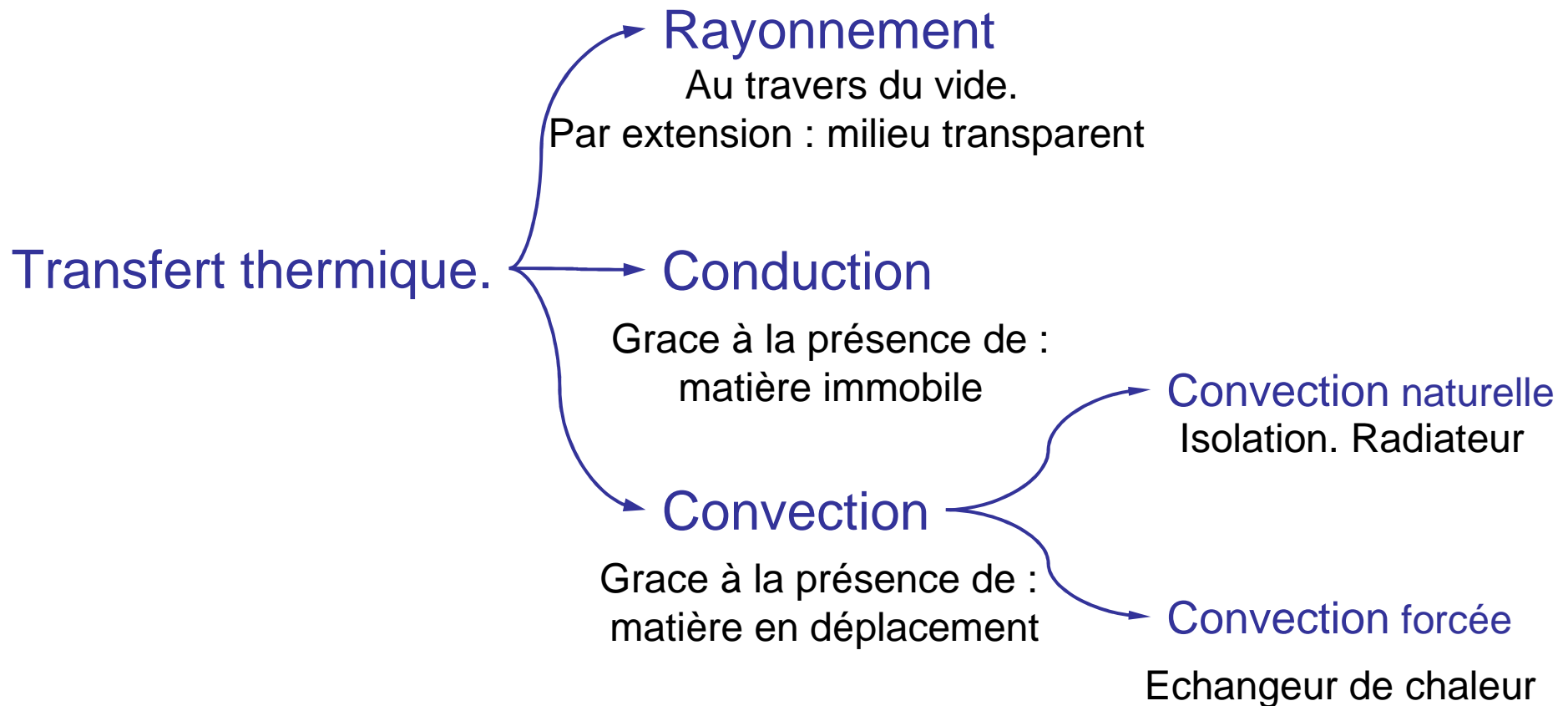


Transfert thermique, Isolation.

✓ Quelques rappels théoriques.

➤ Les 3 phénomènes.



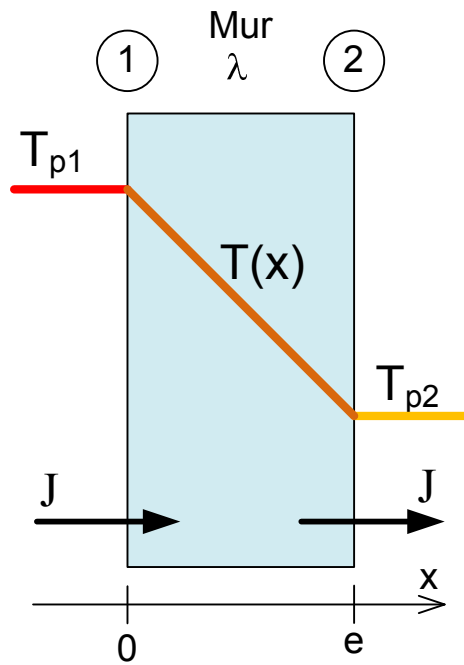
Transfert thermique, Isolation.

✓ Conduction.

$$J = \frac{\lambda}{e} \cdot (T_{P1} - T_{P2})$$

- Loi de Fourier

$$T_{p1} - T_{p4} = \left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} \right) \cdot J$$



J Flux par unité de surface

Unité : $W \cdot m^{-2}$ ($J > 0$)

λ Conductivité thermique

Unité : $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

$$\lambda_{or} = 400 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \quad \lambda_{air} = 0.02 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

Coef. de

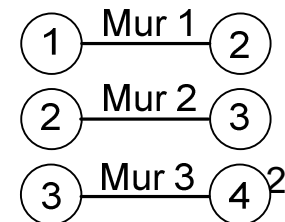
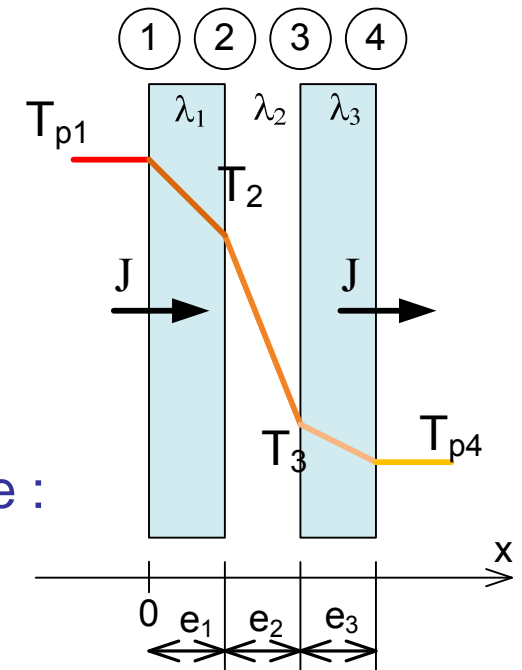
transmission thermique :

$$U_{th} = \frac{\lambda}{e} \quad \text{Unité : } W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Résistance thermique :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \quad \text{Unité : } m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$$

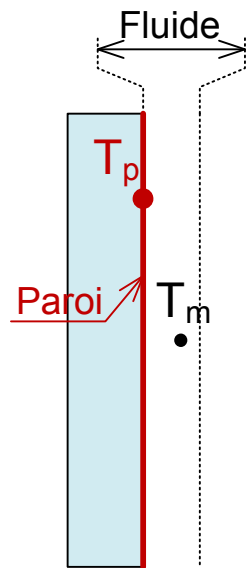
- Puissance thermique : $\Phi = \frac{S}{R_{th}} \cdot (T_{P1} - T_{P2})$ Unité : W



Transfert thermique, Isolation.

✓ Convection.

Phénomène complexe liant mécanique des fluides et transferts thermiques



- Loi de Newton $|T_p - T_m| = h \cdot J = \frac{h}{S} \cdot \Phi$

On définit un coefficient d'échange thermique : h

Unité : $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

$$h_{\text{air calme}} : 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

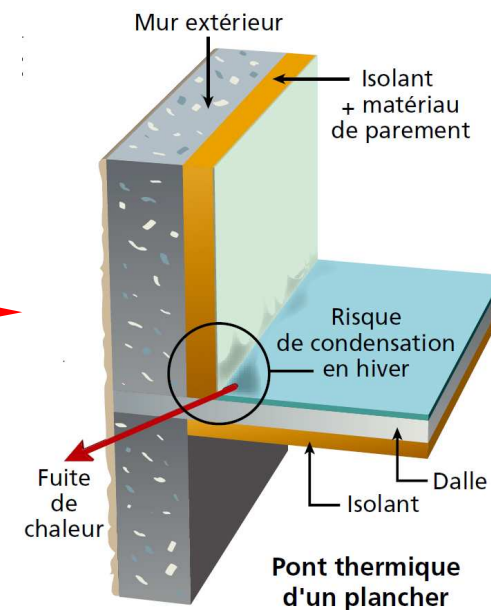
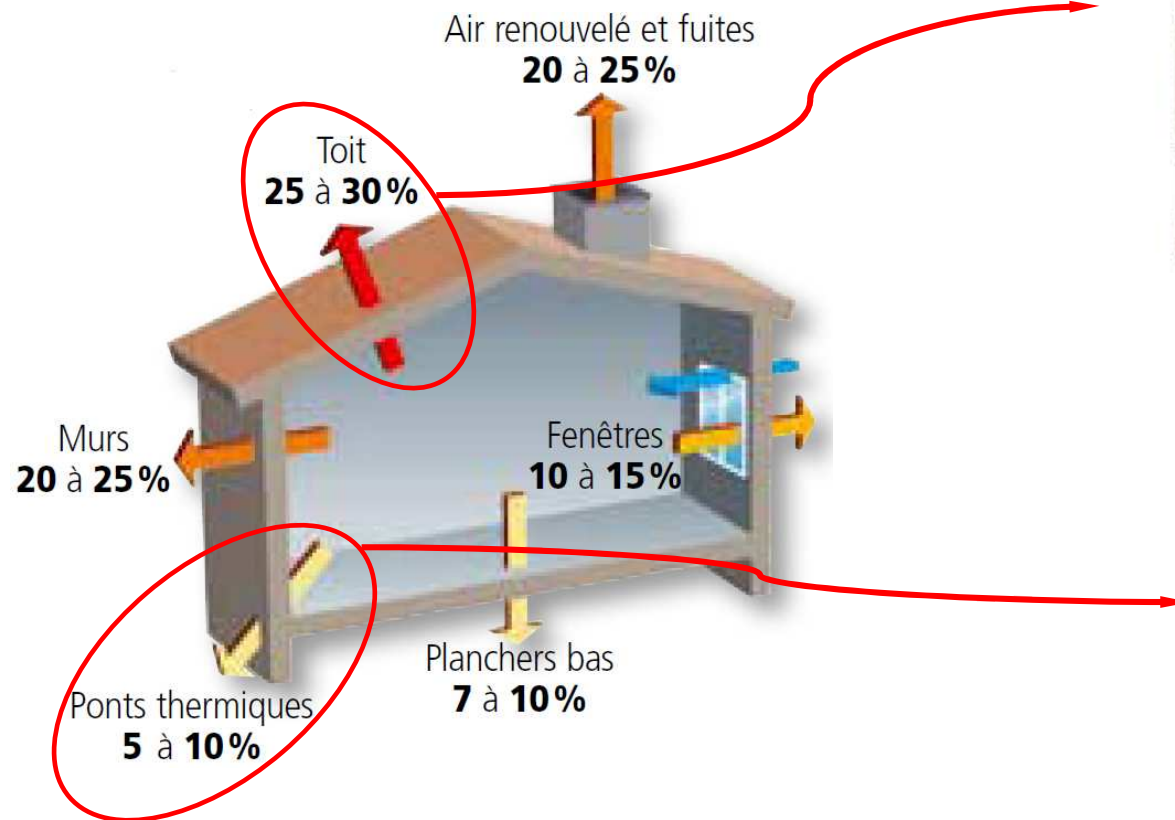
$$h_{\text{vapeur d'eau chaude}} : 5 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

T_m : température moyenne du fluide au voisinage de la paroi
 T_p : température de la paroi

Transfert thermique, Isolation.

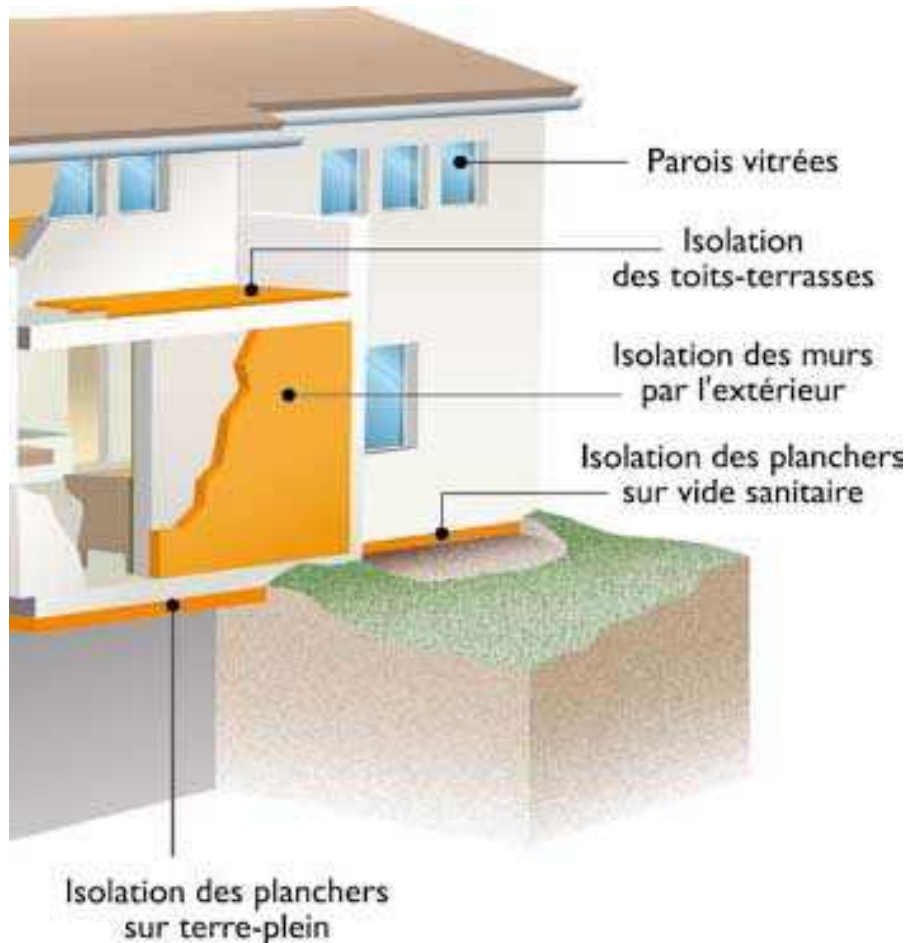
✓ Les matériaux et procédés.

➤ Bilan des pertes.



Transfert thermique, Isolation.

➤ Ou isoler?



➤ Comment isoler ?

- Par les matériaux

- le type
- l'épaisseur / la densité

- Par le choix des techniques

- intérieur
- extérieur
- répartie



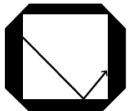
- Par un travail sur les ouvertures

- simple vitrage
- double / triple vitrage

Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ La fiche technique.

CE			
Nom ou marque distinctive Adresse déposée du fabricant 2 derniers chiffres de l'année d'apposition marquage CE NY certificat de conformité CE NYEN de cette norme produit Identité du produit			
Organisme notifié NYXXXXX		code de désignation	
Euroclasse A2 S1d0	R m ² .K/W 1,35	λ. W/m.K 0,038	épaisseur mm 50
m ² /colis 3,60	pièces par colis 3	longueur mm 1200	largeur mm 1000
NOM PRODUIT XXXXXXX		 <small>3 655120 252358691 1569</small>	
NY contrôle + usine			
 ACERMI 02/000/YY/93 xxxxxxxx		En option : profil d'usage ISOLE certifié	
AT CSTB NYXX/YY-ZZZZ			
Nom ou marque commerciale			

Norme incendie.

Les classes A1 et A2, A2, A1fl et A2fls1 sont attribuées aux produits très peu combustibles.

S(1,2,3) pour la production de fumées (s pour "smoke").

d(0,1,2) pour la chute de gouttes et de débris enflammés (d pour "drop").

Epaisseur de l'isolant

Résistance thermique

Résistance thermique

Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

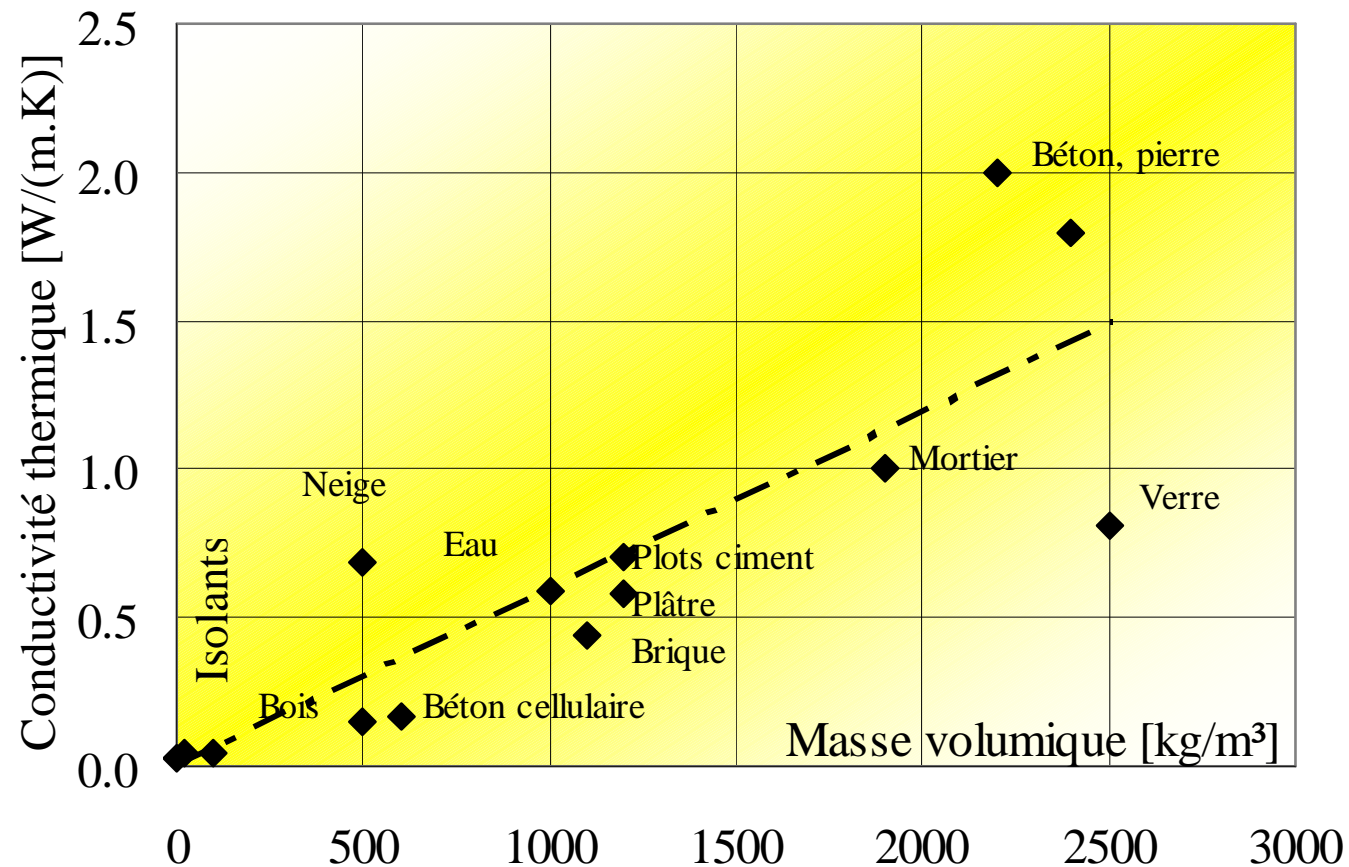
✓ Qualités d'un isolant.

- Conductivité thermique
- Etanchéité à l'air
- Résistance mécanique (traction et compression)
- Résistance à la diffusion de vapeur d'eau
- Faible absorption d'eau
- Stabilité dimensionnelle
- Comportement à la chaleur
- Résistance au feu
- Qualités acoustiques
- Prix

Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

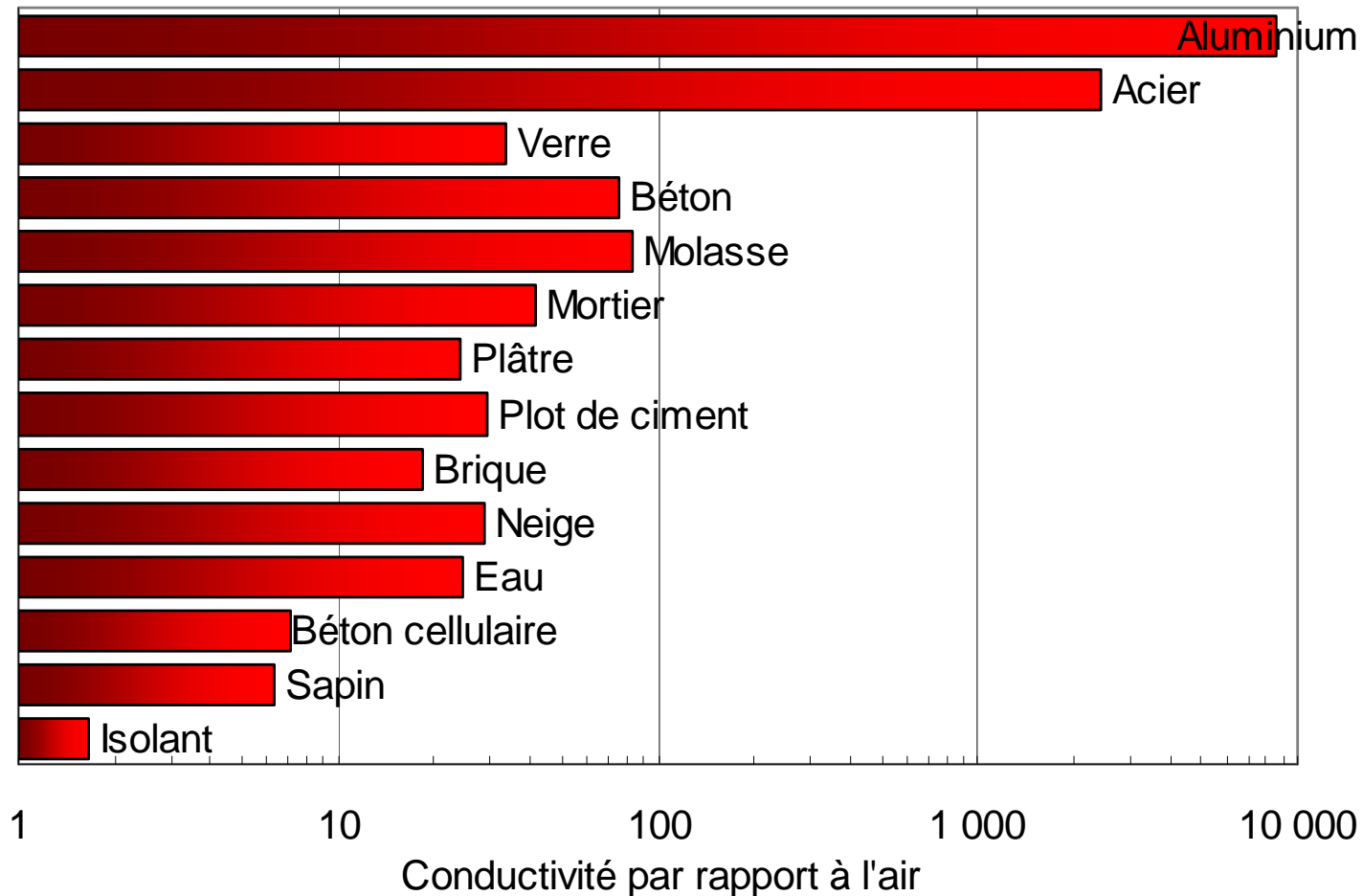
✓ L'épaisseur, la densité.



Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ La conductibilité relative.



Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ Les différents critères de qualité

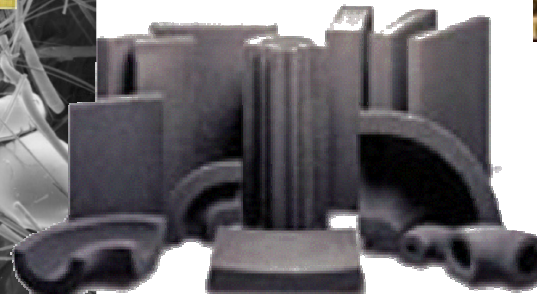
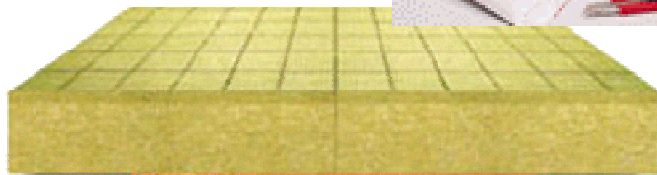
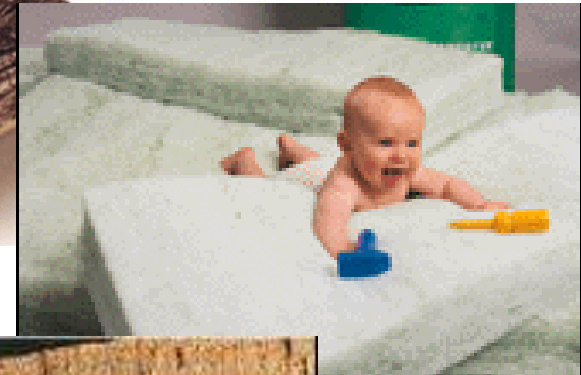
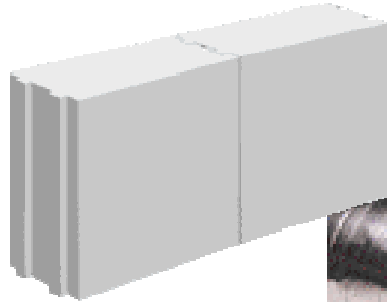
Applications	Pouvoir isolant	Densité	Résistance au feu	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ	Résistance à l'eau	Résistance à 10% de compression [kPa]	Résistance à la traction [kPa]	Étanchéité à l'air	Résistance à la chaleur	Absorption acoustique bruits de choc	Absorption acoustique bruits aériens
Matériau											
Laine minérale légère	+	--	++	--	0	--	--	--	+		++
Laine minérale dense	++	-	++	--	0	0	-	--	++	++	+
Mousse de verre	+	+	++	++	++	++	++	++	++	--	
Béton cellulaire	++*	++	++	-	-	++	+	+	++	--	
PUR	++	-	0	-	0	+	+	0	++	-	--
Urée Formaldéhyde	+	--	+	--	-	--	--	--	0		
PS expansé	+	--	+	+	0	+	+	0	0	-	--
PS extrudé	++	0	+	++	+	+	++	0	0	-	--
Fibres de bois	0	+	0	0	--	+	--	-	+	+	++
Paille et ciment	0	++	+	0	--	+	0	-	+	0	+
Liège	+	+	+	+	-	+	0	+	++	+	-

PS : Polystyrène
PUR : Polyuréthane

++ : Très élevé + : élevé 0 : moyen, acceptable - : bas -- : très bas
Case vide: ne s'applique pas. D'après "Essais comparatifs", OFQC 1983.

Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.



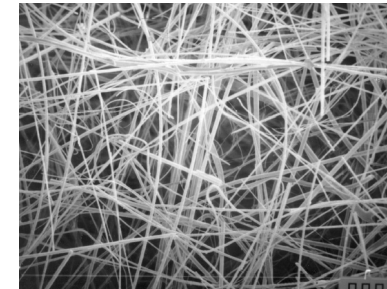
Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ Les fibres minérales.

- Fibre de verre (ISOVER)
- Laine de roche (ROCKWOOL, FLUMROC)
- Fibres obtenues par filage de verre plus ou moins pur, liée avec une colle (bakélite)

- ⇒ Bonne résistance au feu
- ⇒ Peu hygroscopique
- ⇒ Absorption acoustique
- ⇒ Résistance mécanique nulle à basse densité, moyenne à haute densité



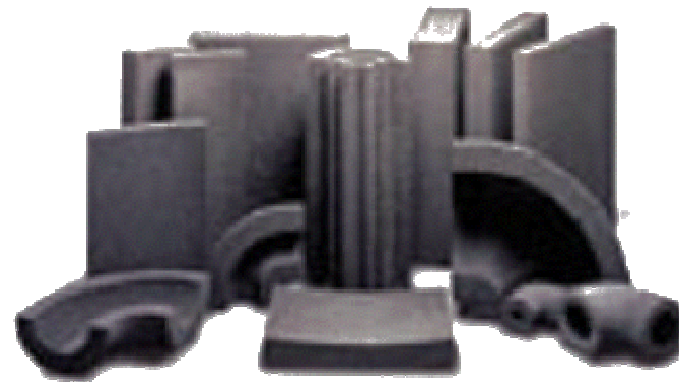
Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ Mousses minérales.

• Mousse de verre (FOAMGLAS)

- ⇒ Cuisson d'un « cake » de verre
- ⇒ Bonne résistance à la compression
- ⇒ Étanche à l'eau et à la vapeur d'eau
- ⇒ Cher



Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ Les polystyrènes.

● Polystyrène expansé



⇒ Usage général

⇒ Résistance mécanique médiocre

● Polystyrène extrudé



⇒ Usage spécifique pour toitures inversées
et isolation enterrée

⇒ Bonne résistance aux intempéries,
notamment à l'eau

⇒ Résistance mécanique supérieure

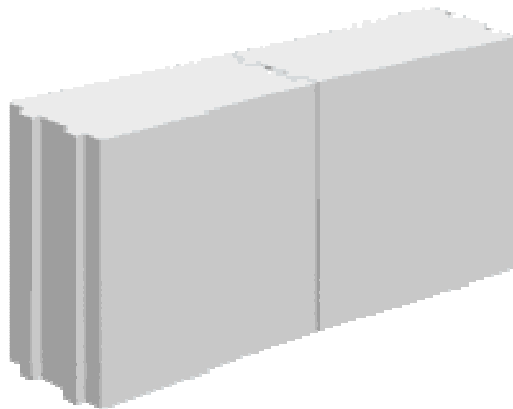
⇒ Plus cher que le PS expansé

Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ Mousses minérales.

• Béton cellulaire (YTONG)



⇒ Mortier à la poudre d'aluminium, autoclavé

⇒ Pouvoir isolant (épaisseur > 24cm)

⇒ Bonne résistance mécanique

⇒ Parois et dalles homogènes,
éléments légers

⇒ Sensible à l'eau, au gel si humide

Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ Les fibres naturelles.

- Laine, coton, cellulose, paille, coco, chanvre, bois dense
- Cellulose (papier recyclé) injectée



- ⇒ Emploi marginal, connotation écologique
- ⇒ Absorption acoustique
- ⇒ Faible résistance au feu, à l'humidité et aux agents biologiques

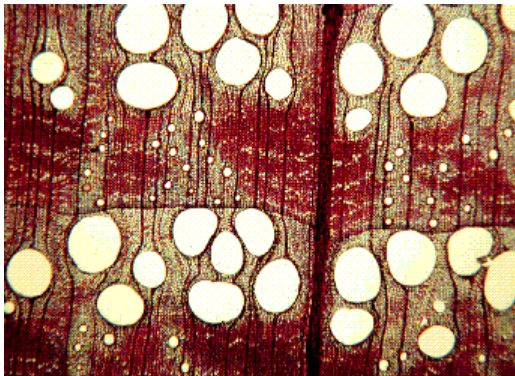


Transfert thermique, Isolation.

➤ Les matériaux.

✓ Isolants ligneux

- Fibre de bois léger
- Paille agglomérée

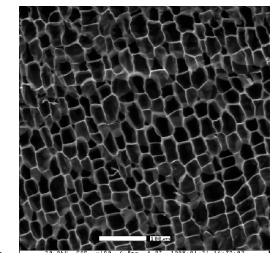


- ⇒ Bonne résistance mécanique
- ⇒ Faible résistance à l'humidité (pourriture)



✓ Liège

- ⇒ Bonne résistance mécanique
- ⇒ Résistance à l'humidité médiocre
- ⇒ Certaine résistance au feu



Transfert thermique, Isolation.

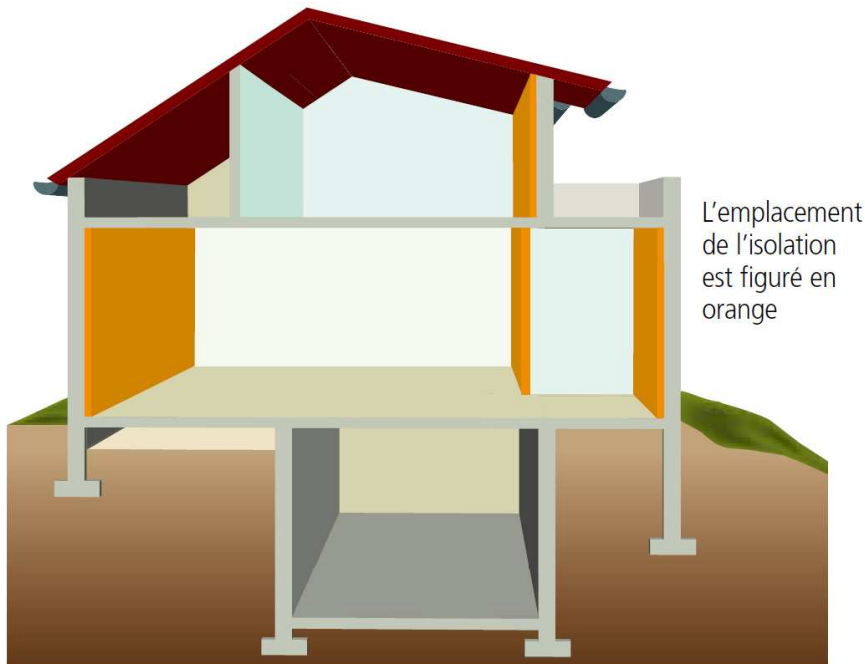
➤ Les techniques d'isolation.

- Pour chaque type de construction :
 - plusieurs techniques
- Pour chaque matériau :
 - des techniques différentes.

⇒ Des solutions multi-formes

Transfert thermique, Isolation.

- Les techniques d'isolation.
 - ✓ Les grands principes : isolation intérieure.

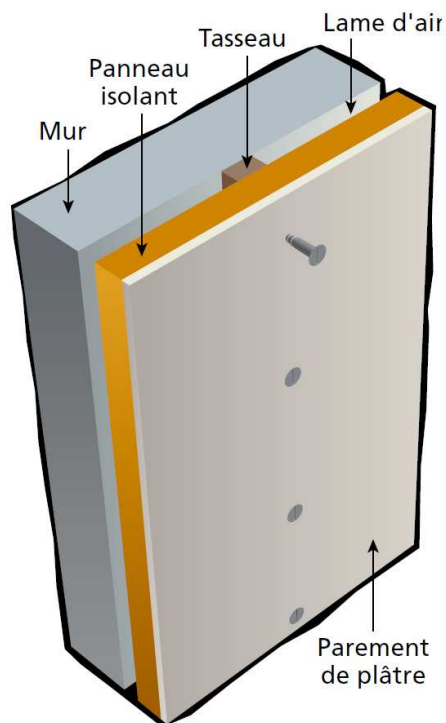


- Pas de modification extérieure
- Coût relativement peu élevé
- Diminution
des surfaces habitables
- Problème des ponts thermiques

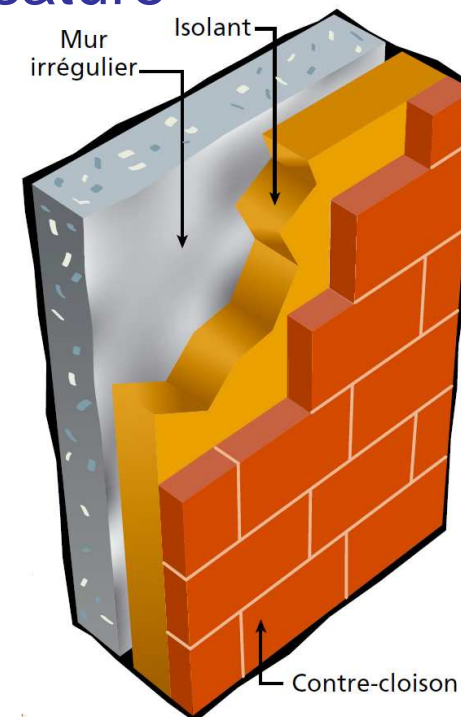
Transfert thermique, Isolation.

- Les techniques d'isolation.
 - ✓ Les grands principes : isolation intérieure.

Les panneaux composites
ou complexes de doublage



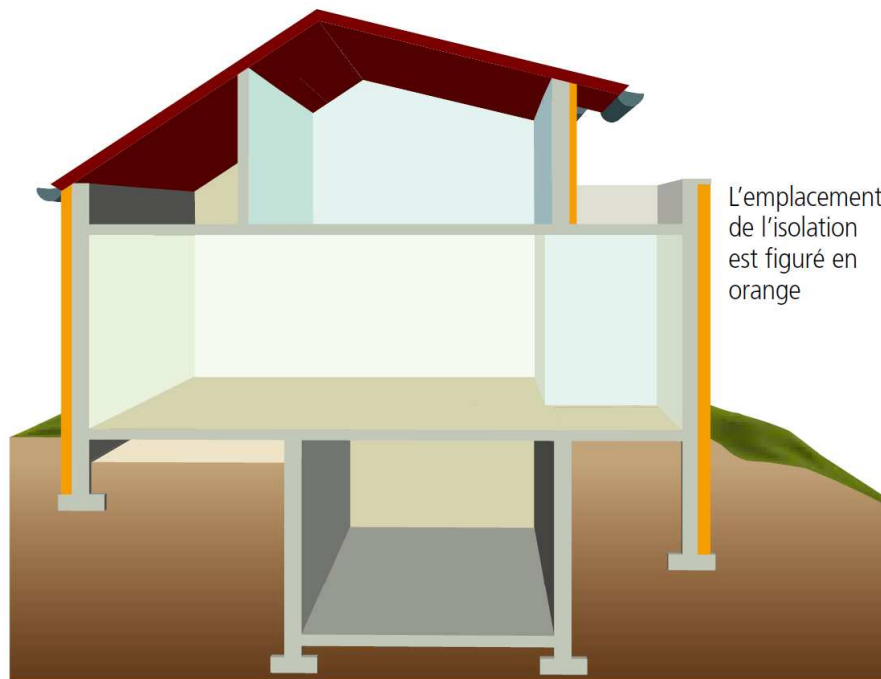
L'isolant est derrière une
contre-cloison maçonnée ou
sur ossature



Transfert thermique, Isolation.

➤ Les techniques d'isolation.

✓ Les grands principes : isolation extérieure.



- Traiter un grand nombre de ponts thermiques
- Ne pas modifier les surfaces habitables
- Protéger les murs contre les variations climatiques
- Cout plus élevé que l'isolation intérieure
- Modification de l'aspect extérieur
déclaration de travaux²¹
/ permis de construire

Transfert thermique, Isolation.

➤ Les techniques d'isolation.

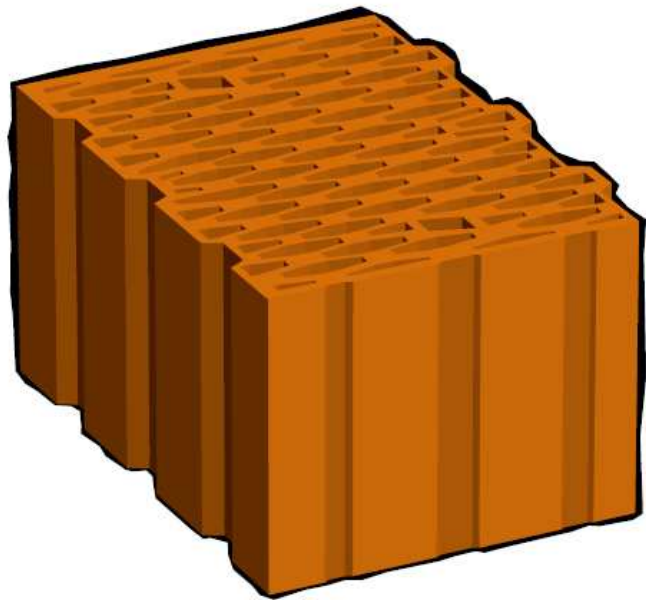
✓ Les grands principes : isolation extérieure.

- L'enduit mince sur isolant.
 - Isolant collé sur le mur (Polystyrène expansé.)
 - Un enduit spécifique est posé sur l'isolant.
- L'enduit hydraulique sur isolant.
 - Isolant collé sur le mur
 - Un enduit hydraulique est projeté sur l'isolant.
(Mortier)
- Les parements sur isolants.
 - Isolant fixé au support
 - Sur l'isolant est fixé pierres minces, dalles...

Transfert thermique, Isolation.

➤ Les techniques d'isolation.

✓ Les grands principes : isolation répartie.



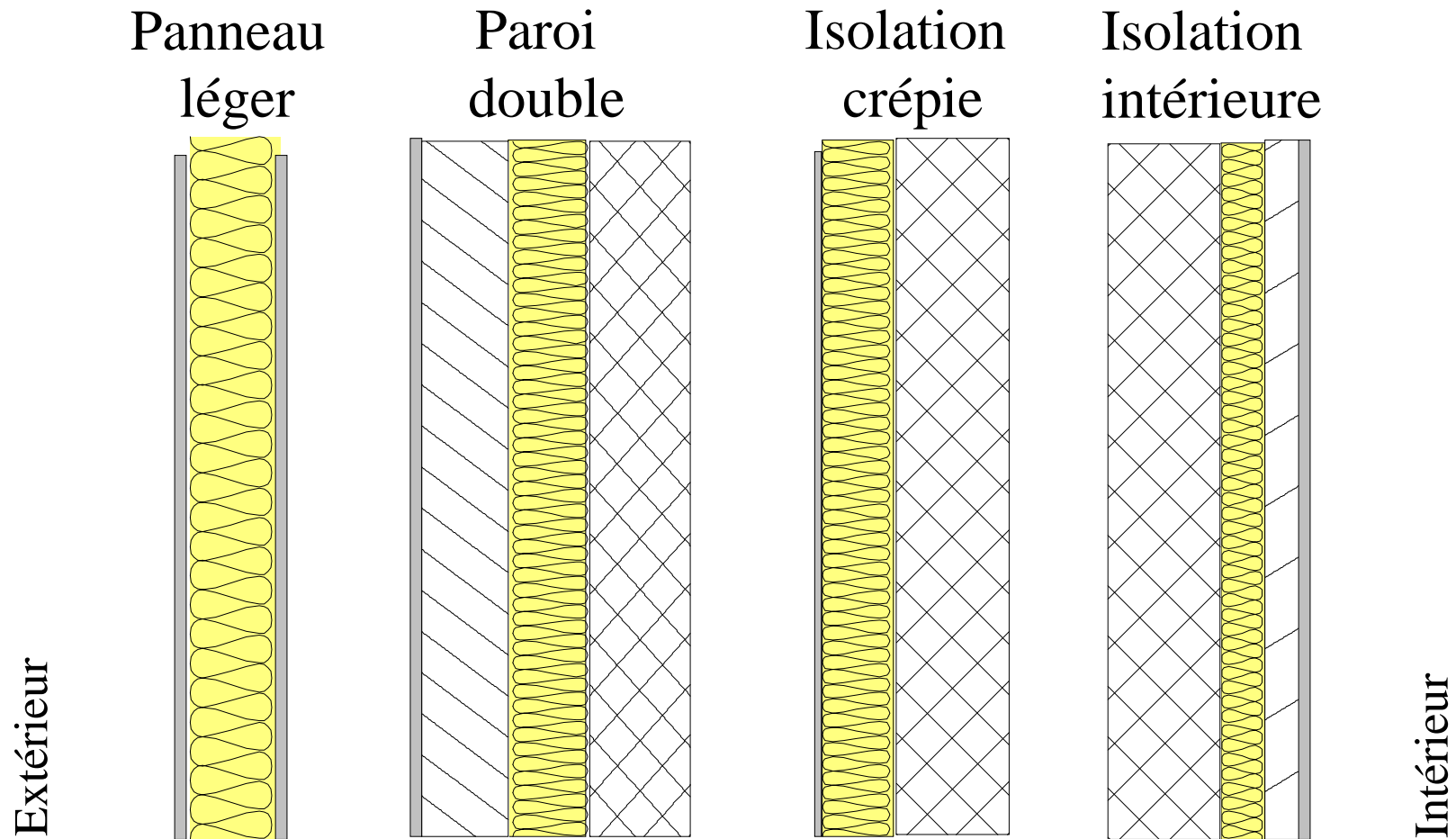
- Gain de temps dans la mise en œuvre
(1 seul produit)
- Réduit les ponts thermiques
- Améliore le confort thermique

- Mono mur en terre cuite
- Bloc et panneaux de béton cellulaire

Transfert thermique, Isolation.

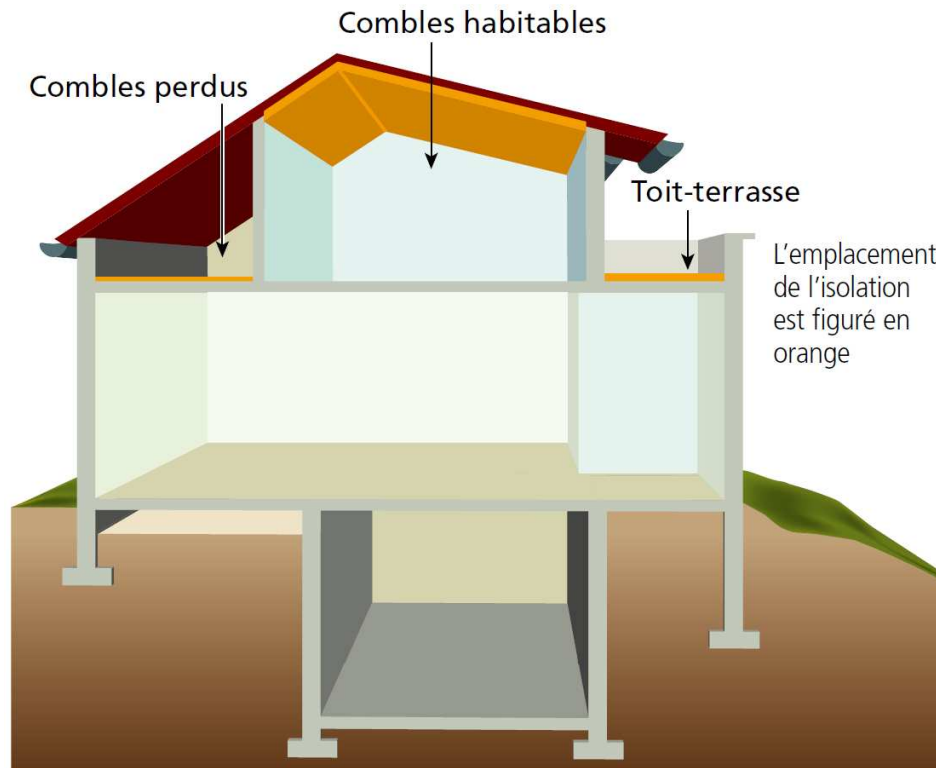
➤ Les techniques d'isolation.

✓ Le bilan.



Transfert thermique, Isolation.

- Les techniques d'isolation.
 - ✓ Toiture, dalle, toit-terrasse.



- Les combles habitables
/ aménageables

- Les combles perdus

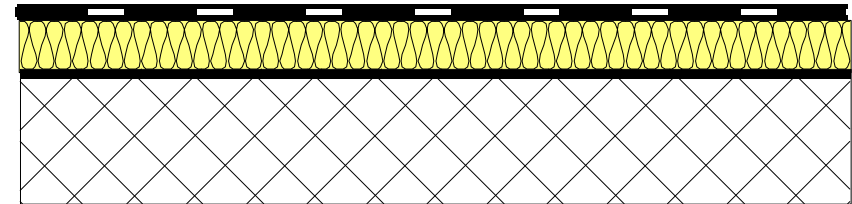
- Les toitures-terrasses

Cette isolation est
la plus rentable.

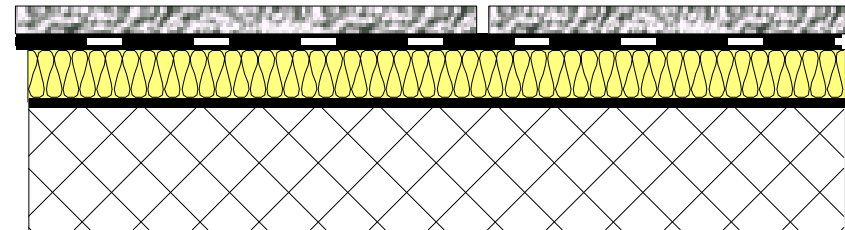
Transfert thermique, Isolation.

- Les techniques d'isolation.
 - ✓ Toiture, dalle, toit-terrasse.

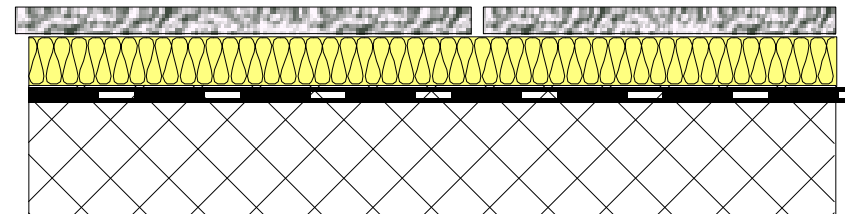
- Toiture plate : sans protection



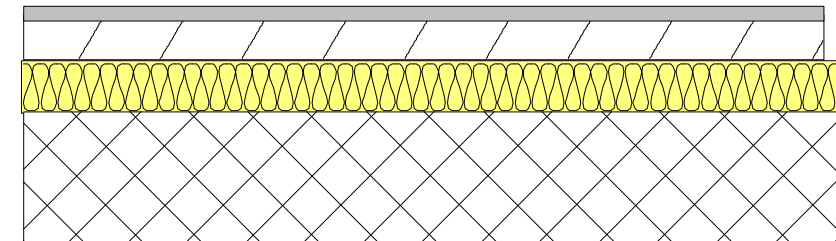
- Toiture plate : avec protection



- Toiture inversée



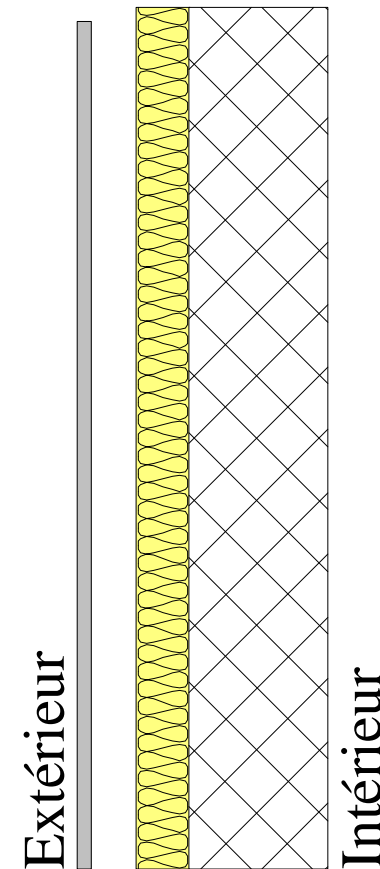
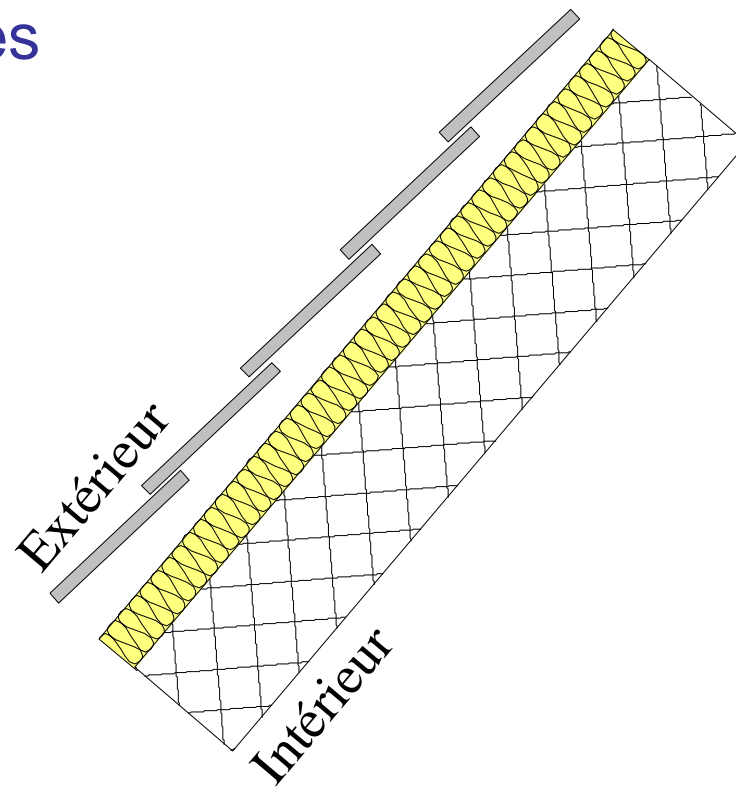
- Dalle, planchers



Transfert thermique, Isolation.

- Les techniques d'isolation.
 - ✓ Toiture, dalle, toit-terrasse.

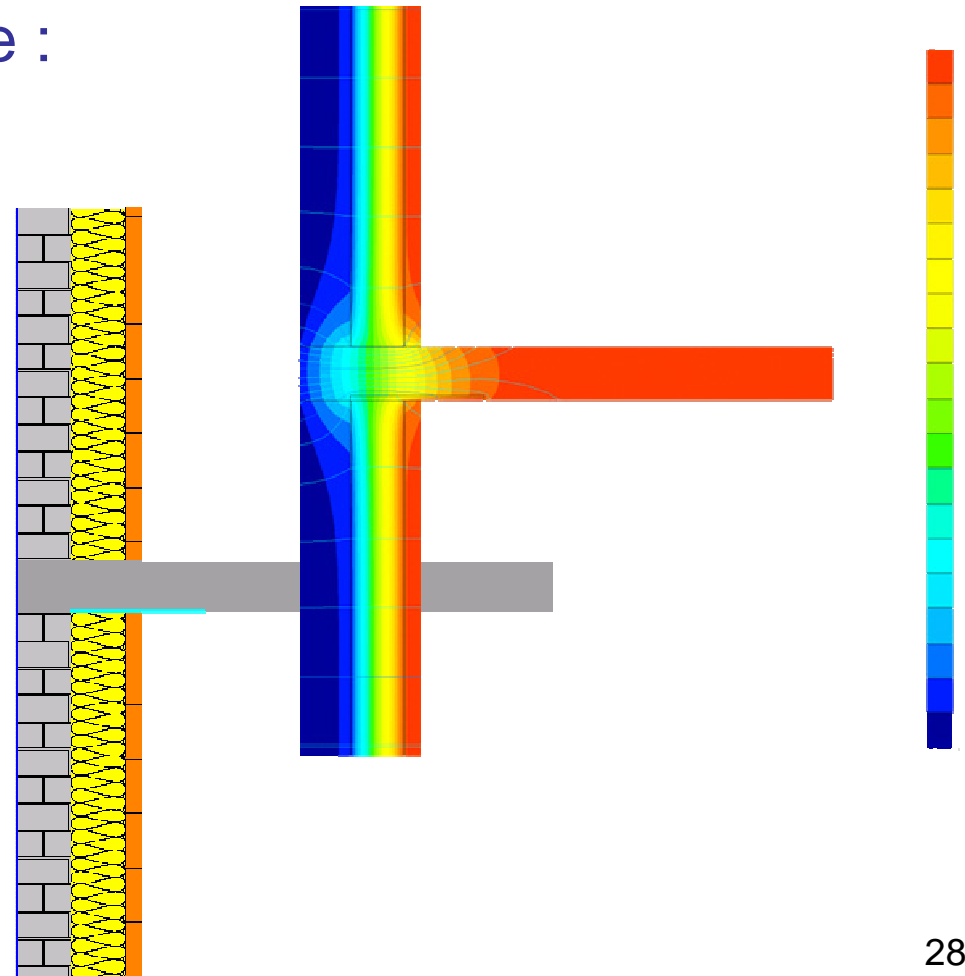
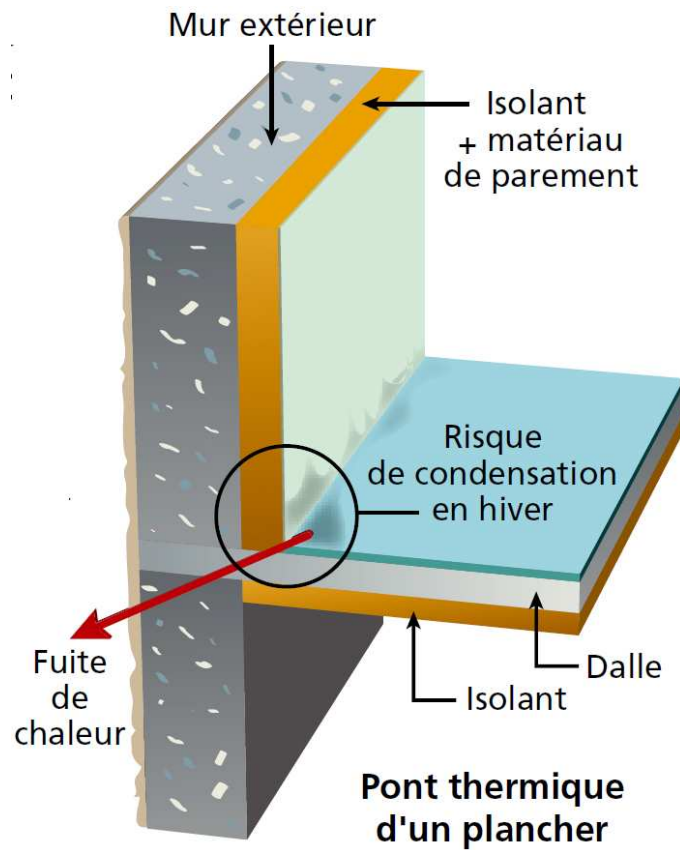
- Parois ventilées



Transfert thermique, Isolation.

➤ Le pont thermique

✓ La cause :



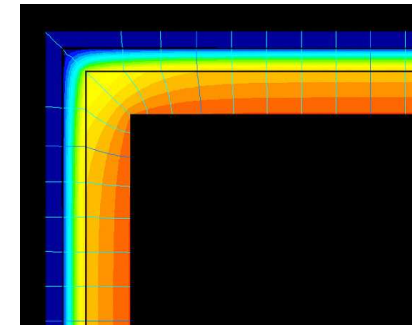
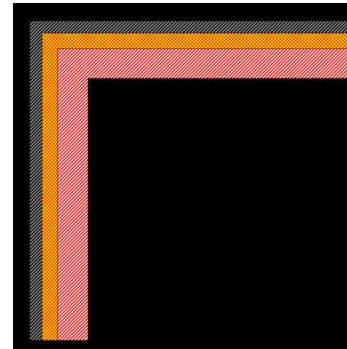
Transfert thermique, Isolation.

➤ Le pont thermique

✓ La cause :

- Discontinuité dans l'isolation thermique
de l'enveloppe du bâtiment

- Ponts thermiques géométriques angles, coins



- Ponts thermiques matériels

balcons, fixations, cadres si isolation extérieure
dalles, murs intérieurs si isolation intérieure

Transfert thermique, Isolation.

➤ Le pont thermique

✓ Les effets :

- Déperditions d'énergie
- Abaissement de la température superficielle intérieure

Condensations

Moisissures (odeurs, allergies)

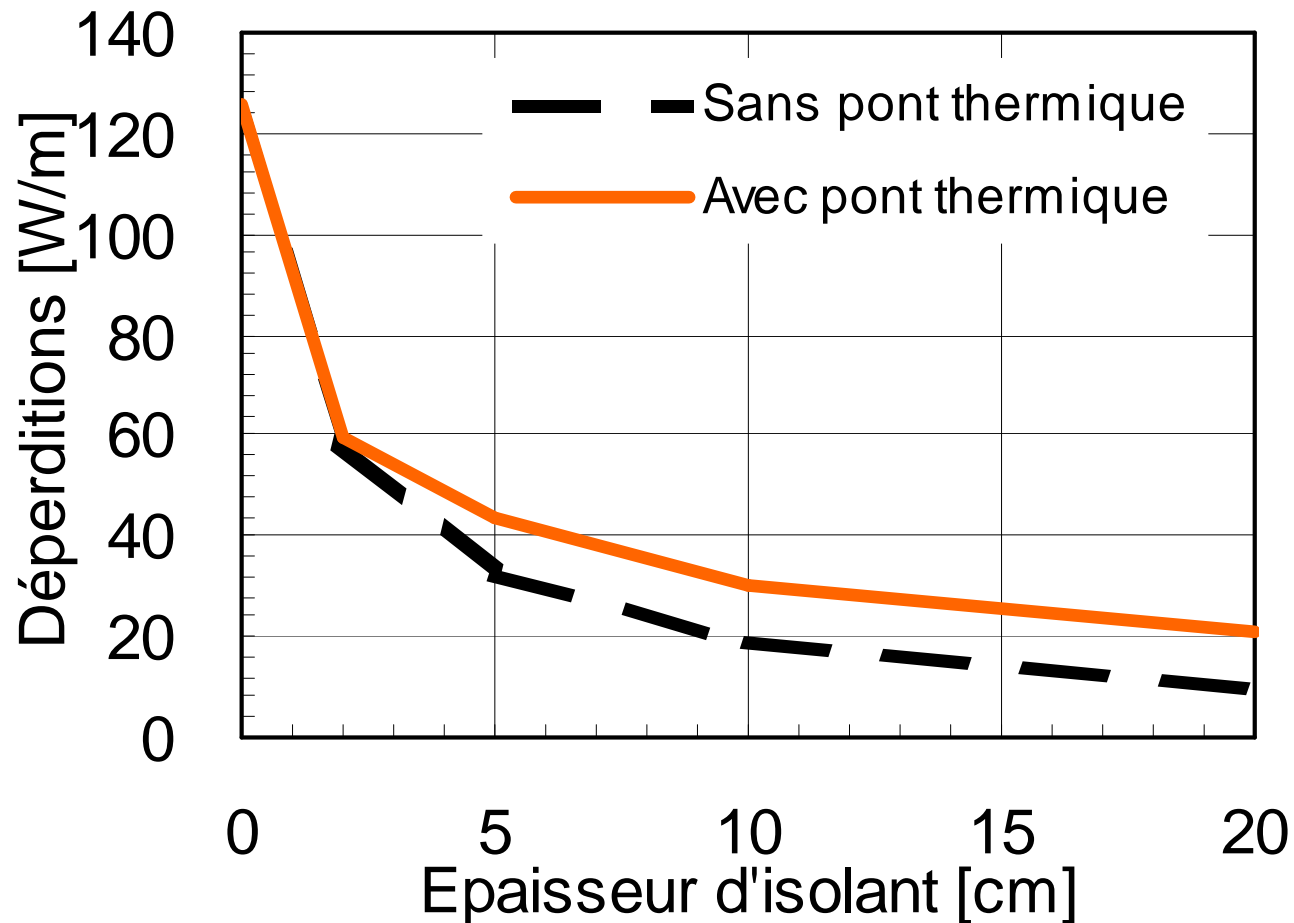
Taches, coulures



Transfert thermique, Isolation.

➤ Le pont thermique

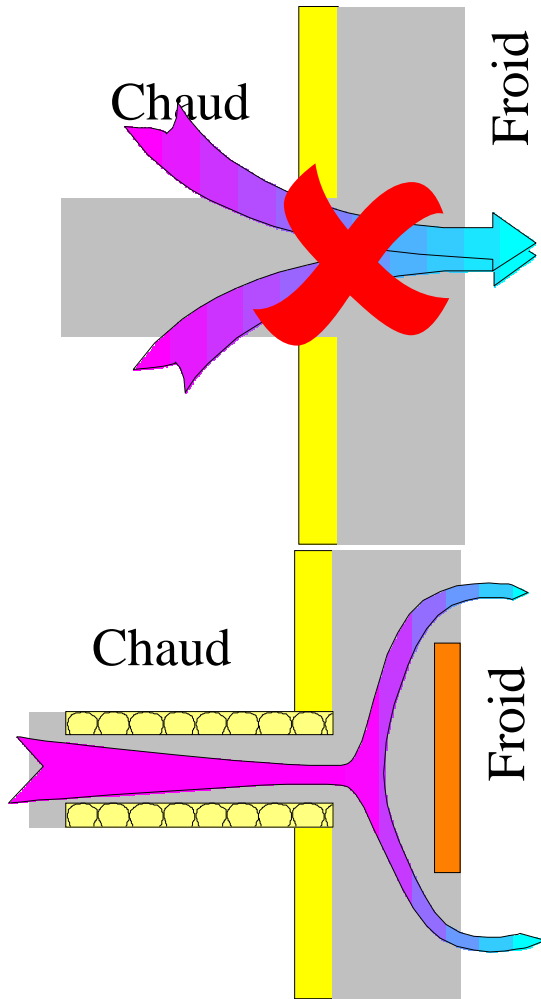
✓ Les effets :



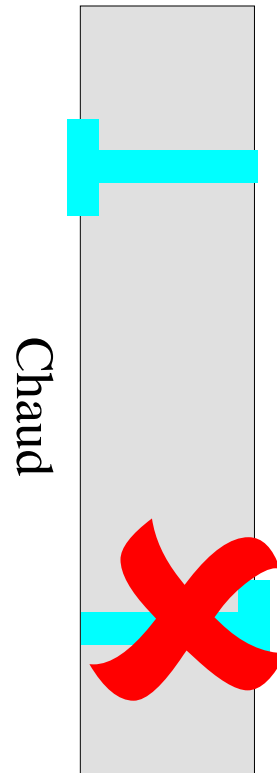
Transfert thermique, Isolation.

➤ Le pont thermique

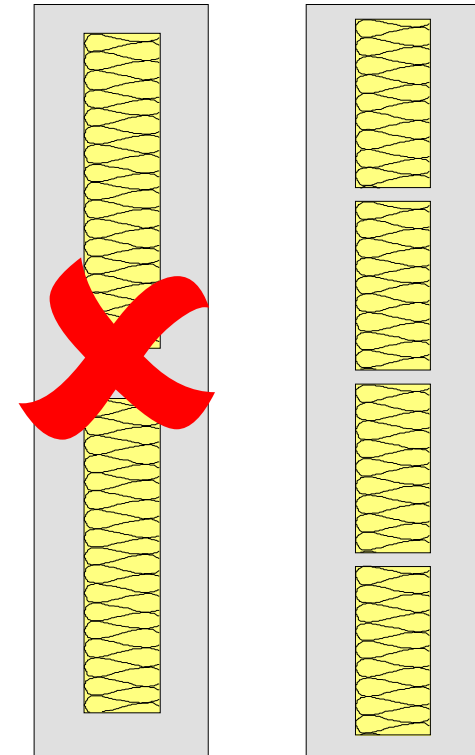
✓ Les solutions :



Allonger



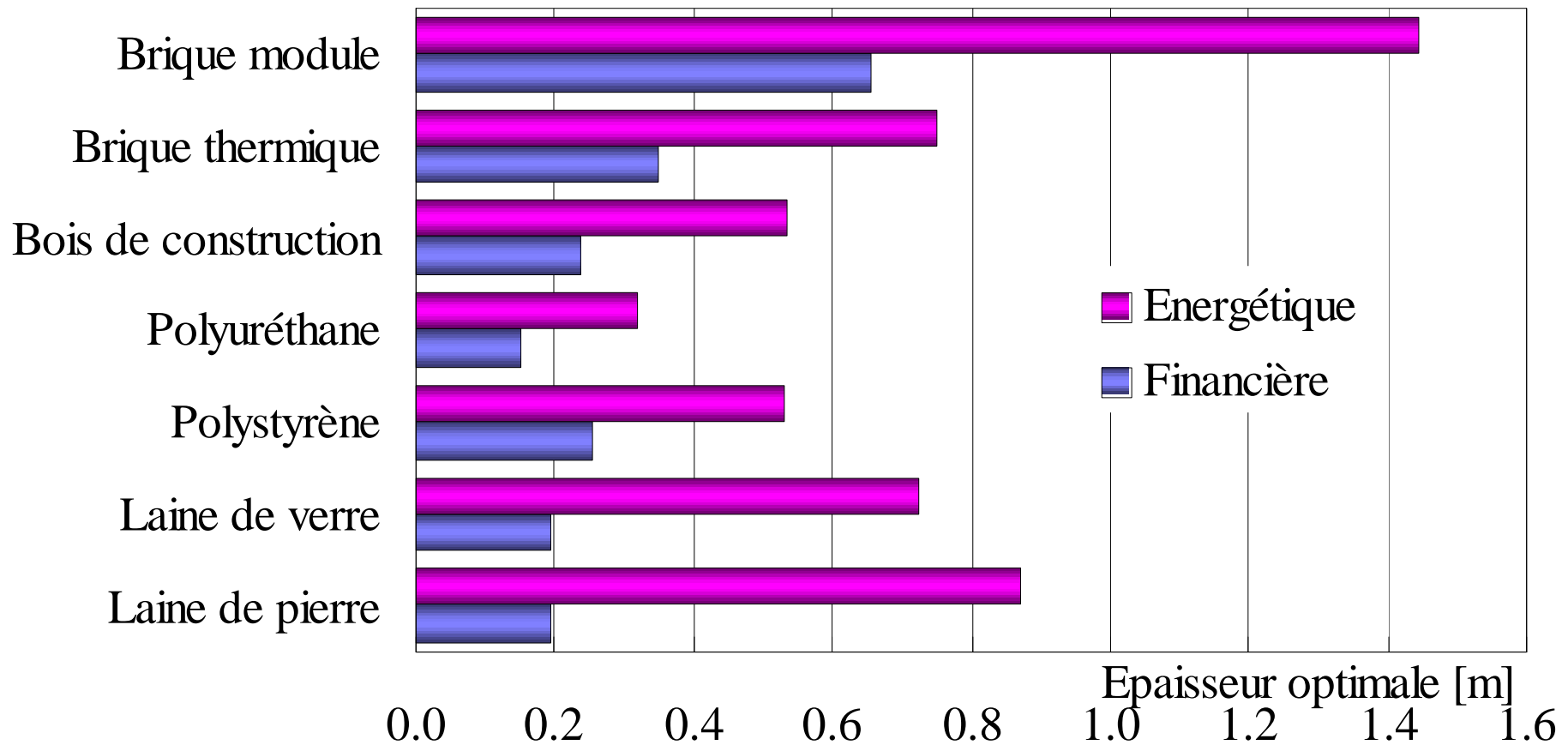
Chauffer



Diviser

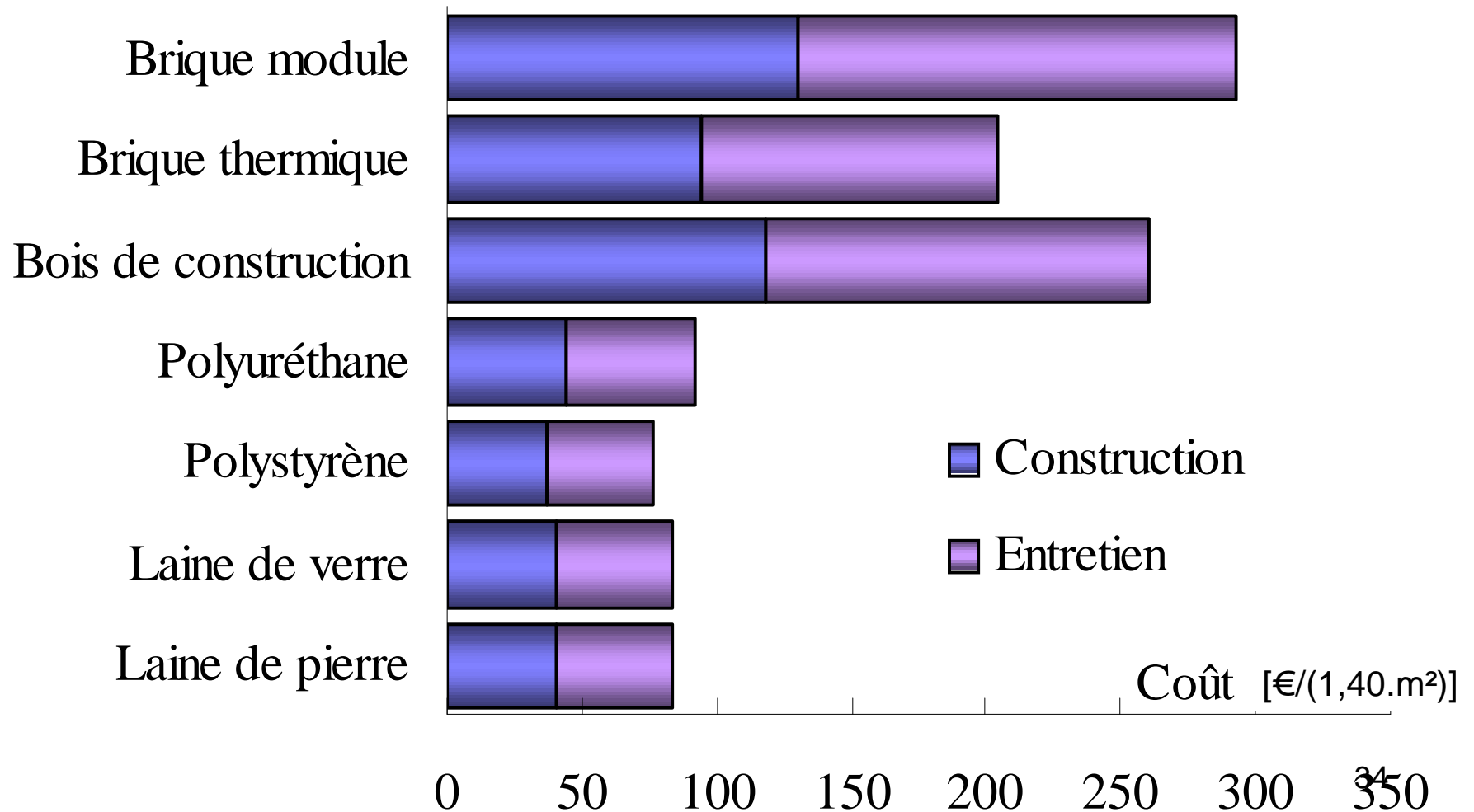
Transfert thermique, Isolation.

➤ Le cout.



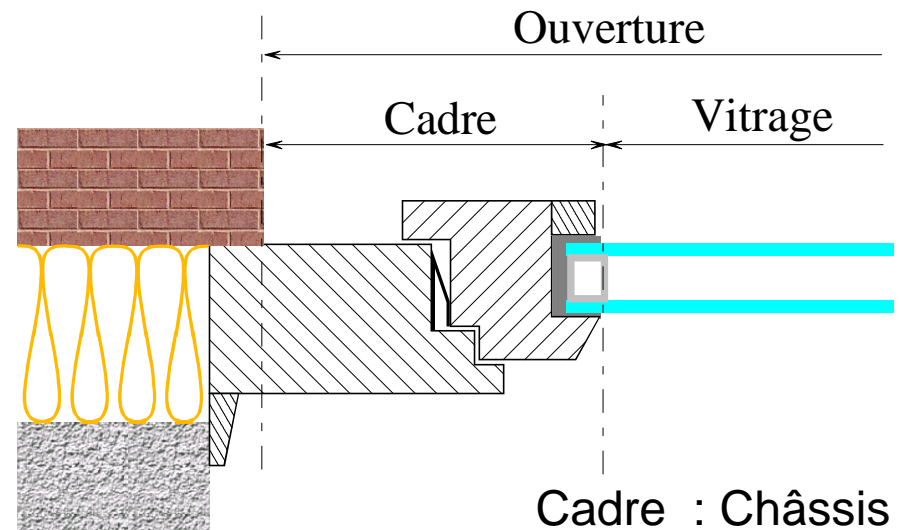
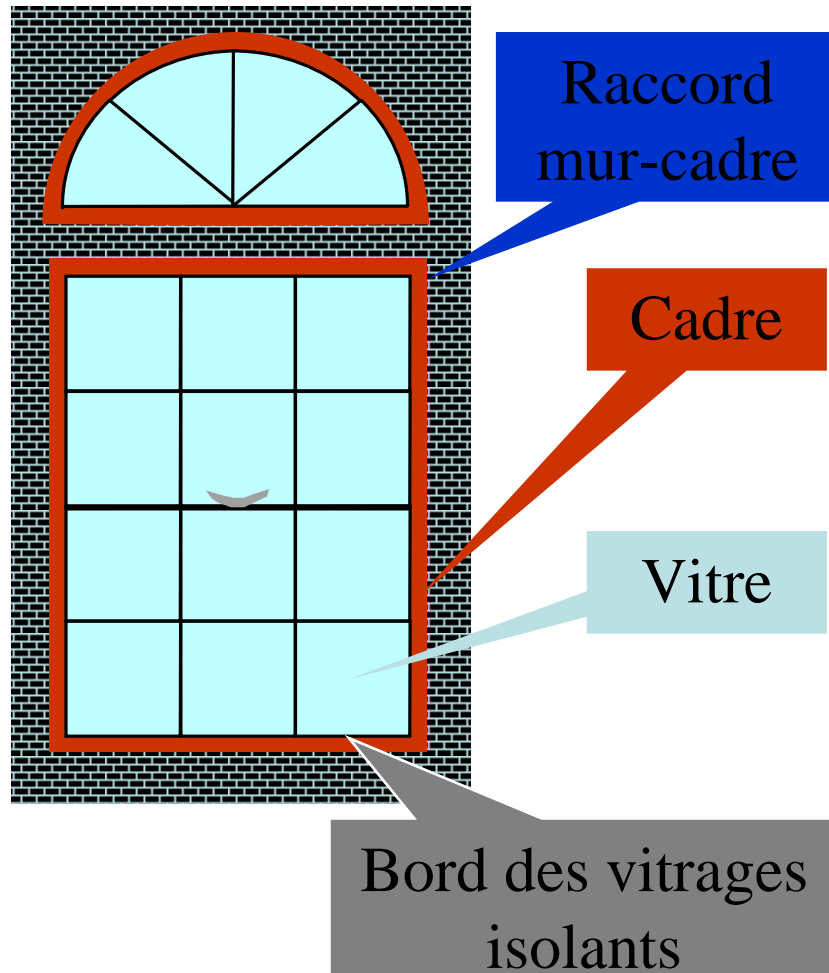
Transfert thermique, Isolation.

➤ Le cout.



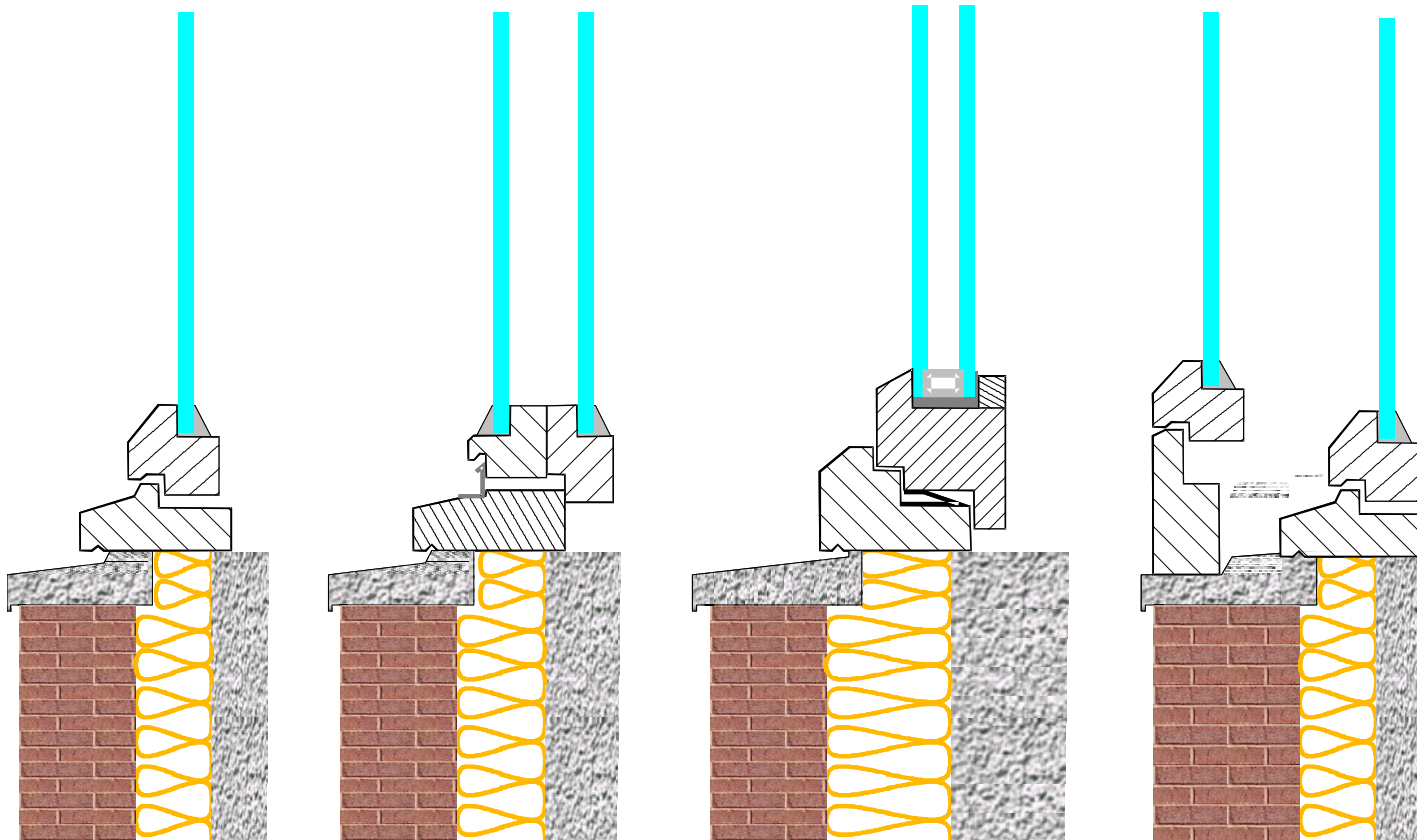
Transfert thermique, Isolation.

➤ Les ouvertures en général.



Transfert thermique, Isolation.

➤ Les ouvertures : le vitrage.



Vitrage
simple

Double
vitrage

Vitrage
isolant

Fenêtre
double

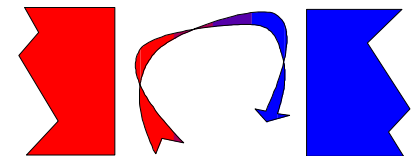
Transfert thermique, Isolation.

➤ Les ouvertures : le vitrage, quels phénomènes ?

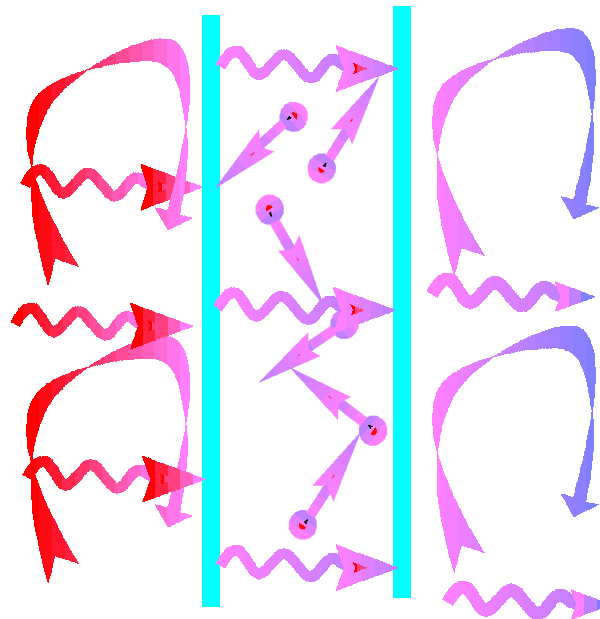
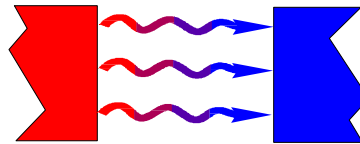
● Conduction.



● Convection.



● Rayonnement



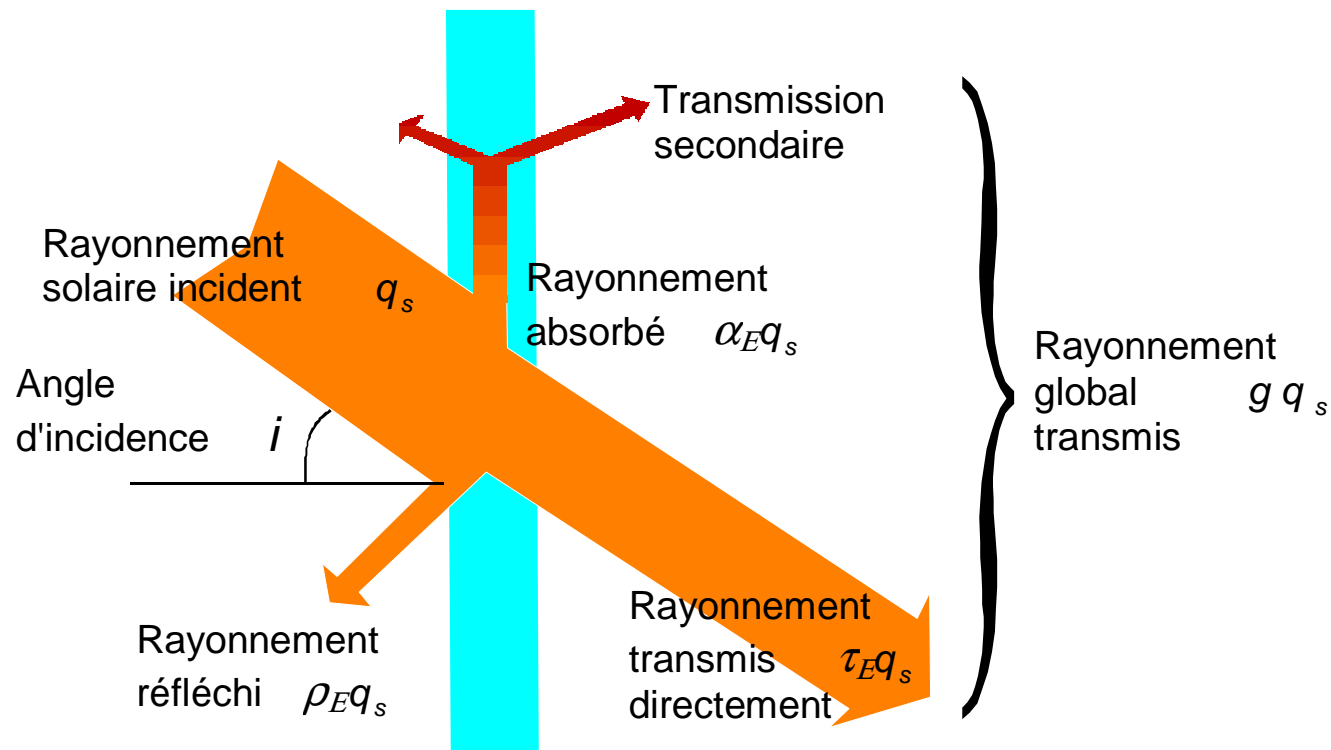
Transfert thermique, Isolation.

➤ Le rayonnement.

- Puissance émise par une source : $\Phi = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$

Unité : W

➤ Le rayonnement solaire sur un vitrage.



Transfert thermique, Isolation.

➤ Technique .

Type de vitrage	U_v	g_p	g_g	F_r
Vitrage simple VS	5,6	0,82	0,84	0,9
Vitrage simple VS, avec couche sélective IR	4,3	0,66	0,69	0,73
Double vitrage (DV) avec air sec	2,9	0,69	0,75	0,81
Double vitrage (DV) avec argon	2,7	0,69	0,75	0,73
Double fenêtre (2 SV)	2,7	0,69	0,75	0,81
DV avec couche sélective et air sec	1,6	0,62	0,67	0,78
DV avec couche sélective et argon	1,3	0,62	0,67	0,7
DV avec couche sélective et xénon	0,9	0,58	0,63	0,76
Double, double vitrage DV	1,5	0,59	0,53	0,66
Triple vitrage (TV) avec air sec	2	0,62	0,7	0,74
Triple vitrage (TV) avec argon	1,9	0,62	0,7	0,71
TV avec 2 couches sélectives et air sec	1,1	0,43	0,5	0,68
TV avec 2 couches sélectives et argon	0,9	0,43	0,5	0,56
TV avec 2 couches sélectives et xénon	0,4	0,42	0,48	0,64
Pavé de verre	3	0,6	0,65	0,75

g_p : coefficient de transmission global pour le rayonnement solaire perpendiculaire au vitrage

g_p : idem, pour le rayonnement solaire global, climat européen.

F_r : facteur de réflexion.

Transfert thermique, Isolation.

Pour aller plus loin:

Quelques notions théoriques.

Transfert thermique, Isolation.

➤ La conduction.

- Résultat de la différence d'énergie entre deux milieux en contact
- La conduction s'effectue sans mouvement de matière.

- Loi de Fourier $\vec{J} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T$

J Flux par unité de surface λ Conductivité thermique T Température
 Unité : $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($J > 0$) Unité : $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ Unité : K

$$\lambda_{\text{or}} = 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \lambda_{\text{air}} = 0.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Pour une surface S, le flux transféré (puissance thermique) est par :

$$\Phi = J \cdot S$$

Φ Puissance thermique.
 Unité : W

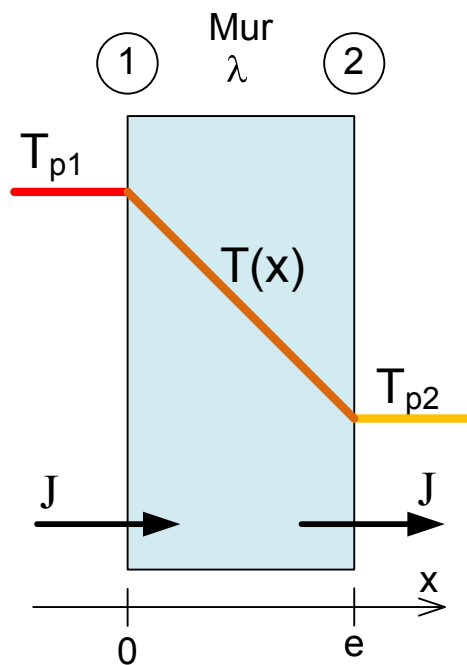
$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Q Chaleur transférée.
 Unité : J

Transfert thermique, Isolation.

✓ Cas d'un mur simple.

- Hypothèses :
- Pas de source interne de chaleur
 - Toute la surface à la même température
 - Régime permanent et propagation unidirectionnelle



• Loi de Fourier $J = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$

$$J = \frac{\lambda}{e} \cdot (T_{P1} - T_{P2}) \Rightarrow T_{p1} - T_{p2} = \frac{e}{\lambda} \cdot J$$

On définit la résistance thermique par : $R_{th} = \frac{e}{\lambda}$
Unité : $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

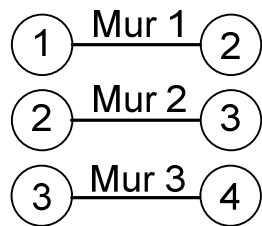
Puissance thermique : $\Phi = \frac{S}{R_{th}} \cdot (T_{P1} - T_{p2})$ 42

Transfert thermique, Isolation.

✓ Cas de murs « multiples ».

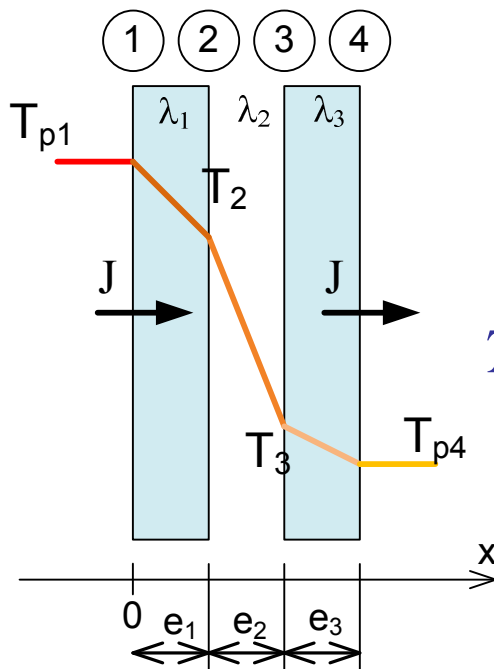
Hypothèses :

- Pas de source interne de chaleur
- Toute la surface à la même température
- Régime permanent et propagation unidirectionnelle



• Loi de Fourier

$$J = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$



$$\left. \begin{aligned} T_{p1} - T_2 &= \frac{e_1}{\lambda_1} \cdot J \\ T_2 - T_3 &= \frac{e_2}{\lambda_2} \cdot J \\ T_3 - T_{p4} &= \frac{e_3}{\lambda_3} \cdot J \end{aligned} \right\} T_{p1} - T_{p4} = \left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} \right) \cdot J$$

$$T_{p1} - T_{p4} = (R_{th1} + R_{th2} + R_{th3}) \cdot J$$

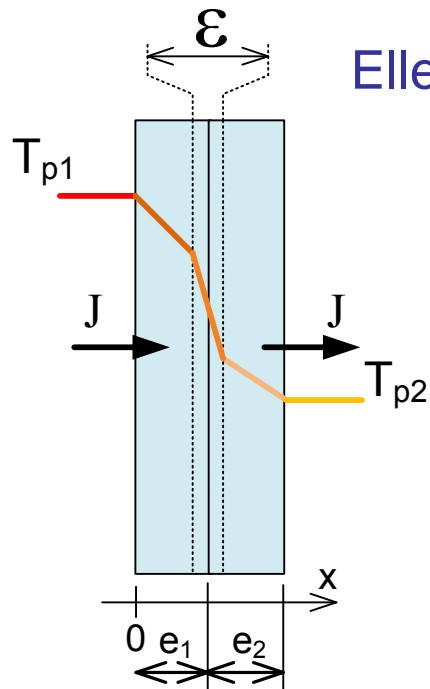
Transfert thermique, Isolation.

✓ Cas de murs « multiples ».

Entre deux « solides », la frontière commune peut être :

- A contact parfait. \Rightarrow Etude précédente.
- A contact imparfait.

\Rightarrow L'interface se comporte comme un milieu isotrope.



Elle possède :

- Conductivité thermique

Unité : $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

λ_C

- Résistance thermique

Unité : $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

$$R_C = \frac{e}{\lambda_C}$$

$$(T_{1\epsilon} - T_{2\epsilon}) = R_C \cdot J = \frac{R_C}{S} \cdot \Phi$$

Transfert thermique, Isolation.

➤ La convection.

- Etude globale.

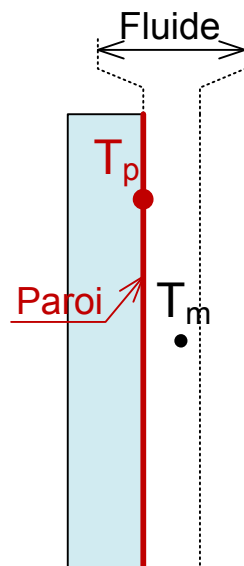
Phénomène complexe liant mécanique des fluides et transferts thermiques

On définit un coefficient d'échange thermique : h

Unité : $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

$h_{\text{air calme}} : 3 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

$h_{\text{vapeur d'eau chaude}} : 5 \cdot 10^4 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$



• Loi de Newton $|T_p - T_m| = h \cdot J = \frac{h}{S} \cdot \Phi$

T_m : température moyenne du fluide au voisinage de la paroi

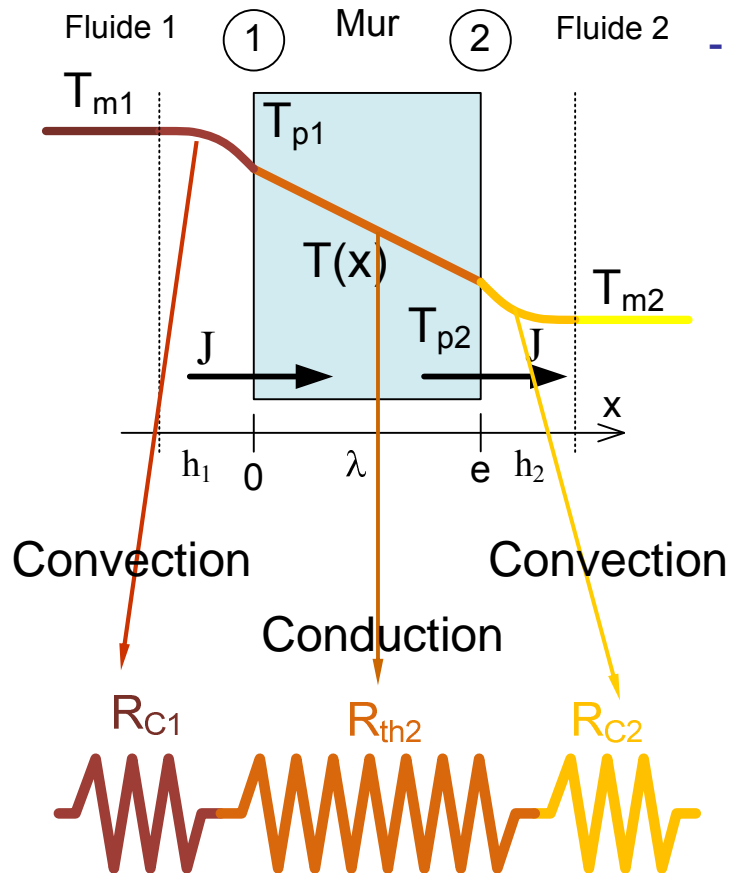
T_p : température de la paroi

Transfert thermique, Isolation.

➤ Bilan global pour un mur simple.

Hypothèses :

- Pas de source interne de chaleur
- Toute la surface à la même température
- Régime permanent et propagation unidirectionnelle



$$\left. \begin{aligned} T_{m1} - T_{p1} &= \frac{1}{h_1} \cdot J \\ T_{p1} - T_{p2} &= \frac{e_2}{\lambda_2} \cdot J \\ T_{p2} - T_{m2} &= \frac{1}{h_2} \cdot J \end{aligned} \right\} T_{m1} - T_{m2} = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_3} \right) \cdot J$$

$$T_{m1} - T_{m2} = (R_{C1} + R_{th2} + R_{C3}) \cdot J$$

Transfert thermique, Isolation.

➤ Le rayonnement.

- Flux d'une source : Φ Puissance émise par la source. Unité : W
 ⇒ Source de puissance émise par une source.

- Emittance d'une source (monochromatique : λ) :

$$\Rightarrow M_{\lambda} = \frac{d\Phi_{\lambda}}{dS} \quad \text{Unité : W}\cdot\text{m}^{-2}$$

- Transfert de chaleur par rayonnement :

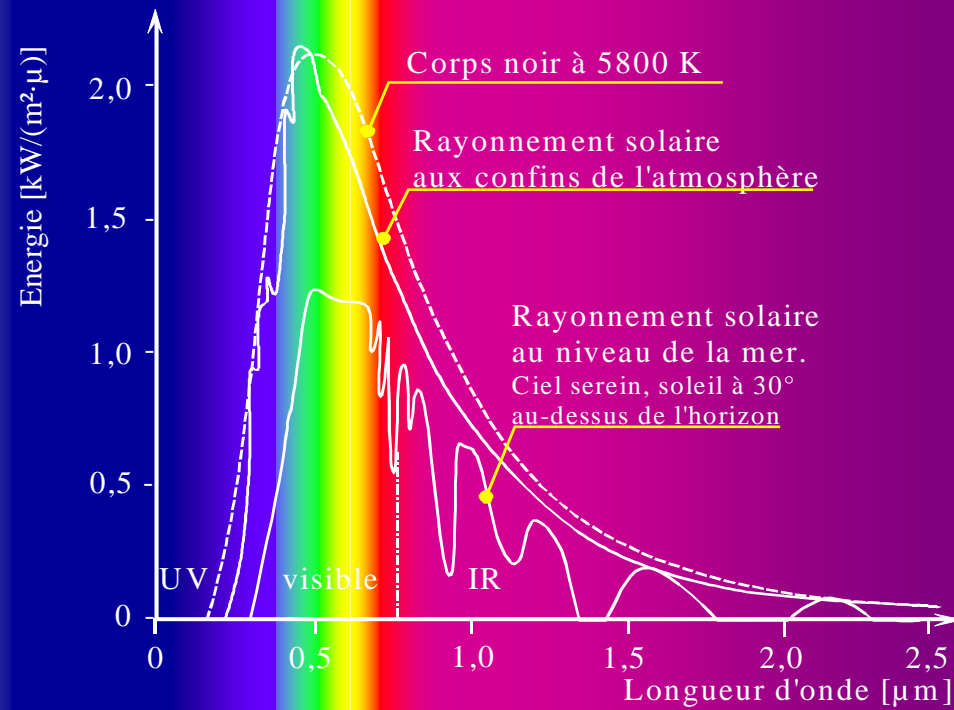
$$\Rightarrow M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Unité : W}\cdot\text{m}^{-2}$$

- constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
- ε : émissivité (facteur d'absorption ou d'émission de la surface émettrice)
 coefficient sans unité (1 pour un corps noir)
- T : température du corps (K)

Transfert thermique, Isolation.

➤ Le rayonnement solaire.

Sahara sud 2000
 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$
 Zermatt 1480 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$



Transfert thermique, Isolation.

- Le rayonnement solaire sur un vitrage.

