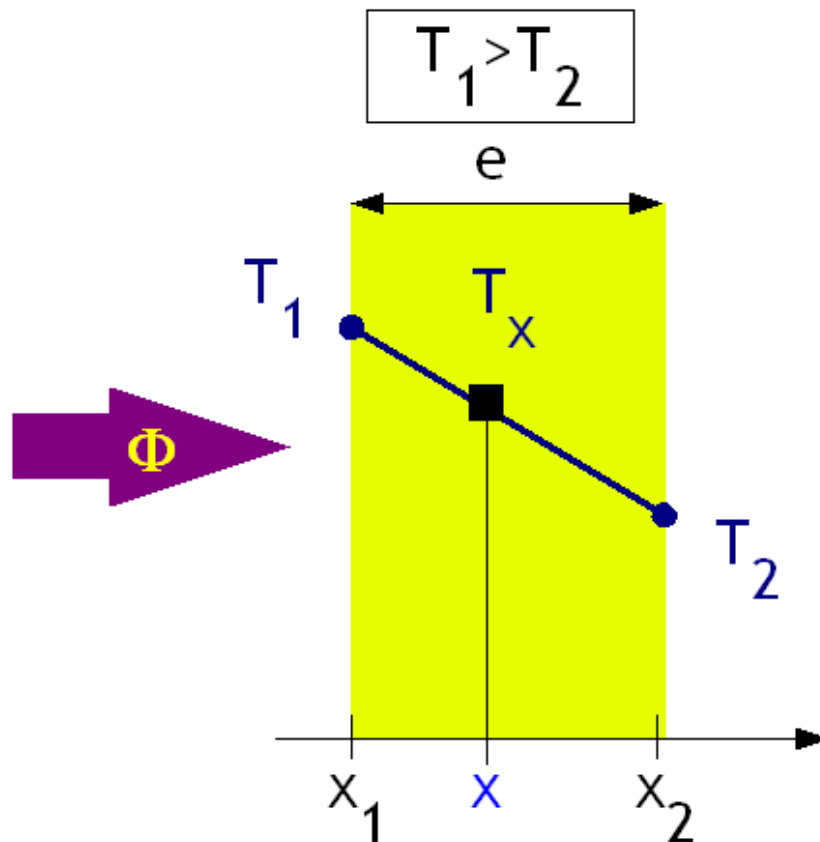
On peut distinguer :

- C_v : la capacité thermique isochore massique
- C_p : la capacité thermique isobare massique, c'est celle-ci que nous considérerons ici.
- T : température en [K] ou [°C]

L'inertie thermique est la prédisposition d'un matériau à garder longtemps sa température initiale lorsqu'intervient une perturbation de cet équilibre thermique. Si la perturbation l'amène vers une nouvelle température d'équilibre, cette inertie thermique représente la "lenteur" avec laquelle ce nouveau point d'équilibre est atteint.

5.3. Analogie électrique

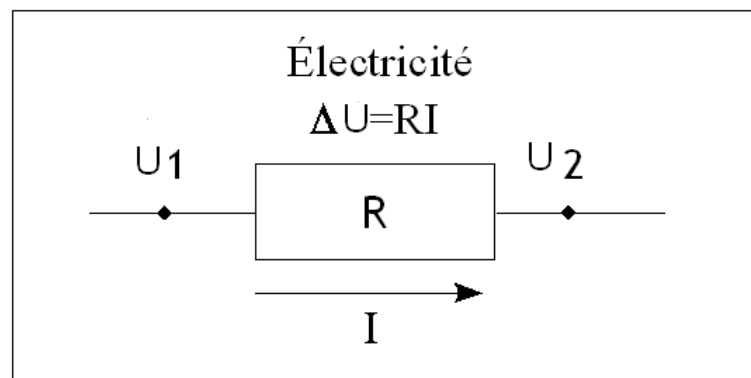
Par analogie avec l'électricité (loi d'Ohm), nous pouvons mettre en parallèle les expressions thermiques et électriques pour des parois.



Transmission dans la paroi

https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance_thermique

https://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique



Résistance électrique

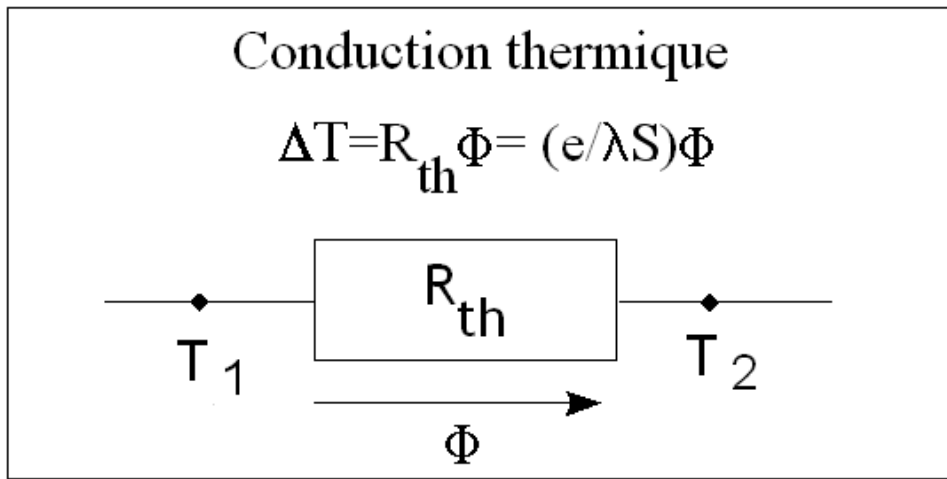
$$[U_{\{1\}} - U_{\{2\}}] = RI$$

A partir de l'expression du flux Φ à travers une paroi et la résistance thermique R_{th}

$$\Phi = U \cdot S \cdot (T_{\{i\}} - T_{\{e\}}) = \frac{S \cdot (T_{\{i\}} - T_{\{e\}})}{R_{th}} = U \cdot S \cdot \Delta T$$

On peut écrire

$$\Delta T = \frac{\Phi \cdot e}{S \cdot \lambda}$$



Conduction thermique

Avec

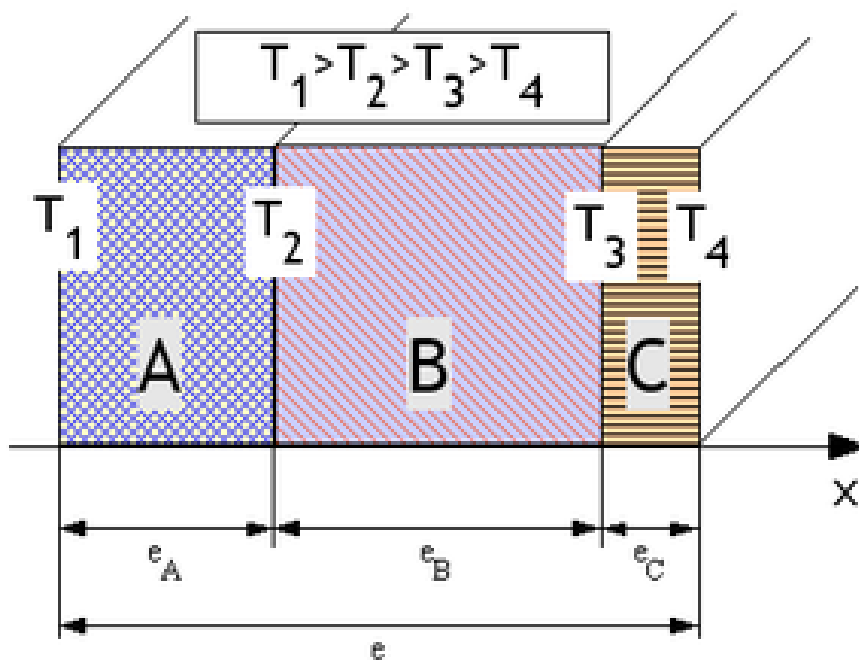
$$T_1 - T_2 = \frac{e}{\lambda S} \Phi$$

Par identification on aura :

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

- R_{th} exprimé en $K.W^{-1}$

Surfaces planes en série



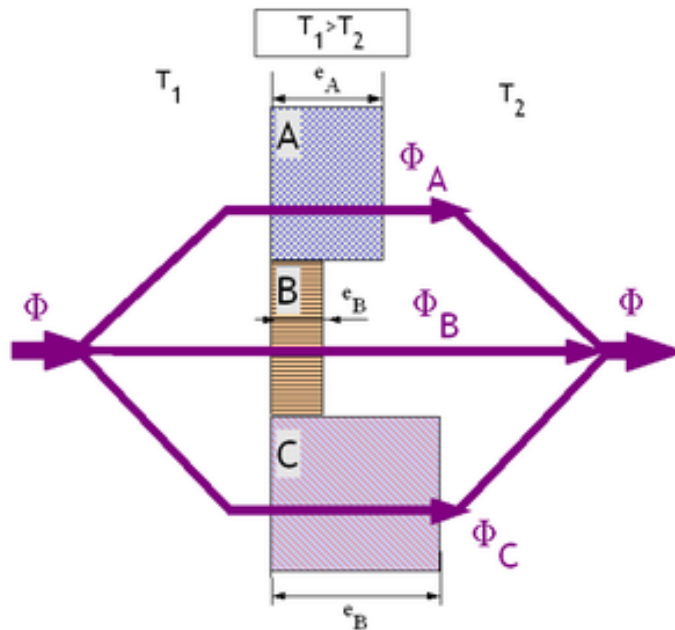
Surfaces planes en série

On considère des matériaux A B et C d'épaisseur respective e_A , e_B et e_C et de conductivité radiative respective λ_A , λ_B et λ_C . On considère que le contact entre chaque couche est parfait ce qui veut dire que la température à l'interface entre 2 matériaux est semblable dans chaque matériau Enfin la surface de contact entre chaque matériau est constante ce qui implique un flux surfacique constant.

Les résistances thermiques s'additionnent :

$$T_1 - T_4 = \left(\frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} \right) \Phi = (R_{thA} + R_{thB} + R_{thC}) \Phi$$

parallèle



Couplage en parallèle

On considère des matériaux plans superposés côte à côte. C'est par exemple le cas d'un mur avec une fenêtre. Les hypothèses sont semblables à celles d'une surface plane simple. En supplément, on considère que la température est uniforme en surface de chaque élément (T_1) et (T_2) . Soit (S_A) , (S_B) et (S_C) les surfaces respectives.

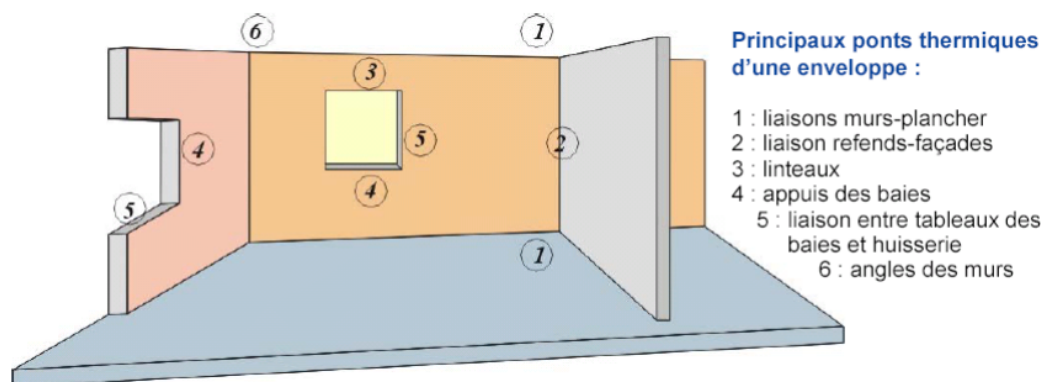
Par la suite, on fait l'hypothèse que le flux est toujours perpendiculaire à la paroi composée ; ceci n'est pas réaliste puisque la température de surface de chaque élément qui la compose est différente et qu'il existe donc un gradient de température latéral à l'origine des ponts thermiques. Aussi, il est indispensable de corriger le flux de chaleur calculé dans la paroi composée avec **coefficients de déperdition linéiques**, spécifiques à chaque jonction de paroi.

Les conductances thermiques s'additionnent :

$$\frac{1}{R_{\text{th}}} = \frac{1}{\left(\frac{e_A}{\lambda_A S_A} \right) + \left(\frac{e_B}{\lambda_B S_B} \right) + \left(\frac{e_C}{\lambda_C S_C} \right)} = \frac{1}{R_{\text{thA}}} + \frac{1}{R_{\text{thB}}} + \frac{1}{R_{\text{thC}}}$$

Pont thermique et coefficient de déperdition linéique (Ψ)

Un pont thermique est une zone ponctuelle ou linéaire qui, dans l'enveloppe d'un bâtiment, présente une moindre résistance thermique ; jonction de deux parois par exemple. Les ponts thermiques constituent un point froid où l'humidité peut se condenser



Pont thermique

Les déperditions thermiques à travers 1 m de liaison entre deux parois, au niveau d'un pont thermique sont caractérisées par un coefficient de transmission linéique :

- ψ exprimé en W/m.K.

Chaque type de pont thermique possède un ψ qui lui est propre.

On peut alors définir le flux total perdu au niveau d'un pont thermique qui s'exprime :

- Φ en Watt [W]

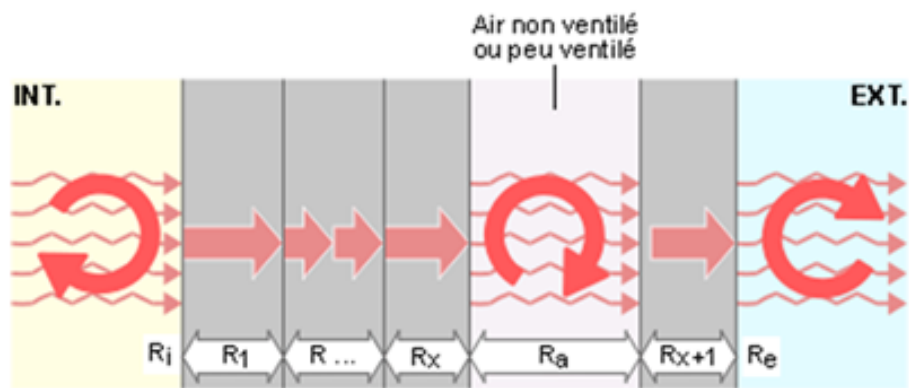
$$\Phi = \psi \cdot L \cdot (T_i - T_e)$$

- L : longueur de pont thermique considéré
- T_i : température intérieure
- T_e : température extérieure

Résistance thermique d'échange superficiel

👁 Exemple

La transmission de la chaleur de l'air ambiant à une paroi et vice versa se fait à la fois par rayonnement et par convection. On peut modéliser ces actions par un couplage en série.



Résistances superficielles

$$R_T = R_i + R_1 + R_{...} + R_x + R_a + R_{x+1} + R_e$$