

Matériaux isolants

Thermal Insulation Materials

Anh Dung Tran Le

Laboratoire des Technologies Innovantes, EA 3899

Université de Picardie Jules Verne, Amiens Cedex, France

anh.dung.tran.le@u-picardie.fr

Mon activité de recherche « Matériaux bio-sourcés pour l'efficacité énergétique et QAI »

AXES DE RECHERCHE

- ♥ Matériaux bio-sourcés
- ♥ Homogénéisation multi-échelle
- ♥ Physique du bâtiment
- ♥ Transfert couplé de chaleur, d'humidité et des polluants (Coupled heat, air, moisture and pollutants transport CHAMP model)
- ♥ Caractérisation expérimentale des propriétés hygrothermiques des matériaux bio-sourcés (régime permanent et dynamique)
- ♥ Confort hygrothermique et qualité de l'air intérieure

ANH DUNG TRAN LE

Maître de conférences

Laboratoire des Technologies Innovantes,
Université de Picardie Jules Verne
Avenue des Facultés, 80025 Amiens Cedex 1, France

(+33)3.22.53.39.97

www.u-picardie.fr/lti

www.iut-amiens.fr

anh.dung.tran.le@u-picardie.fr



FORMATION

- | | |
|-----------|--|
| 2007-2010 | Diplôme de doctorat à l'Université de Reims Champagne Ardennes. Sujet de thèse : « Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment ». Laboratoire Thermomécanique – Groupe de Recherche en Sciences Pour l'Ingénieur (LTM/GRESPI)- Université de Reims. Soutenue le 3 novembre 2010. Mention très honorable (avec félicitation du jury à l'unanimité). |
| 2006-2007 | Master 2 Recherche, Institut National des Sciences appliquées de Rennes (INSA), France. |
| 2001-2006 | Diplôme d'ingénieur du bâtiment, École Nationale Supérieure de Génie Civil-Viet Nam |

2020- present Co-founder and Member of the board of Directors of association “Air et Moi HdF”

2017- present Member of the International Association of Building Physics (IABP).

2016-present Member of the board of Directors of AASQA (Certified Associations of Air Quality Monitoring - Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l’Air) of Picardie (now Hauts de France) region, France.

2010-present Member of scientific committee of many conferences: International Conference of the International Building Performance Simulation Association (years: 2013 - France, 2015-India, 2017 – USA, 2019-Italy, 2021-Belgique); International conference of Indoor Air organized by the International Society of Indoor Air Quality and Climate - ISIAQ, Ghent, 3-8 july 2016; International Conference on Mathematical, Computational and Statistical Sciences (MCSS '14), Gdansk, Poland,2014; Journées d'étude nationale de mécanique, 2015 , organized par university of Ouargla, Algérie, 2015.

2009-present Reviewer for the journals: Renewable Energy, Building and Environment, Energy and Buildings, International Journal of Thermal Sciences, Construction and Building Materials, Buildings, Energies, Open Civil Engineering Journal.

2010-present Supervisor of tutored project for L2, research projects of M.S and Ph.D thesis

2012-present Participate to some working groups in France (hygrothermal behavior working group, biobased materials working group (MBS groupe), etc.)



Fulbright scholar (2020)

Visiting professor à Syracuse University, NY, USA (2020)

Outstanding Reviewer Status Awarded by:

- Energy and Buildings,
- Building and Environment,
- Renewable energy
- International Journal of Thermal Sciences

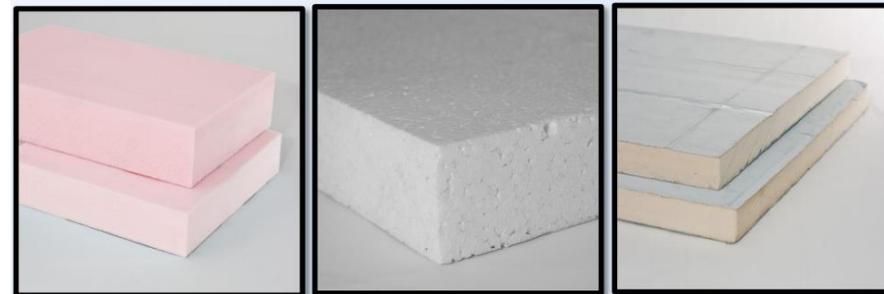
PLAN

1. Contexte et généralités

2. Thermique des matériaux

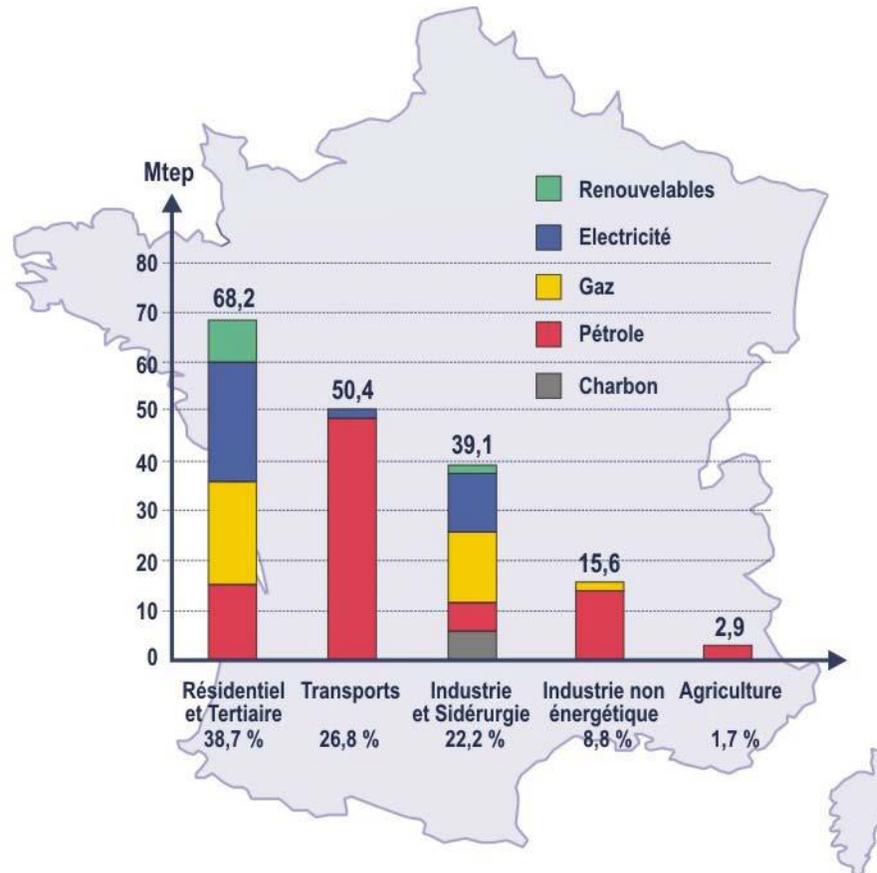
3. Matériaux isolants

- *Matériaux biosourcés*
- *Matériaux Minéraux*
- *Matériaux Synthétiques*
- *Diffusion de la vapeur d'eau*
- *Emission des polluants: projet EmiBio (ADEME)*



1. Contexte et généralités

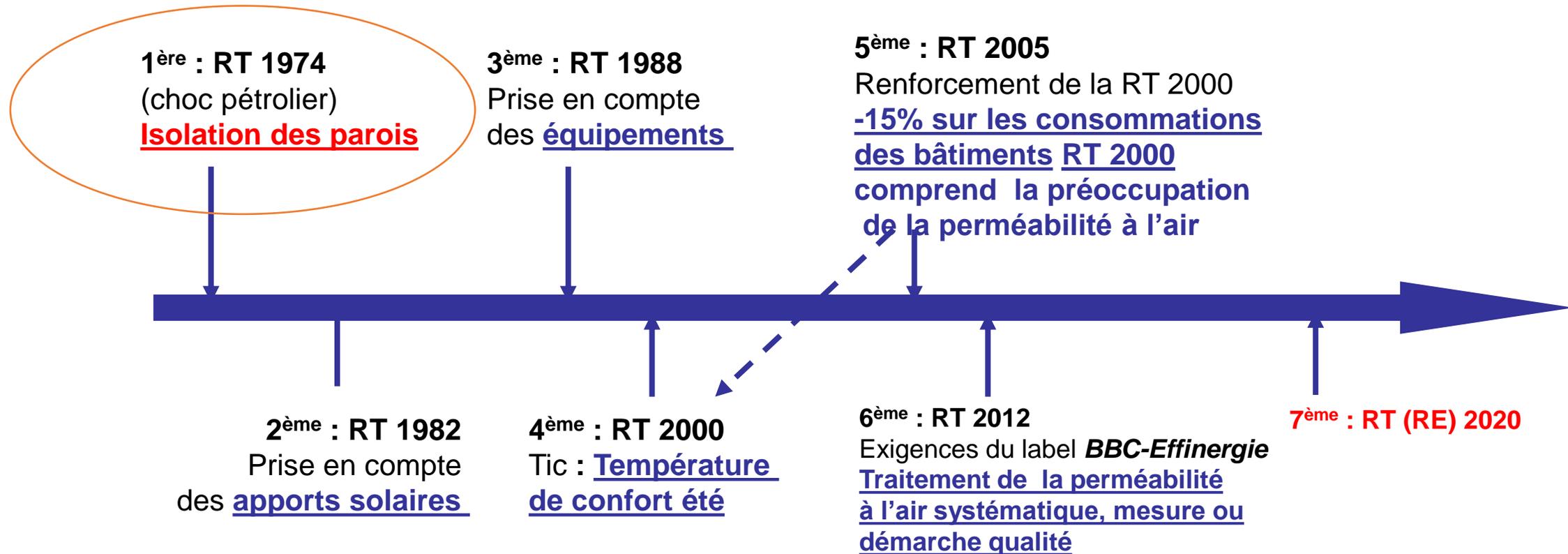
Les consommations



- Le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie
 - 30 millions de logements
 - 800 millions de m² en tertiaire
 - 70 millions de tep par an (660 TWh), 40 % de l'énergie consommée environ

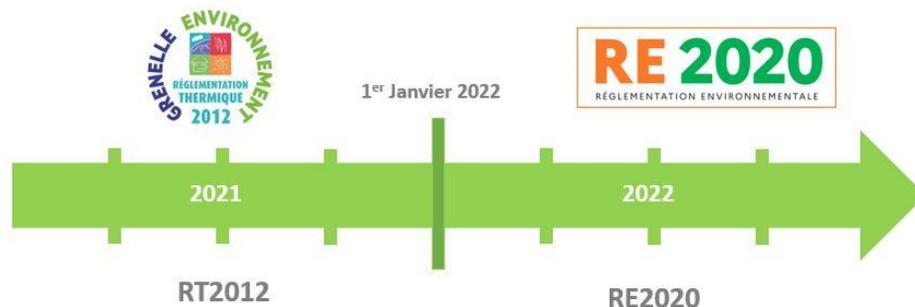
1. Contexte et généralités

Isolation et évolution de la Réglementation Thermique (RT)



1. Contexte et généralités

L'évolution de la réglementation



Eco-construire pour le Confort de Tous

Réduire l'impact Carbone

- Une éco-conception dans le choix des matériaux et équipements.
- Recours à des **matériaux Biosourcés et le Bois** (considéré comme capable de « stocker » le CO₂)

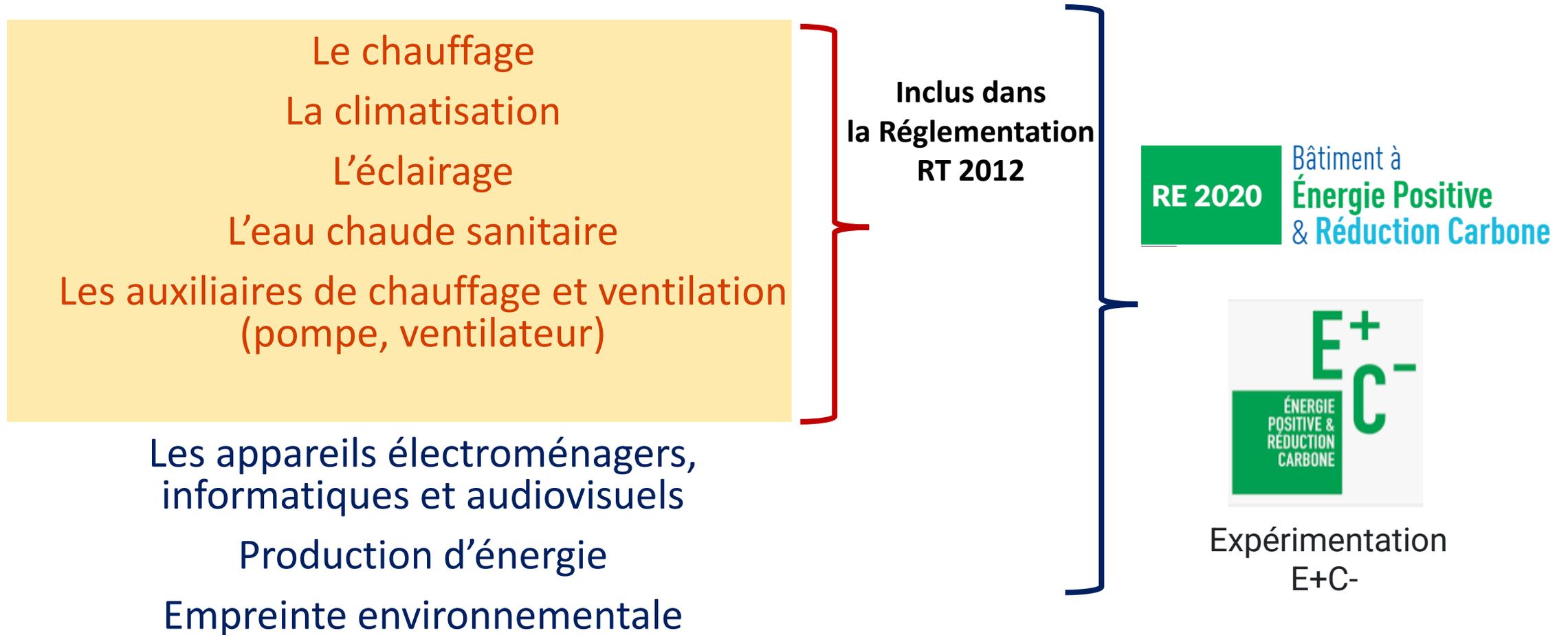
Réduire les consommations et Décarbonation de l'Energie

Garantir le Confort d'été pour les occupants

<https://re2020.fr/reglementation-environnementale-re2020-fr/>

1. Contexte et généralités

Les différentes consommations



1. Contexte et généralités

Les différentes consommations

Le chauffage
La climatisation
L'éclairage

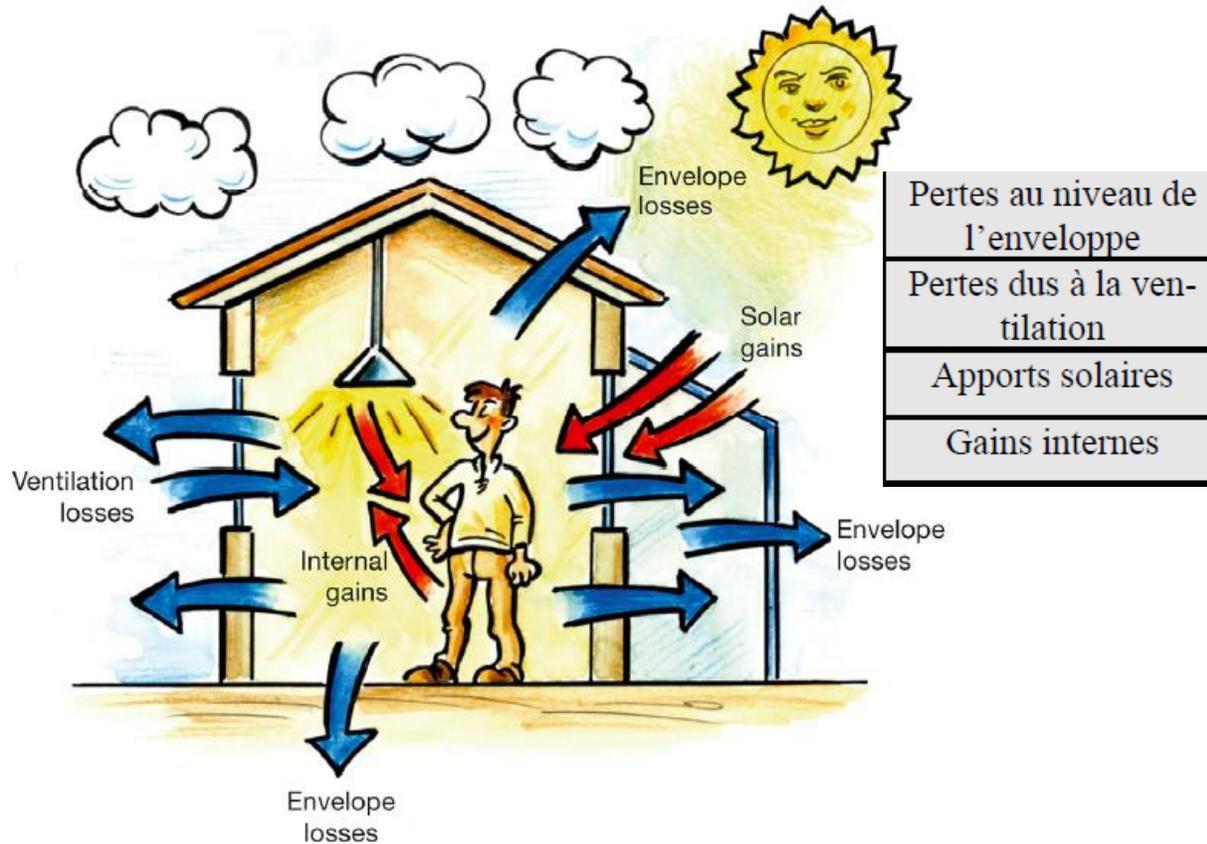
Dépendent principalement de la **conception de l'enveloppe**

L'eau chaude sanitaire
Les auxiliaires de chauffage et ventilation (pompe, ventilateur)
Les appareils électroménagers, informatiques et audiovisuels

Liés au mode de **gestion du local par les occupants** et aux choix des équipements.

1. Contexte et généralités

Enveloppe



Un bâtiment est une boîte respirante protégeant des conditions climatiques extérieures

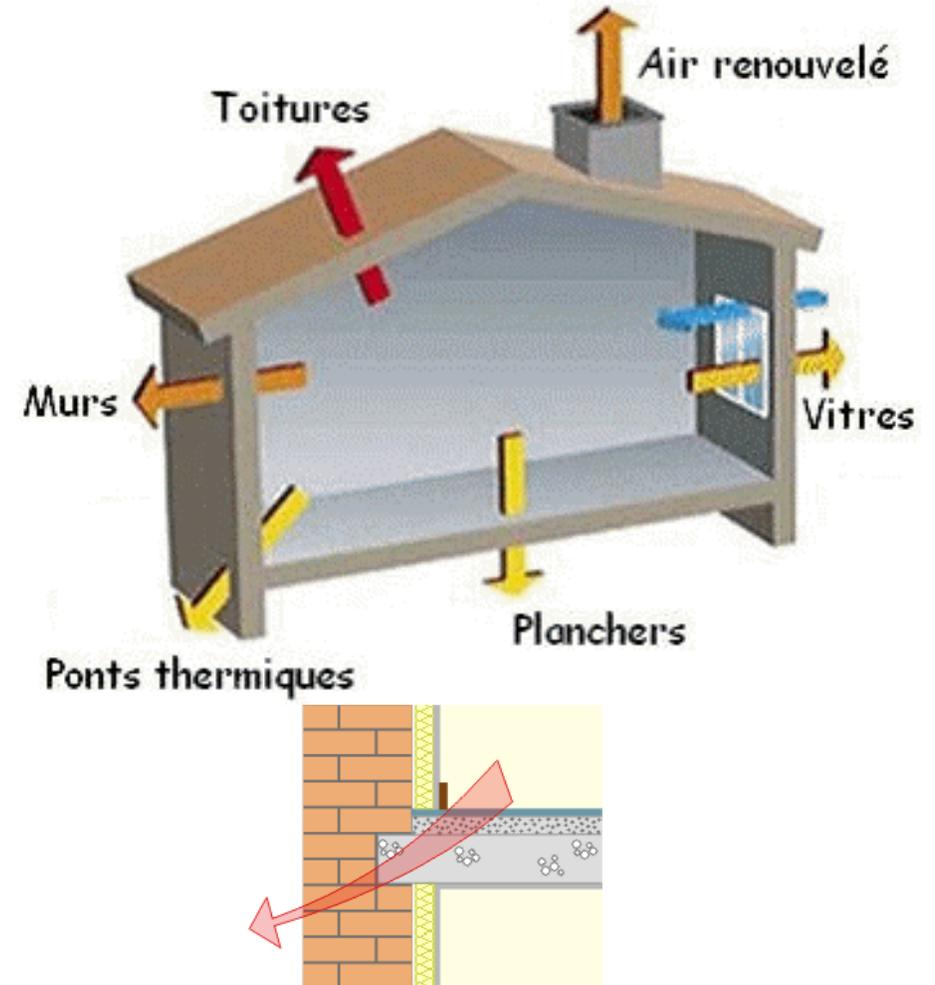
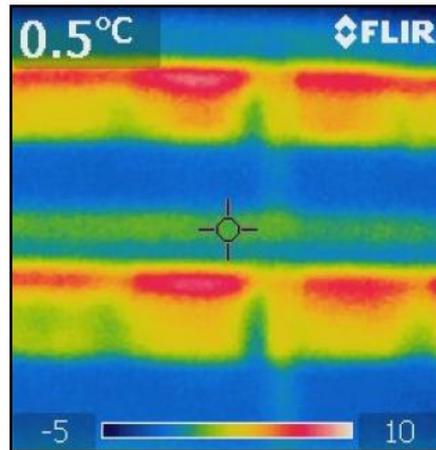
- Protection assurée par ***l'enveloppe plus ou moins isolante***
- Respiration assurée par le renouvellement d'air volontaire ou non
- ***Utilisation des matériaux hygroscopiques***

1. Contexte et généralités

Protection grâce à l'enveloppe

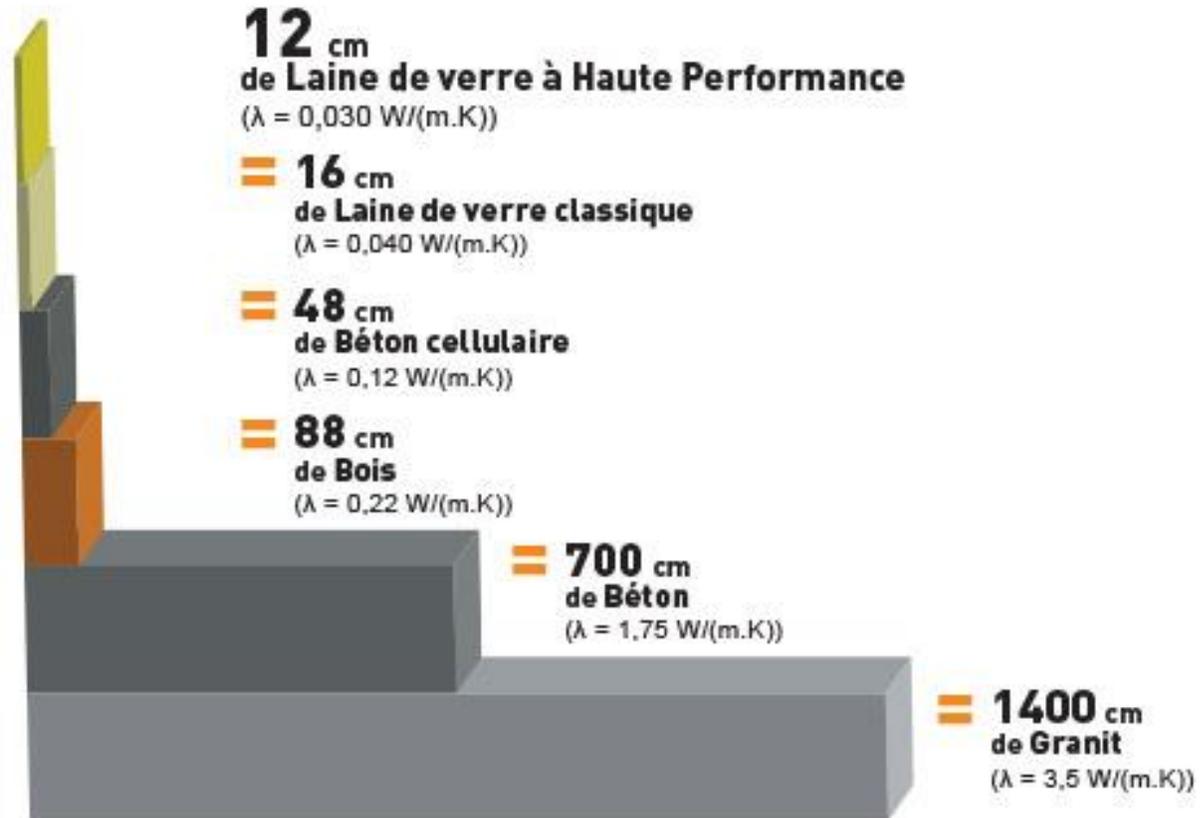
Isolation des parois

- Gains solaires par les fenêtres
- Pertes fonction:
*de l'épaisseur d'isolant
et de la technique d'isolation*



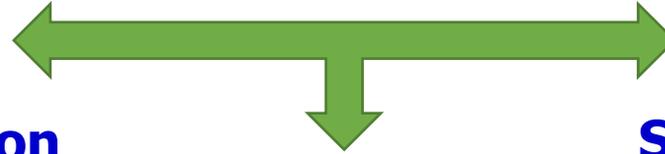
1. Contexte et généralités

Protection grâce à l'enveloppe



1. Contexte et généralités

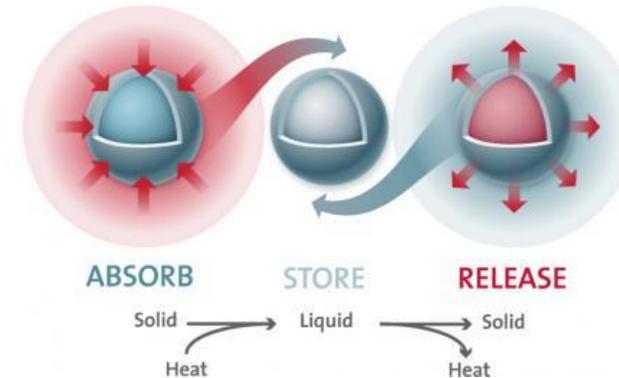
Réduction de la consommation



Réduction de la déperdition
Isolation thermique



Stockage d'énergie
Matériaux à changement de phase (MCP)



Normes d'isolation,
régies par
la réglementation
thermique

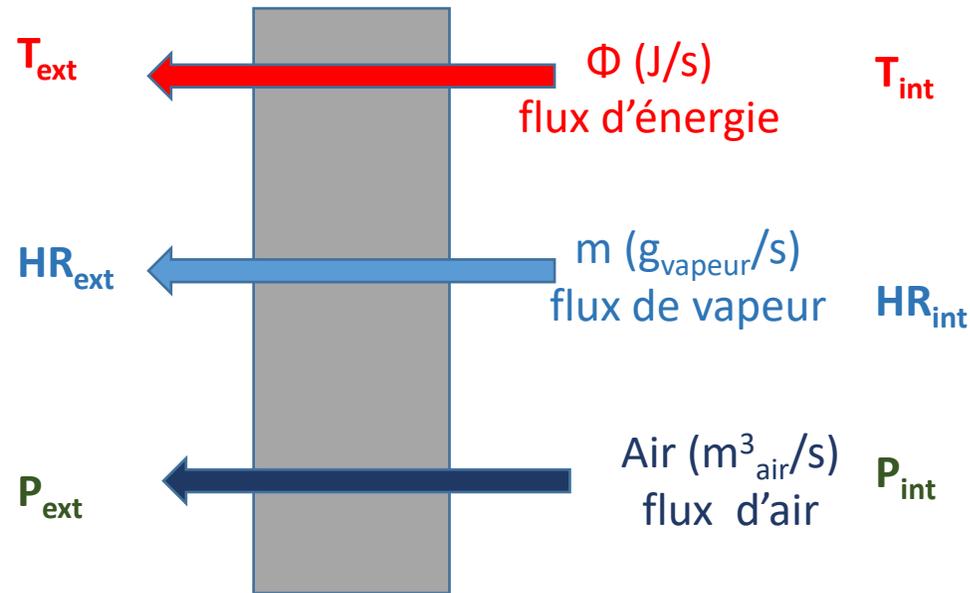


2. Thermique des matériaux

Les transferts au sein d'une paroi

Il faut maîtriser 3 transferts au sein des parois

1. La **chaleur**, pour minimiser les consommations
2. La **vapeur**, pouvant causer des condensations
3. Les infiltrations d'**air** véhiculant de la chaleur et de l'humidité



2. Thermique des matériaux

Les transferts au sein d'une paroi

Lors de la définition d'une paroi on doit prévoir trois « **barrières** » pour maîtriser ces flux

L'isolation : le flux de chaleur

Le plan d'étanchéité à l'air : les infiltrations d'air

Les « pares-vapeur » : les transferts d'humidité

Ces trois « barrières » vont permettre de diminuer ces transferts

Mais **attention** leur emplacement au sein d'une paroi est très important sur le comportement de la paroi

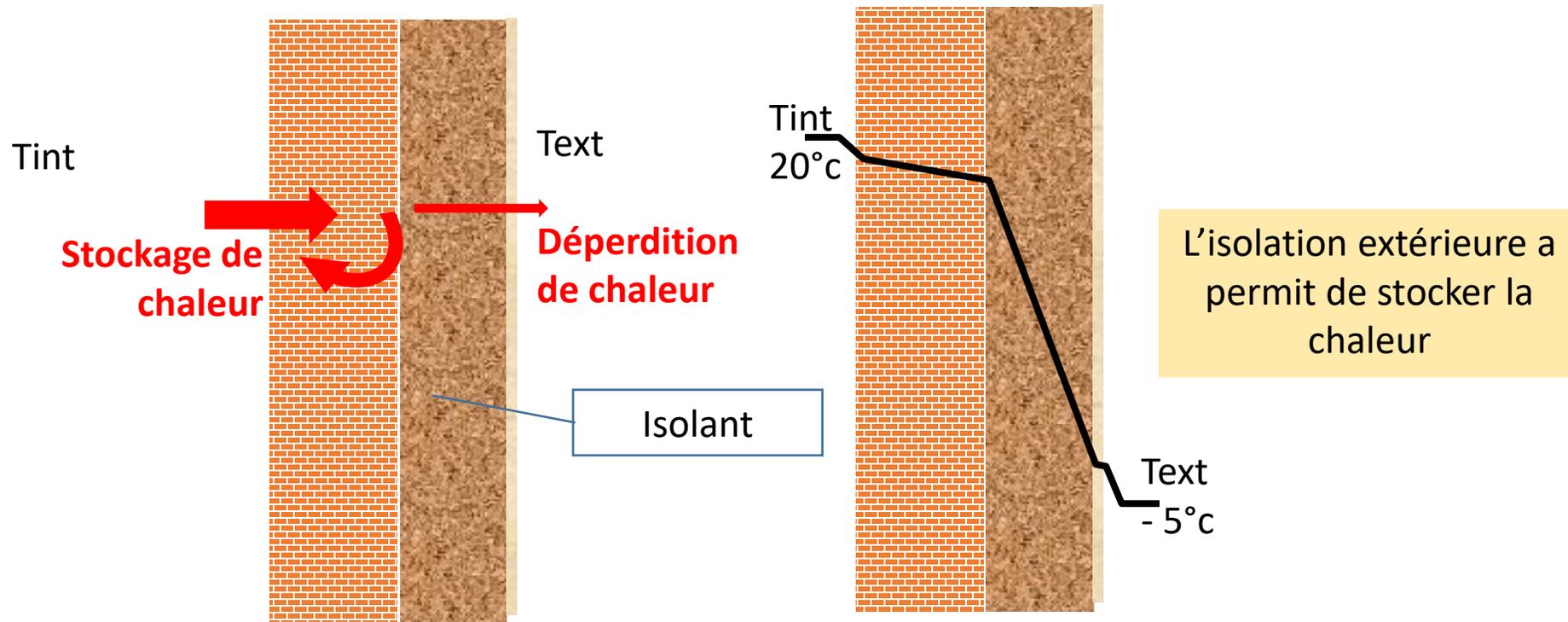
2. Thermique des matériaux

Isolation et Inertie thermique

L'isolation diminue les déperditions de chaleur

Une partie de la chaleur est bloquée par l'isolant

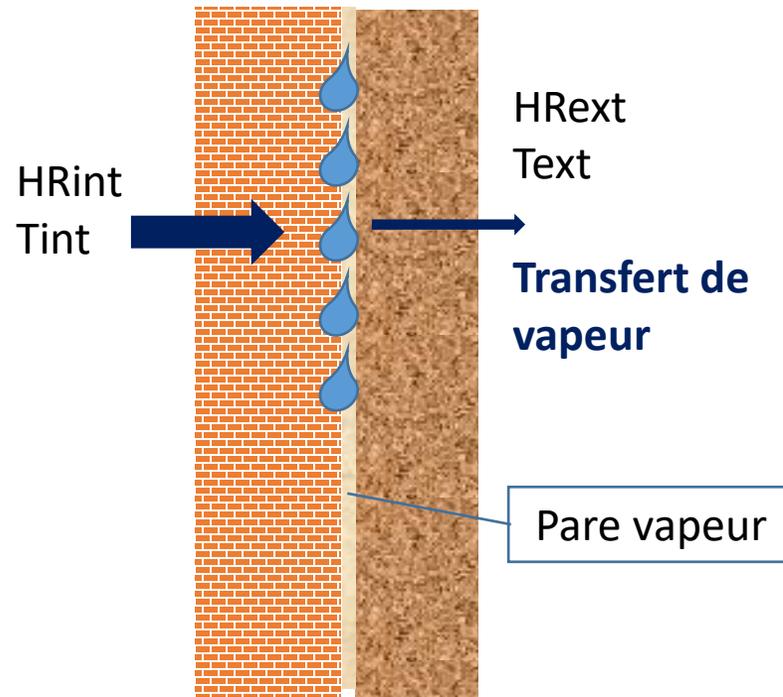
Cette partie du flux de **chaleur se stocke dans la brique** et fait monter la température de la brique. Puis est échangée avec l'ambiance intérieure.



2. Thermique des matériaux

Pare-vapeur et Frein vapeur

- Le frein vapeur diminue les transferts de vapeur
- Le transfert de vapeur est bloqué par le pare-vapeur
- La vapeur s'accumule et **risque de se condenser**, en dégradant les performances des matériaux



Il aurait fallu placer le pare-vapeur ou frein vapeur sur la face interne de la paroi pour éviter la condensation

2. Thermique des matériaux

1. Conductivité thermique
2. Chaleur massique
3. Masse volumique

4. Diffusivité thermique
5. Effusivité thermique

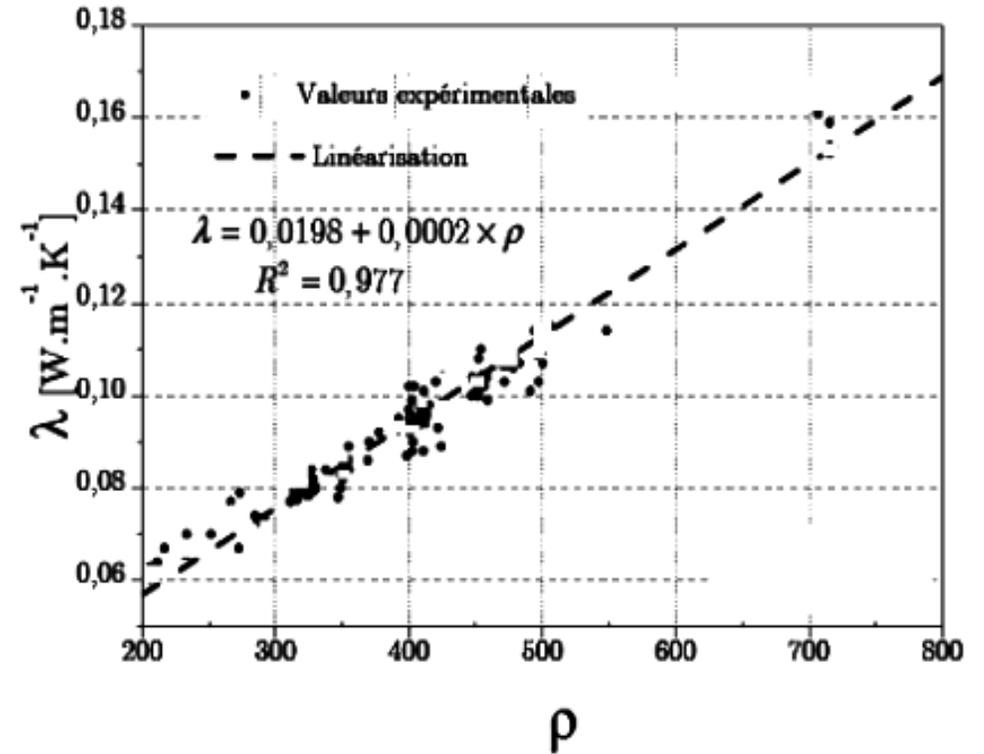
Nomenclature

- ISO 10456 & ISO 7345
- Unité: S.I

2. Thermique des matériaux

Conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

- Dans un matériau isolant, la chaleur est transportée par les trois modes possibles (conduction, rayonnement et convection), le premier étant dominant.
- La conductivité thermique caractérise la capacité isolante thermique d'un matériau. **Plus le matériau est isolant, plus le coefficient λ est faible.** Elle a un caractère intrinsèque du matériau et sa valeur ne dépend pas de la surface de la paroi.



La conductivité thermique du béton de chanvre sec en fonction de la masse volumique (Cerezo, 2008)

2. Thermique des matériaux

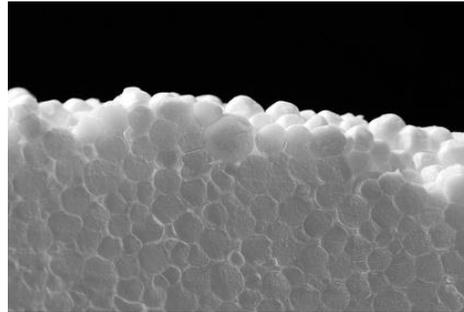
Conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

L'air immobile est un bon isolant ($\lambda_{\text{air}} = 0.026 \text{ W/m}^\circ\text{K}$)

Un isolant = air emprisonné pour le rendre immobile



Laine de chanvre



Polystyrène



Béton de chanvre

$$\lambda_{\text{isolant_laines de chanvre}} = 0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

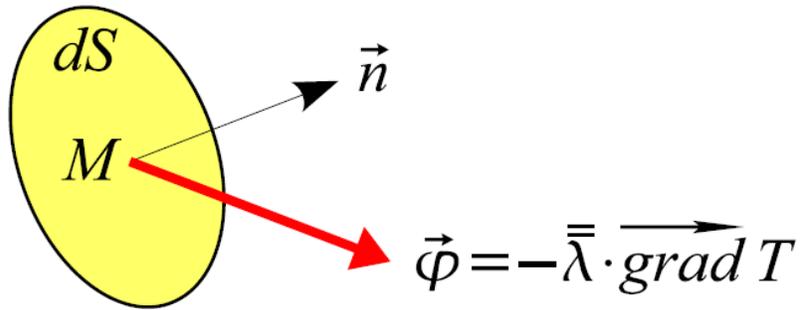
$$\lambda_{\text{isolant_polystyrène}} = 0.038 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$\lambda_{\text{béton chanvre}} = 0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$\lambda_{\text{béton}} = 1.75 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{K}$$

2. Thermique des matériaux

Conductivité thermique λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$): scalaire ou tenseur ?



$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \text{sym.} & & \lambda_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\vec{\nabla} T = \vec{\text{grad}} T = \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Si le matériau est isotrope $\vec{\varphi} = -\lambda \vec{\text{grad}} T$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + P$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

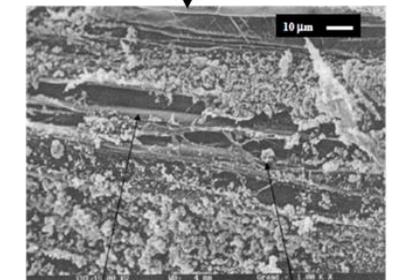
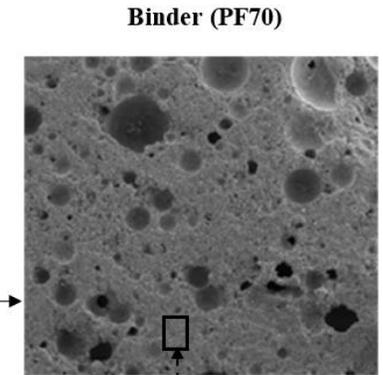
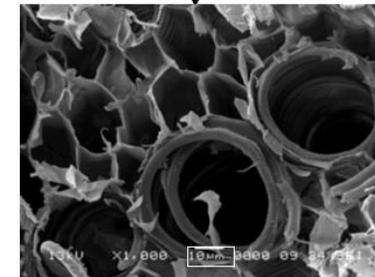
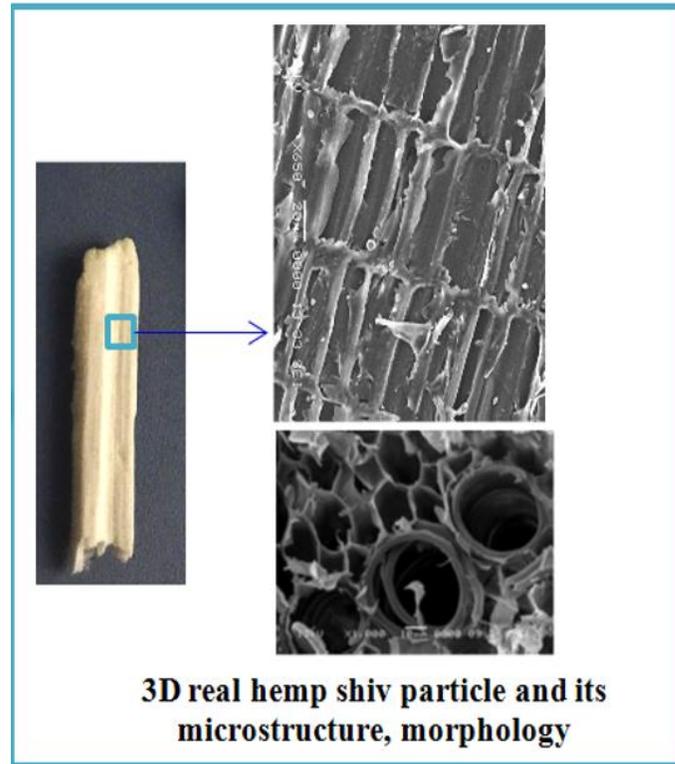
- En régime stationnaire (permanent) : $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ (le terme d'accumulation est nul) $\Rightarrow T(x, y, z)$
- Sans dissipation interne de chaleur : $P = 0$

2. Thermique des matériaux

Conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$): scalaire ou tenseur

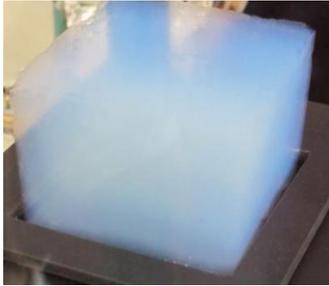
Conductivité thermique
du béton de chanvre (BC):

Deuxième partie:
modéliser la conductivité
thermique du BC



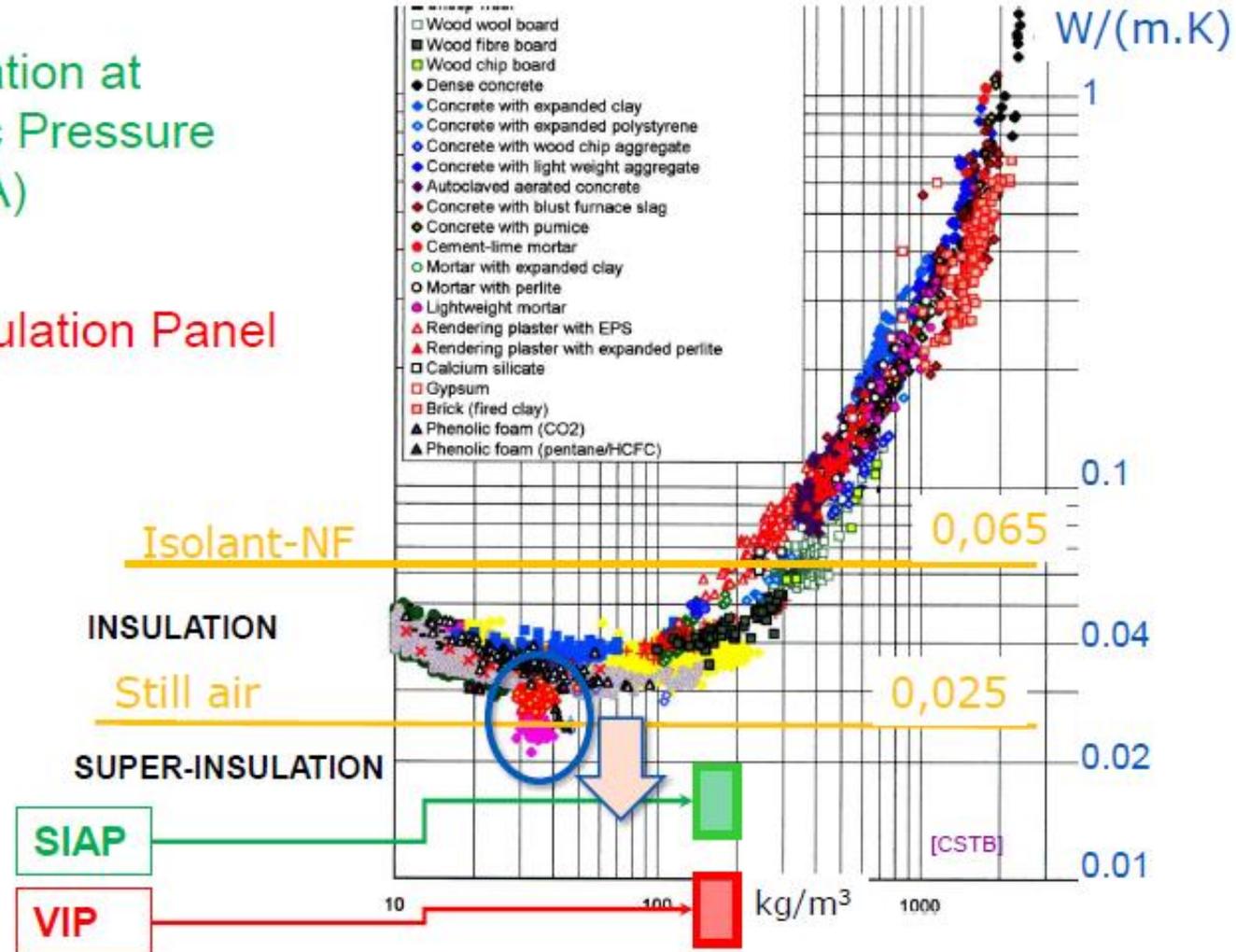
2. Thermique des matériaux

Conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)



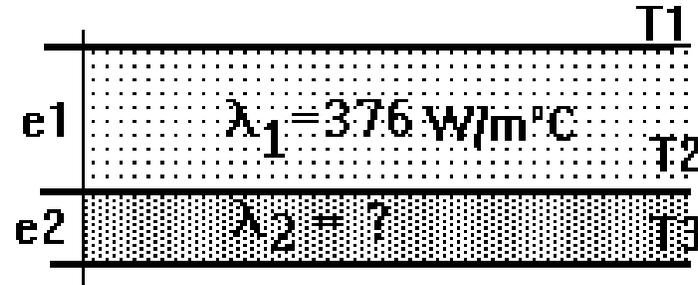
Super Insulation at Atmospheric Pressure (SIAP / SIPA) \approx aerogel

Vacuum Insulation Panel (VIP / PIV) \approx product



2. Thermique des matériaux

Exemple 1 : Méthode de comparaison



Pour mesurer la conductivité thermique d'un matériau, on peut utiliser une méthode appelée "Méthode de comparaison" qui consiste à accoler la plaque de conductivité inconnue à une plaque de cuivre et à relever les différentes températures.

Calculer λ_2 (métal) pour $T_1=25,35^\circ\text{C}$, $T_2=20,15^\circ\text{C}$ et $T_3=11,07^\circ\text{C}$, $e1=20\text{mm}$ et $e2=3\text{mm}$

2. Thermique des matériaux

Chaleur spécifique C (J/(kg.K))

- La capacité thermique exprime la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur.
- Elle est caractérisée par la chaleur massique ou la chaleur volumique qui mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C , 1 kg (ou 1 m^3) du matériau.

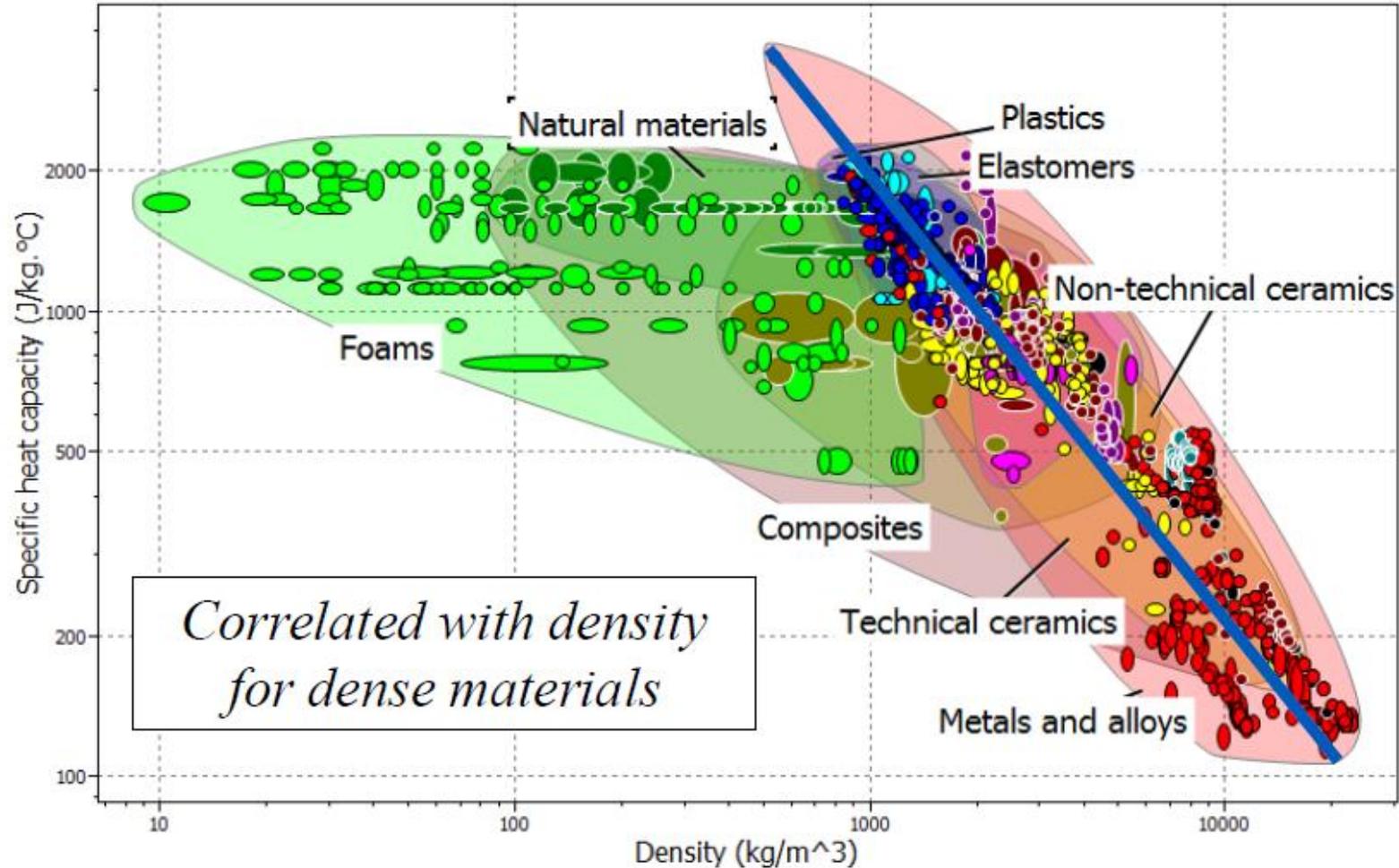
- Conductivité thermique λ [W/(m·K)]
- Chaleur spécifique C [J/(kg·K)]
- Masse volumique ρ [kg/m³]



Simulation STD

2. Thermique des matériaux

Chaleur spécifique C (J/(kg.K))



Reference: Bernard YRIEIX , 2016

2. Thermique des matériaux

Variables			ε	Emissivity	-
A	Area	m^2	λ	Conductivity	$W/(m.K)$
q	Flux density	W/m^2	Φ	Flux	W or J/s
a	Diffusivity	m^2/s	ρ	Density	kg/m^3
b	Effusivity	$J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2}$	ϕ	Pore or fiber diameter	m
c_p	Specific heat	$J/(kg.K)$	α	Absorption coef.	-
d	Thickness	m	γ	Reflexion coef.	-
h	Exchange coef.	$W/(m^2.K)$	τ	Transmission coef.	-
m	Mass	kg	Δ	Variation, gradient	-
M	Emitance	W/m^2	θ	Porosity	-
K	Extinction coef.	m^{-1}			
P	Pressure	Pa			
Q	Energy	J	Constants		
R	Thermal resistance	$m^2.K/W$	C	Gas constant in Knudsen's relation	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
T	Temperature	K			
t	Time, duration	s	R	Gas constant	$8,31 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
X	Concentration		σ	Stephan-Boltzman const.	$5.67 \cdot 10^{-8} W/(m^2.K^4)$
p	Volume conc. = X_v				

Energie		Puissance	
Joule (J)		Watt (W)	$W = 1J/1s$
Watt-heure (Wh)	$Wh = 3600 J$		
Calorie (Cal)	$Cal = 4.18 J$	KCal/h	$4180/3600 = 1.16 W$
Thermie (Th)	$Th = 10^6 Cal$	Th /h	$1161 W$

2. Thermique des matériaux

Matériau : la conductivité thermique λ (W/(m.K))

Couche : la résistance thermique **Rth** (Km²/W) = e / λ

Paroi : le coefficient de transmission surfacique **U** (W/m²°K)

Enveloppe : coefficient global d'isolation **U_{bât}** (W/m²K)

Bâtiment : coefficient **H** (W/K) isolation + renouvellement d'air

2. Thermique des matériaux

Diffusivité thermique m^2/s

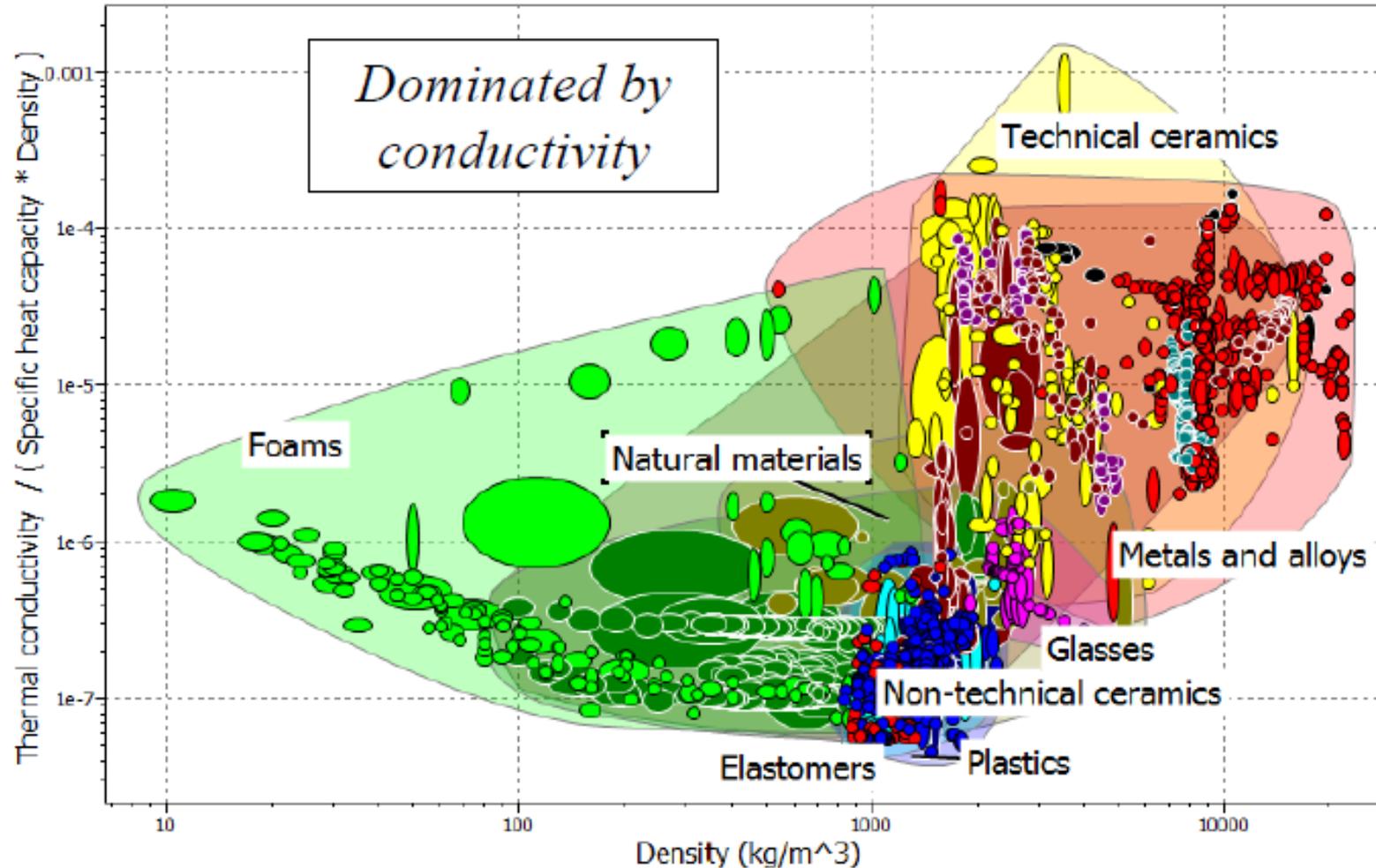
$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Ce critère mesure **la vitesse** d'évolution de la température d'un matériau en fonction des sollicitations thermiques extérieures.

Le déphasage peut être favorisé en utilisant comme critère la **diffusivité** d'un matériau

2. Thermique des matériaux

Diffusivité thermique- Tendances



Reference: Bernard YRIEIX , 2016

2. Thermique des matériaux

Effusivité thermique

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$$

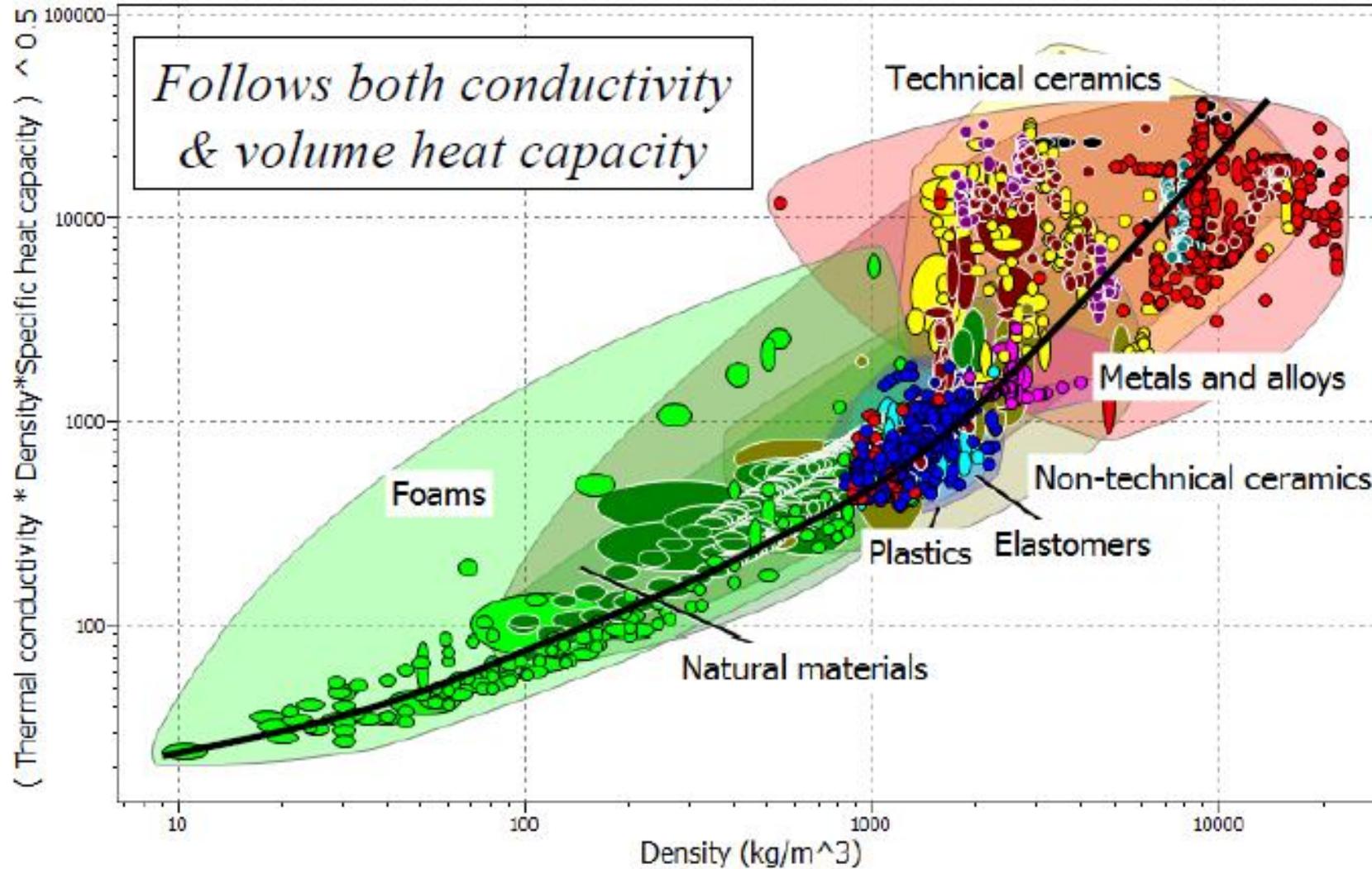
Aptitude d'un corps à changer de température lorsqu'il reçoit un apport d'énergie thermique non uniformément distribué.

L'effusivité thermique est le paramètre qui rend compte de l'importance conjointe des deux phénomènes : **la variation de température par stockage de chaleur et la variation de température par conduction.**

On observe une effusivité élevée pour les matériaux ayant à la fois une conductivité élevée et une capacité thermique volumique élevée.

2. Thermique des matériaux

Effusivité thermique - tendances



2. Thermique des matériaux

Manifestations de l'inertie thermique

Stockage de la chaleur

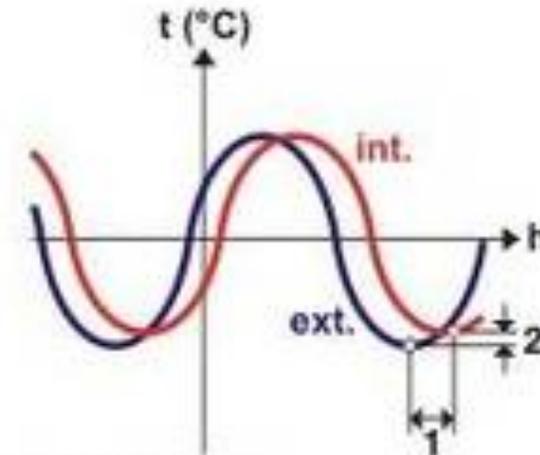
Déphasage

L'inertie permet

- Déphasage dans le temps
- Amortissement

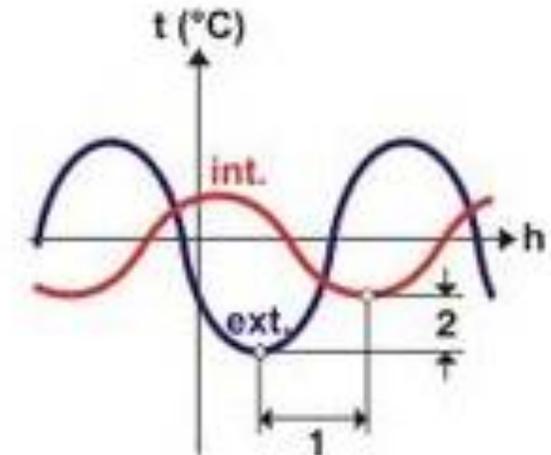
Pour garantir le confort d'été (éviter les surchauffes)

- une faible diffusivité (inertie en transmission).
- une forte effusivité thermique (inertie par absorption).



1: déphasage
2: amortissement

Faible inertie thermique



Forte inertie thermique

2. Thermique des matériaux

Inertie thermique

L'inertie d'une paroi n'est pas, a proprement parler, bonne ou mauvaise, mais adaptée ou non à une situation.

Dans le cas d'un bâtiment a occupation intermittente (résidence secondaire par exemple), une trop forte inertie n'est pas souhaitable.



2. Thermique des matériaux

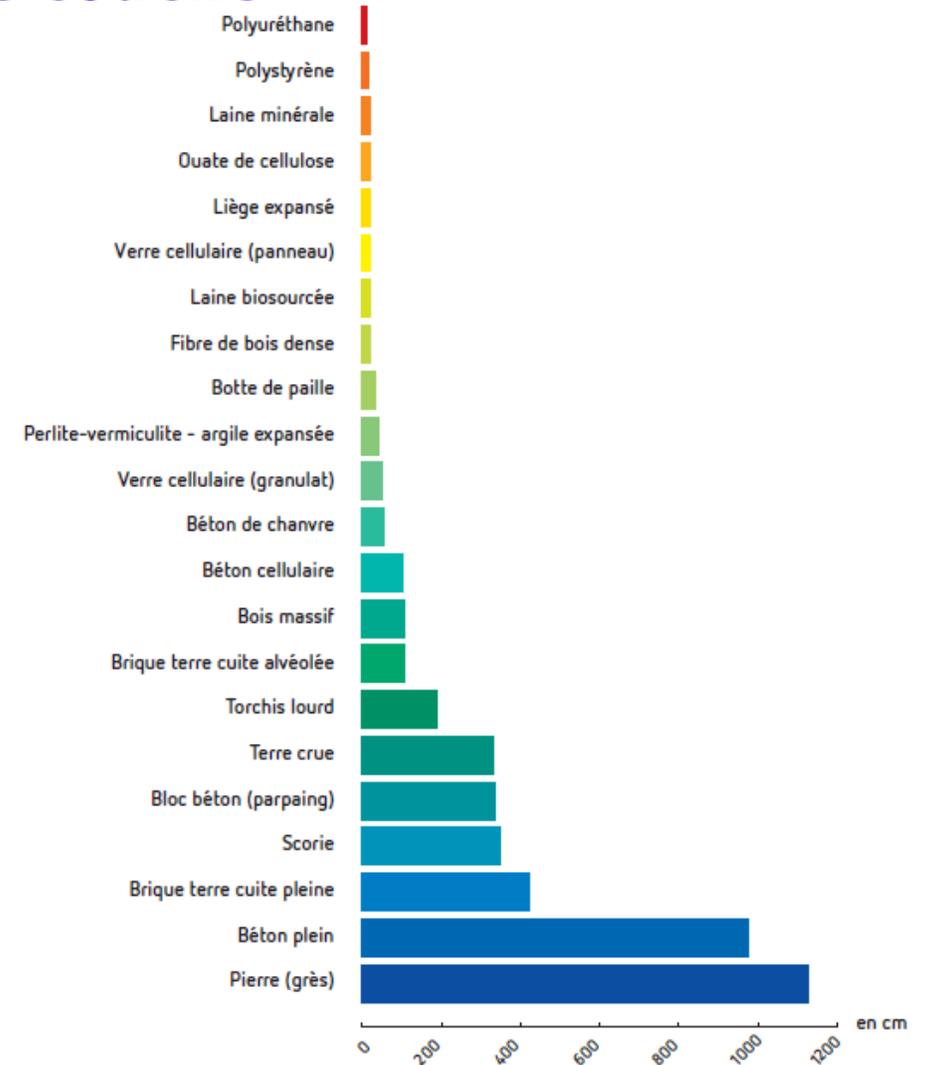
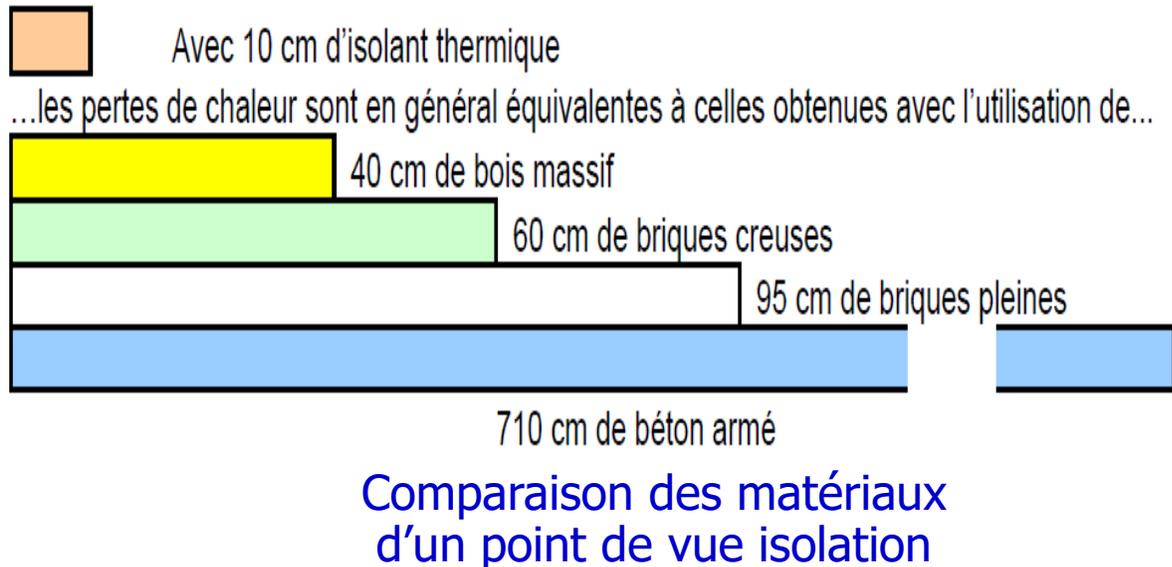
Résistance thermique d'une couche

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

e : épaisseur du matériau [m]

λ : conductivité thermique [W/(m.K)]

R : résistance thermique [m².K/W]



Épaisseur équivalente moyenne pour une résistance thermique $R=5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$

2. Thermique des matériaux

Les matériaux dans le DTU Th U

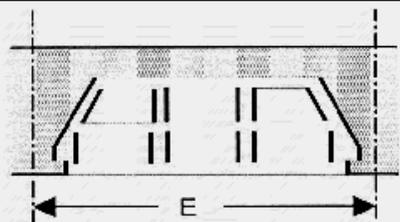
Matériau homogène

Conductivité thermique λ (W/m^{°K})

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)
2.2 - BETONS		
2.21 - BÉTONS DE GRANULATS COURANTS SILICEUX, SILICO-CALCAIRES ET CALCAIRES spécifications de la norme NF P 18-540)		
2.211 - Béton plein	2 300 < ρ ≤ 2 600	2,00
	2 000 < ρ ≤ 2 300	1,65
2.212 - Béton caverneux	1800 < ρ ≤ 2 000	1,35
	1600 ≤ ρ ≤ 1 800	1,15

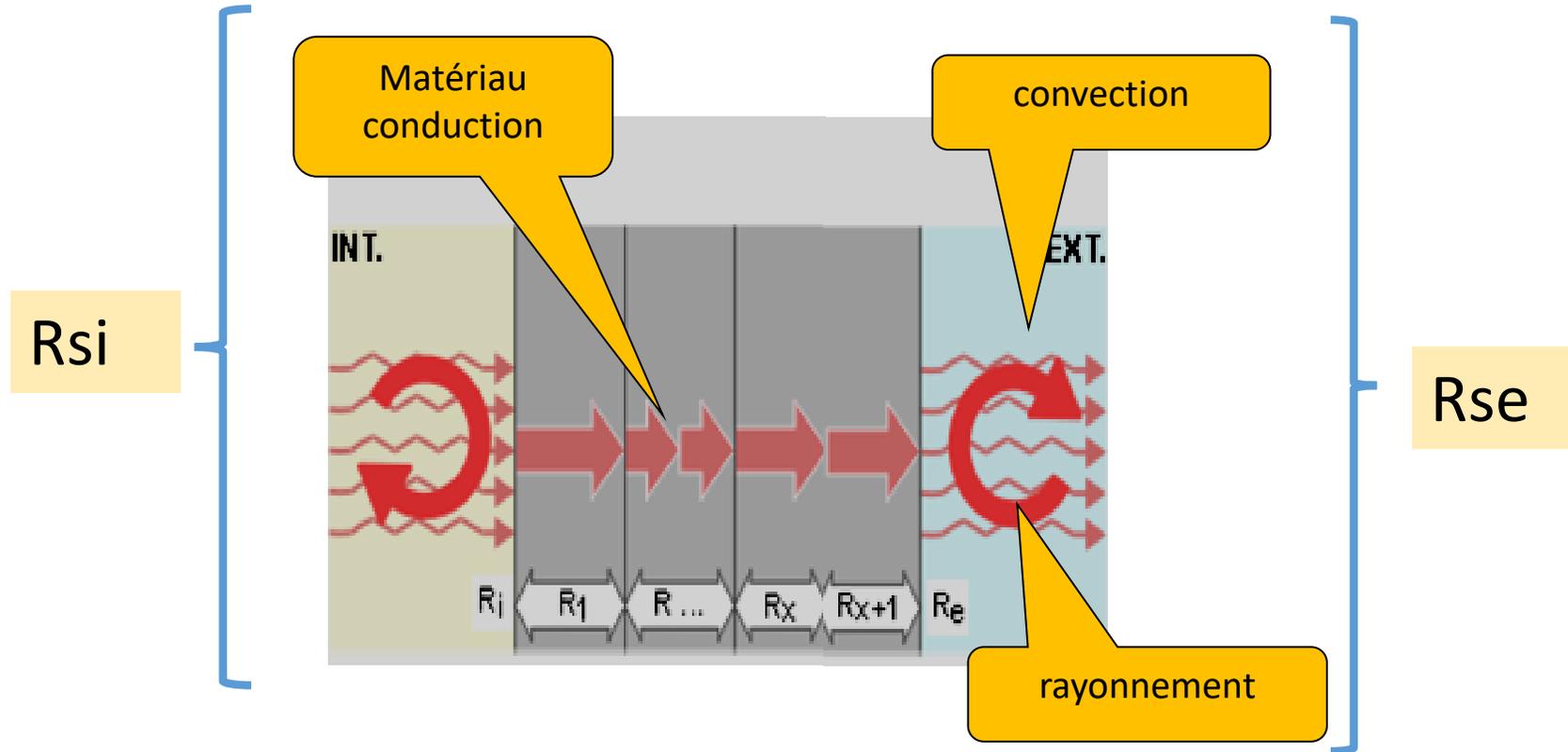
Élément hétérogène

Résistance thermique **Rth** (Km²/W)

Coupe du plancher entre poutrelles	Entraxes des poutrelles (E) en cm	Hauteur des entrevous			
		8	12	16	20
Planchers sans dalle de compression ou avec dalle de compression en béton de granulats lourds					
	50 < E ≤ 60	0.11	0.13	0.15	0.17
	60 < E ≤ 70	0.12	0.14	0.16	0.18
	50 < E ≤ 60	Rth			
	60 < E ≤ 70				
					0.23

2. Thermique des matériaux

Le coefficient de transmission surfacique U_p



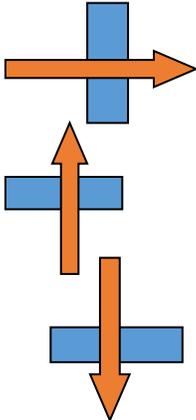
$$\frac{1}{U_p} = R_{si} + R_{se} + \sum R_{th} + \sum \frac{e}{\lambda} = R_T \quad (\text{m}^2\text{°K/W})$$

R_T : la résistance thermique totale

2. Thermique des matériaux

Résistances superficielles R_{si} et R_{se}

Extérieur (effet du vent)



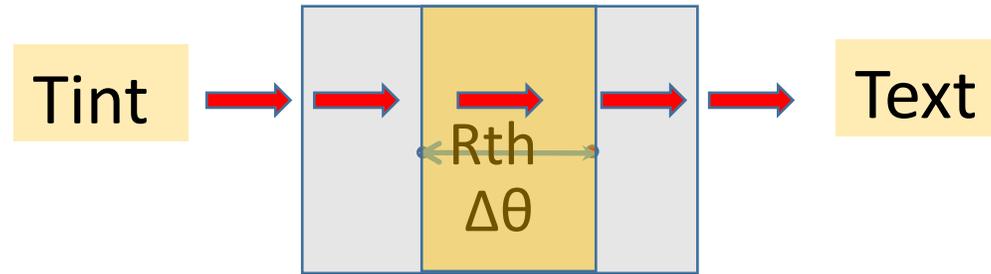
Résistances d'échanges superficiels $m^2 \cdot K/W$	Paroi donnant sur l'extérieur, un passage ouvert, ou un local ouvert		Paroi donnant sur un volume non chauffé ou un autre espace chauffé	
	R_{si}	R_{se}	R_{si}	R_{si}'
Paroi verticale	0.13	0.04	0.13	0.13
Paroi horizontale Flux ascendant	0.10	0.04	0.10	0.10
Paroi horizontale Flux descendant	0.17	0.04	0.17	0.17

2. Thermique des matériaux

Loi de Fourier et répartition des températures

Régime permanent (la température tout point est constante)

Flux constant dans toutes les couches



$$\varphi = U_P \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) = \left(\frac{\Delta T}{R_{th}} \right) \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Flux ou déperditions de chaleur (W): $\varphi \times A$

Densité de flux φ (W/m²)

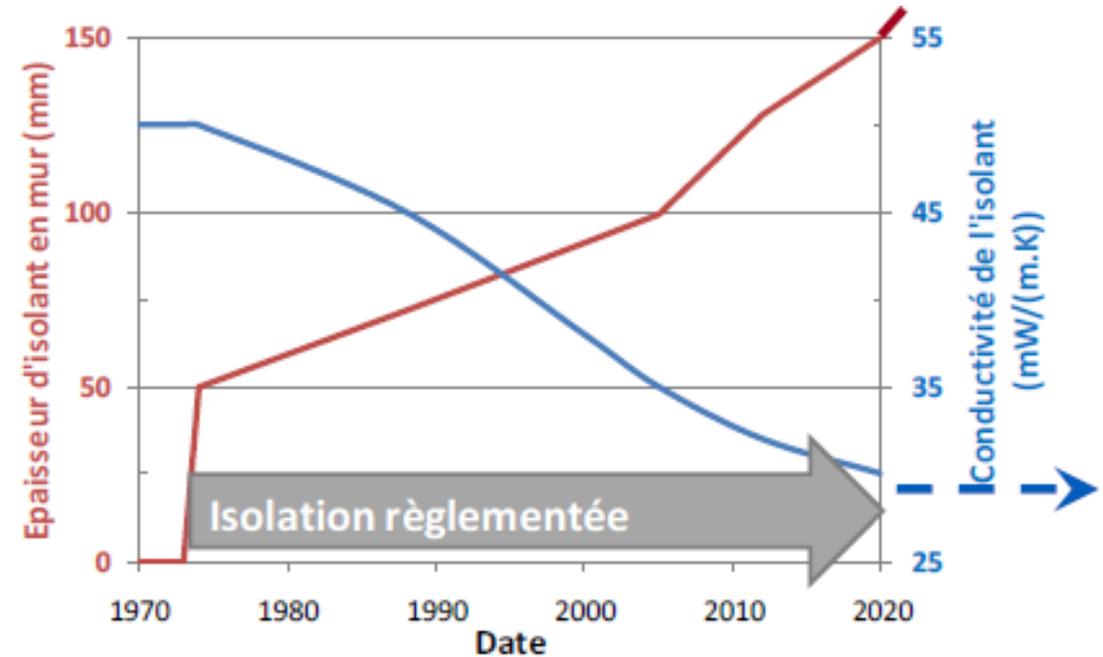
Déperditions sur une période de temps:

$$\varphi \times A \times \text{temps (J ou Wh)}$$

3. Matériaux isolants

Valeurs recommandées pour les bâtiments BBC

Type de paroi	U recommandé W/(m ² .K)	Épaisseur d'isolant cm
Mur extérieur	0.3 à 0.2	13 à 20 cm
Toiture	0.1 à 0.15	26 à 40 cm
Plancher bas	0.2 à 0.25	16 à 20 cm
Fenêtres	1.2 à 1.6	
Porte	1 à 1.5	

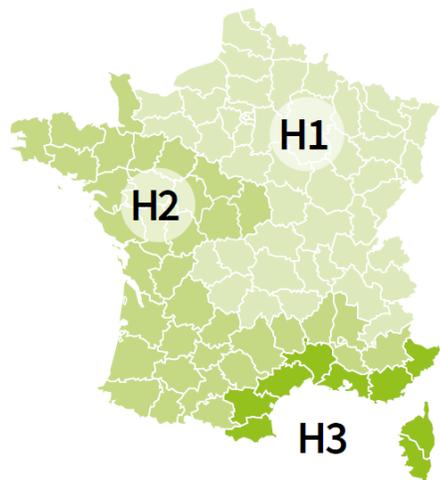


PassiveHaus: $U < 0.15$ (W/(m².K))

3. Matériaux isolants

Valeurs recommandées pour la rénovation

VALEURS VALABLES DU 1^{ER} JANVIER 2018 AU 31 DÉCEMBRE 2022



La résistance thermique R d'une paroi rénovée doit être supérieure ou égale au niveau minimal réglementaire

Type de paroi opaque	Résistance thermique minimale R de l'ensemble paroi + isolant en m ² .K / W		
	zone climatique H1	zone climatique H2 (H3 à plus de 800 m d'altitude)	Zone climatique H3 (à moins de 800 m d'altitude)
Mur extérieur, toiture de pente > 60 °	2,9	2,9	2,2
Mur en contact avec un volume non chauffé	2	2	2
Plancher bas donnant sur l'extérieur ou sur un local non chauffé	2,7 *	2,7	2,1
Planchers de combles perdus	4,8	4,8	4,8
Toiture de pente < 60 °	4,4 **	4,3	4
Toiture terrasse	3,3 ***	3,3 ***	3,3 ***

* R = 2,1 possible pour adapter l'épaisseur d'isolant nécessaire à la hauteur libre disponible si celle-ci est limitée par une autre exigence réglementaire.

** R = 4 possible si la diminution de surface habitable est supérieure à 5 % en raison de l'épaisseur de l'isolant.

*** R = 3 possible dans les cas suivants :

- l'épaisseur d'isolation implique un changement des huisseries, ou un relèvement des garde-corps ou des équipements techniques,
- ou l'épaisseur d'isolation ne permet plus le respect des hauteurs minimales d'évacuation des eaux pluviales et des relevés,

3. Matériaux isolants

Isolants traditionnels

Classées en 3 grandes familles (origine de leur matière première)

Matériaux biosourcés	Matériaux minéraux	Matériaux synthétiques
<p>Fibres végétales ou animales</p> <p>Matière première issue de ressources renouvelables et valorise majoritairement des coproduits de l'agriculture ou de l'industrie du bois.</p> <p>Comportement hygroscopique donc capacité de régulation de l'humidité</p>	<p>Ressources minérales vierges ou issus en partie du recyclage pour certains</p> <p>Sous forme de laines de verre ou de roche, ce sont les produits d'isolation les plus répandus sur le marché français</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>	<p>Ressources pétrochimiques, donc non renouvelables et fortement émetteurs de gaz à effet de serre</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>

3. Matériaux isolants

Matériaux bio-sourcés

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les isolants biosourcés ne sont pas plus soumis au risque de pénétration de rongeurs que les autres isolants.

Attention donc aux points faibles du bâti : défauts d'enduits, canalisations ou aérations non protégées, jonctions entre parois, etc. La pose de grilles anti-rongeurs est une des principales solutions.



3. Matériaux isolants

Matériaux bio-sourcés

Biosourcés

Ouate de cellulose

PRÉSENTATION SUCCINCTE DU MATÉRIAU

La ouate de cellulose est obtenue à partir de papiers recyclés (journaux neufs invendus et/ou chutes de coupes de papiers neufs d'imprimerie), auxquels sont ajoutés des additifs pour assurer la résistance au feu et aux moisissures du produit.

La ouate de cellulose est utilisée comme isolant depuis les années 1930 aux Etats-Unis et en Scandinavie, où plusieurs centaines de milliers de bâtiments privés et publics ont utilisé ce matériau.



3. Matériaux isolants

Biosourcés

Ouate de cellulose

Composition principale

- Papier recyclé
- Adjuvant : principalement sel de bore (< 5%)

Fin de vie

Déchets non dangereux (recyclable, mais non compostable)

Format et type de mise en œuvre

- Vrac pour soufflage, insufflation, flocage
- Panneaux semi-rigides (épaisseur de 45 à 140 mm)

Cadre normatif

- Marquage CE
- Produits principalement sous Avis Techniques
- Certains produits bénéficient d'un certificat ACERMI

Caractéristiques techniques principales :

Masse volumique : ρ	30 - 70 kg / m ³ selon les types de mise en œuvre
Conductivité thermique λ	0,037 à 0,042 W/(m.K) selon produits et types de mise en œuvre
Capacité thermique massique C_p	2000 J/(kg.K)
Perméabilité à la vapeur d'eau μ	2
Capacité hygrothermique	moyenne
Énergie grise	1 - 2 kWh/kg

3. Matériaux isolants

Biosourcés

Béton de chanvre

Caractéristiques techniques principales :

Masse volumique : ρ	200 - 800 kg/m ³ selon couples chaux-chanvre et selon type de mise en œuvre
Conductivité thermique λ	0,06 à 0,15 W/(m.K) selon dosage et application
Capacité thermique massique C_p	1350 - 1800 J/(kg.K)
Perméabilité à la vapeur d'eau μ	5 - 8
Capacité hygrothermique	moyenne
Énergie grise	1,8 kWh/kg
Réaction au feu	A2 s1 d0



PRÉSENTATION SUCCINCTE DU MATÉRIAU

Le chanvre (*cannabis setiva* L) est une plante annuelle utilisée depuis près d'un millénaire en France qui est le premier pays producteur européen.

Agronomiquement intéressante puisqu'elle ne nécessite que très peu d'intrants (traitement, engrais, irrigation), l'ensemble de la plante est valorisé. Si les fibres constituant la périphérie de la tige de chanvre sont utilisées dans le textile ou pour la fabrication de laine isolante, l'intérieur de la tige, appelé chènevotte, est également valorisé, par exemple sous forme de béton de végétal dans le secteur du bâtiment.

En association avec un liant (chaux, ciment,...) prescrit avec des dosages variant selon les applications et les couples liant-chanvre utilisés, ce matériau de remplissage peut alors être mis en forme sur chantier selon différentes techniques particulièrement adaptées à la rénovation du bâti ancien.

Référence:

Programme
energievie.info



3. Matériaux isolants

Minéraux

Laines minérales

de verre (LV) ou de roche (LR)

PRÉSENTATION SUCCINCTE DU MATÉRIAU

La laine de verre est produite à base de sable, de fondants et de produits verriers de recyclage (calcin), alors que la laine de roche est principalement issue de la transformation de basalte ou de laitier de hauts fourneaux. Après fibrage à 1400 °C, la matière est mise en forme par l'ajout de liants et d'adjuvants.

La résistance thermique et la pérennité de la laine de verre étant dégradées en présence d'humidité, les laines de verre sont principalement commercialisées revêtues d'un pare-vapeur en kraft.

La laine de roche diffère principalement de celle de verre par sa densité plus importante qui permet des mises en œuvre comme support d'enduits ou sous étanchéité de toitures plates.

Caractéristiques techniques principales :

Masse volumique : ρ	10 - 28 kg/m ³ Laine de verre 28 - 150 kg/m ³ Laine de roche
Conductivité thermique λ	0,030 à 0,045 W/(m.K) selon produits
Capacité thermique massique C_p	800 - 1000 J/(kg.K)
Perméabilité à la vapeur d'eau μ	1-2 produit nu ↗ ↗ avec kraft ou autres
Capacité hygrothermique	non
Énergie grise	7 - 10 kWh/kg



3. Matériaux isolants

Synthétiques

Polystyrène expansé (EPS ou PSE)

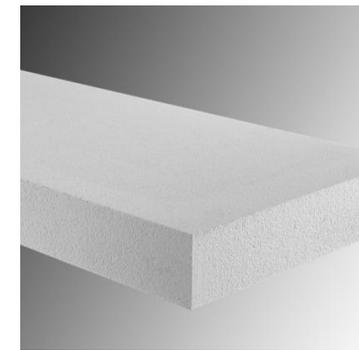
PRÉSENTATION SUCCINCTE DU MATÉRIAU

La fabrication du polystyrène expansé est effectuée par expansion de billes de monomère styrène à l'aide de pentane et de vapeur d'eau pour former un isolant à structure cellulaire fermée et remplie de pentane.

Les versions graphitées présentent une conductivité thermique améliorée (~ 20 %) par l'ajout de graphite (carbone) dans leur procédé de fabrication.

Caractéristiques techniques principales :

Masse volumique : ρ	10 - 30 kg/m ³ (selon produits)
Conductivité thermique λ	0,032 à 0,038 W/(m.K) (selon produits)
Capacité thermique massique C_p	1200 - 1400 J/(kg.K)
Perméabilité à la vapeur d'eau μ	20 à 100
Capacité hygrothermique	non
Énergie grise	30 - 35 kWh/kg
Réaction au feu	E



3. Matériaux isolants

Autres

Isolant aérogel de silice

Pour réduire la conductivité thermique des isolants, les industriels cherchent à réduire la mobilité du gaz (air ou autres) présent dans le matériau en l'emprisonnant dans des cavités de très faibles dimensions, à l'échelle nanométrique. L'aérogel de silice est le principal matériau réalisé en ce sens. Il peut être semi-transparent et présente une conductivité thermique variant entre 0,01 et 0,02 W/(m.K), tout en étant quasiment ininflammable et hydrophobe.

Il peut se présenter sous forme de matelas, en béton, ou intégré dans des produits comme par exemple la laine de roche.

Peu, voire aucun produit de ce type ne bénéficie actuellement de reconnaissance technique en France.



Isolant sous vide (PIV)

Pour réduire encore la conductivité thermique des produits à base d'aérogel, les isolants sous vide placent des aérogels dans une enceinte sous vide, permettant de remplacer l'air par du vide à la conductivité thermique beaucoup plus faible. Enveloppés d'un revêtement multicouche à base de polymère et d'aluminium, ces panneaux présentent une conductivité de l'ordre de 0,005 W/(m.K). Si cette performance rend ces produits très intéressants pour réduire l'épaisseur des isolants à résistance thermique constante, leur vulnérabilité à la perforation de l'enveloppe étanche les rend délicats à utiliser dans l'habitat. Leur pérennité n'est également pour le moment pas assurée.



3. Matériaux isolants

Famille	Dénomination		Utilisation				
			Mur	Plancher Combles perdus	Rampant	Support de couverture	Sol sous chape
Isolant synthétique	Polystyrène expansé	Panneau	✓	✓	✓	✓	✓
	Polystyrène extrudé	Panneau	✓	✓	✓	✓	✓
	polyuréthane	Panneau	✓	✓	✓	✓	✓
Isolants minéraux	Laine de verre	Rouleau	✓	✓	✓	✓	
	Laine de roche	Rouleau	✓	✓	✓	✓	
	Verre cellulaire	Panneau					✓
	Perlite expansée	Granulats en vrac	✓				
	Vermiculite expansée	Granulats en vrac	✓	✓			
	Mousse minérale	Panneau	✓	✓			
Isolants végétaux	Bois	Laine	✓	✓	✓		
		Panneaux haute densité	✓	✓	✓	✓	✓
	Liège expansé	Granules	✓	✓			✓
		Panneaux	✓	✓	✓	✓	✓
	Chanvre	Laine en rouleau	✓	✓	✓		
		Laine en panneau	✓	✓	✓		
		Vrac	✓	✓	✓		✓
	Laine de lin	Rouleau	✓	✓	✓		
		Panneau	✓	✓	✓		
Paille	Botte	✓	✓	✓			
Isolants issus du recyclage	Ouate de cellulose	Vrac insufflé sous pression	✓	✓	✓		
		Vrac projeté à sec		✓			
		Panneau	✓	✓	✓		
Textile recyclé	Métisse faible densité	✓	✓	✓			
Isolant d'origine animal	Laine de mouton	Rouleau	✓	✓	✓		
		Panneau	✓	✓	✓		
	Plume	Panneau	✓	✓	✓		

3. Matériaux isolants

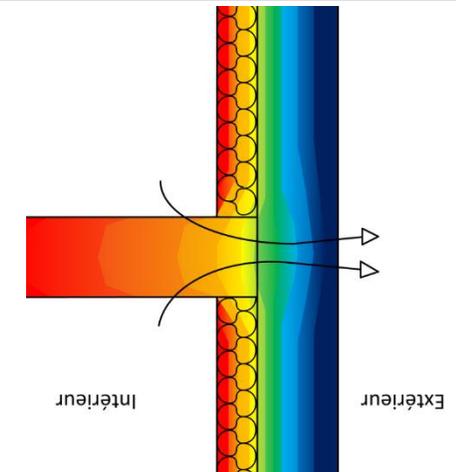
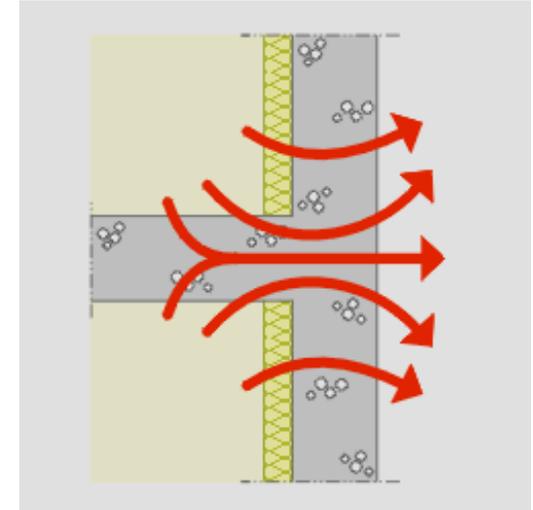
La performance énergétique

Elle est fonction du système constructif choisi

- Isolation rapportée par l'intérieur **ITI**
- Isolation rapportée par l'extérieur **ITE**
- Isolation répartie **ITR**
- Système à ossature
 - Ossature bois **COB**
 - Ossature métallique
 - Ossature béton

Elle dépend de plusieurs paramètres :

- La résistance thermique de l'isolation
- La place de l'isolant
- La continuité de l'isolation
- Les ponts thermiques
- L'étanchéité à l'air de l'enveloppe

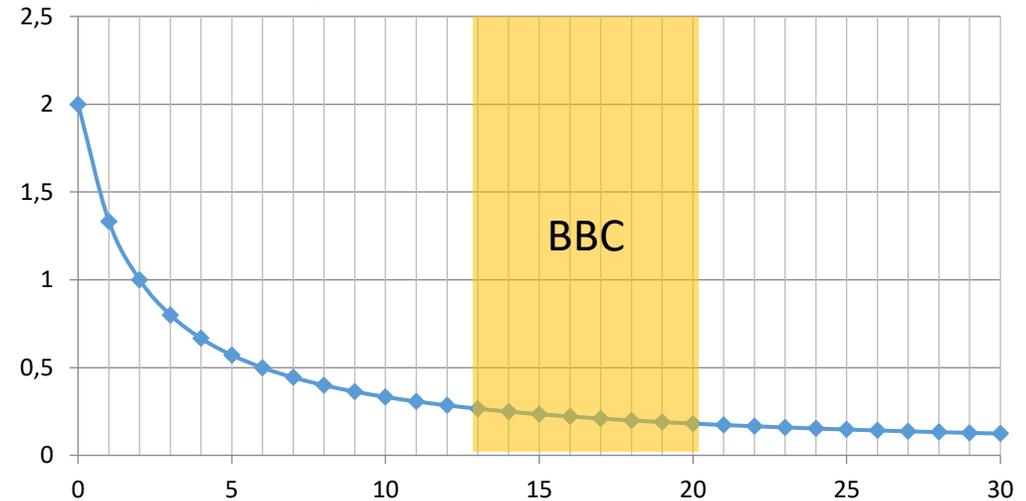


3. Matériaux isolants

Influence de l'épaisseur d'isolant

- 5 cm $\Delta U = 1.43 \text{ W/m}^2\text{°K}$
- 10 cm $\Delta U = 1.67 \text{ W/m}^2\text{°K}$
- 20 cm $\Delta U = 1.82 \text{ W/m}^2\text{°K}$
- 30 cm $\Delta U = 1.88 \text{ W/m}^2\text{°K}$

coefficient U en $\text{W/m}^2\text{°K}$ en fonction de l'épaisseur d'isolant en cm



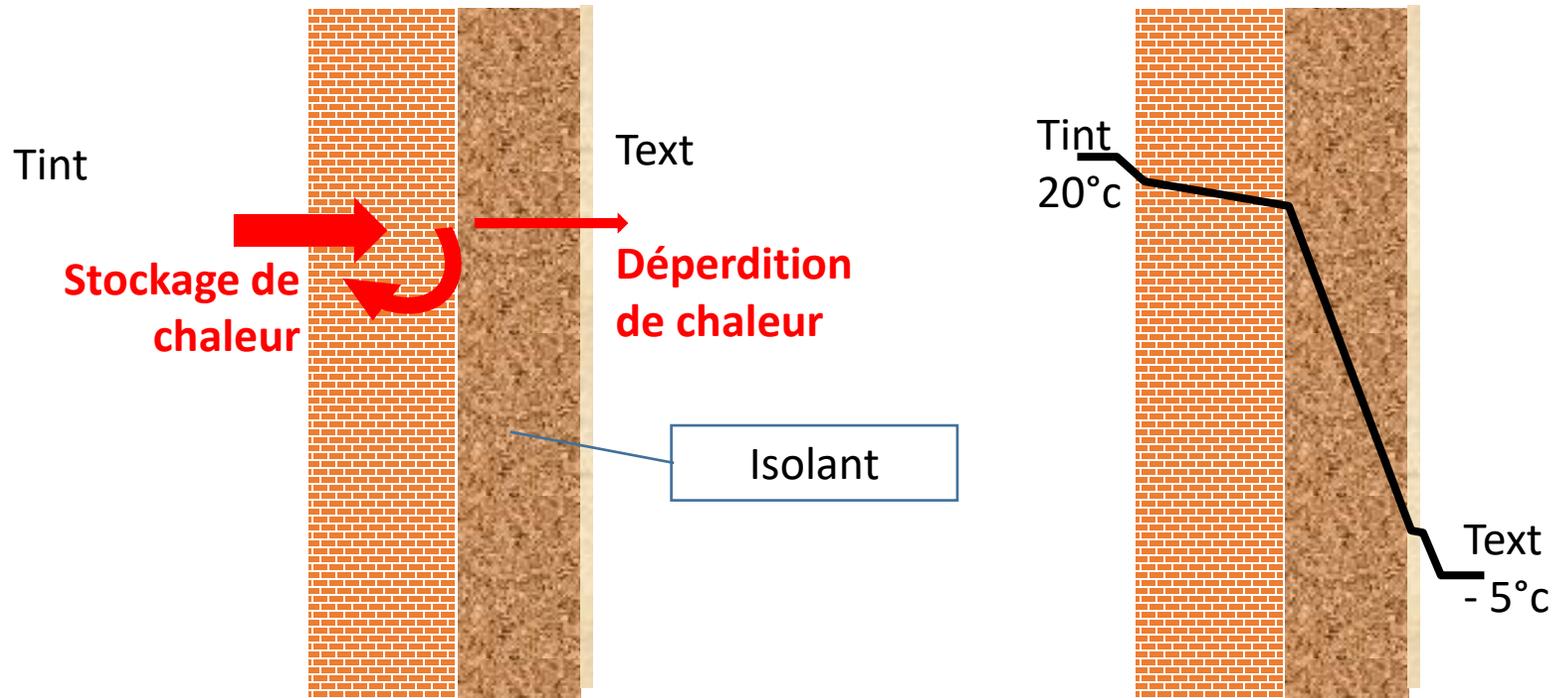
Les gains sur les performances se feront essentiellement maintenant sur :

- Les ponts thermiques
- L'étanchéité à l'air
- Le choix des vitrages

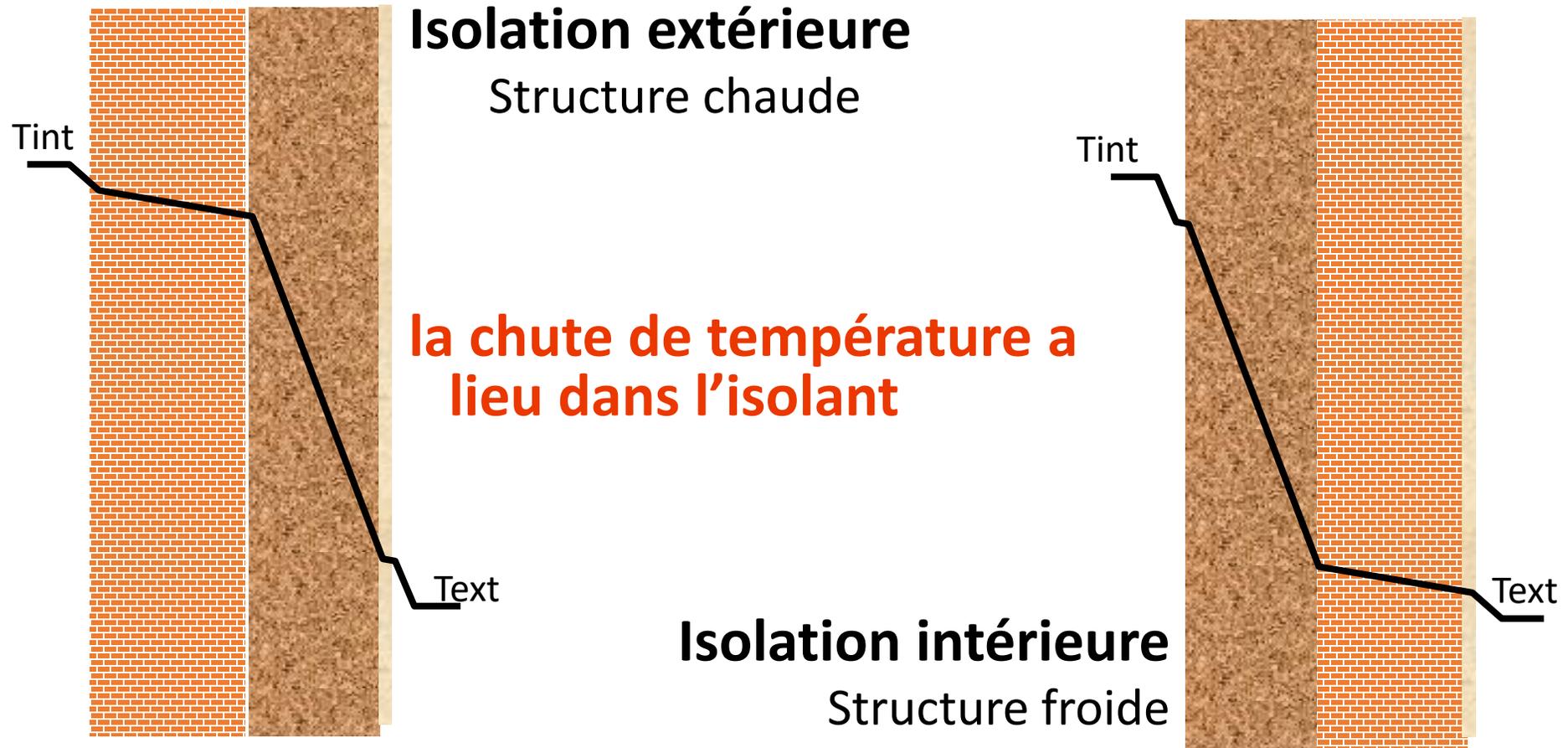
3. Matériaux isolants

Influence de la place de l'isolant

- Une partie de la chaleur est bloquée par l'isolant
- Cette partie du flux de **chaleur se stocke dans la partie interne à l'isolant** et fait monter la température de cette couche. Puis est échangée avec l'ambiance intérieure.

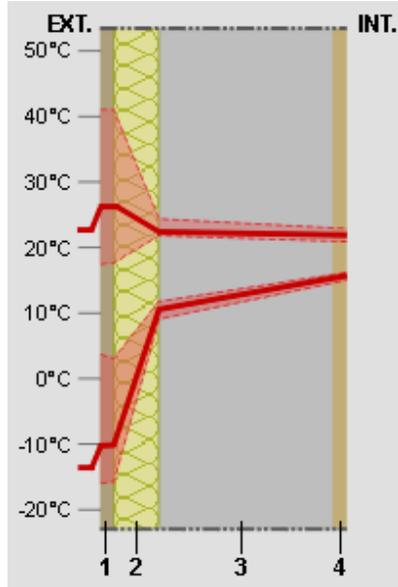


3. Matériaux isolants

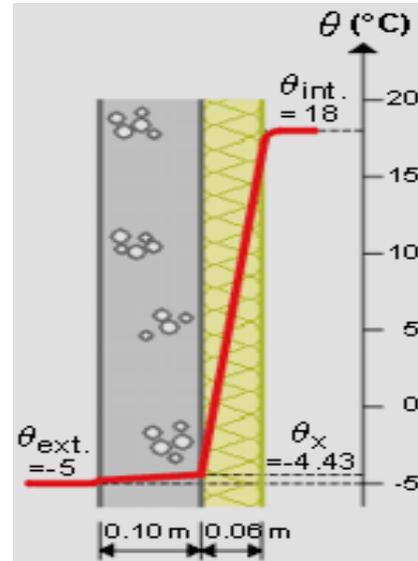


3. Matériaux isolants

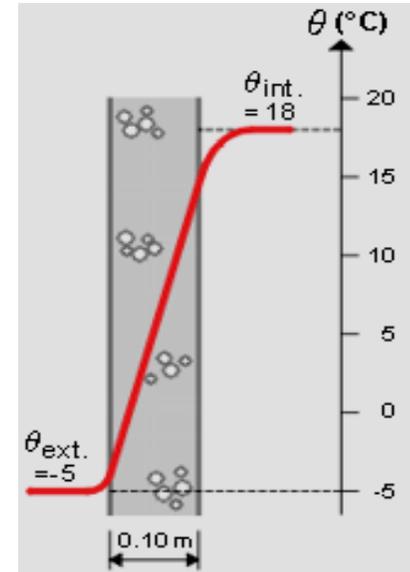
Isolation des façades - Protection des structures



Isolation extérieure
Risque de fissuration de l'enduit



Isolation intérieure
Risque de fissuration de la structure
Attention au gel

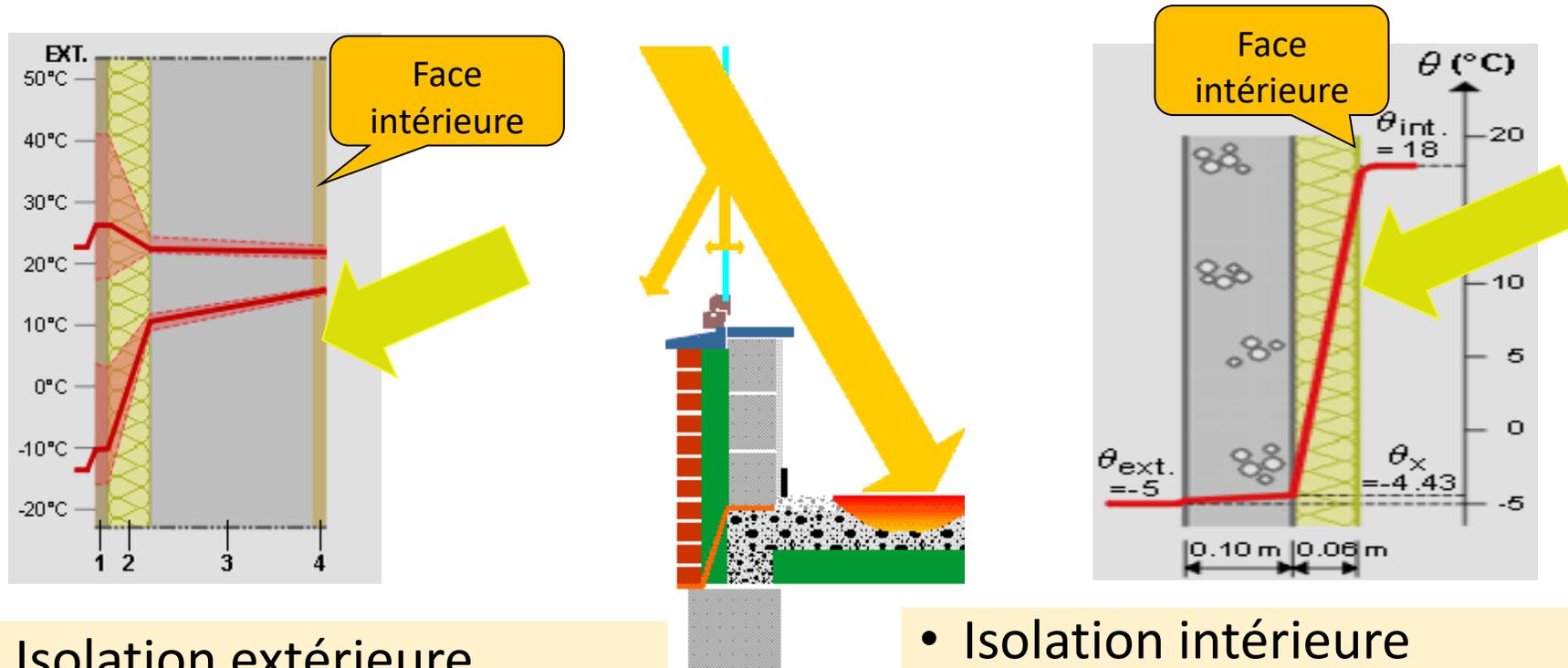


Rénovation
Attention à l'isolation intérieure

3. Matériaux isolants

Isolation des façades Confort et apports gratuits

Il faut stocker les apports solaires entrant par les vitrages



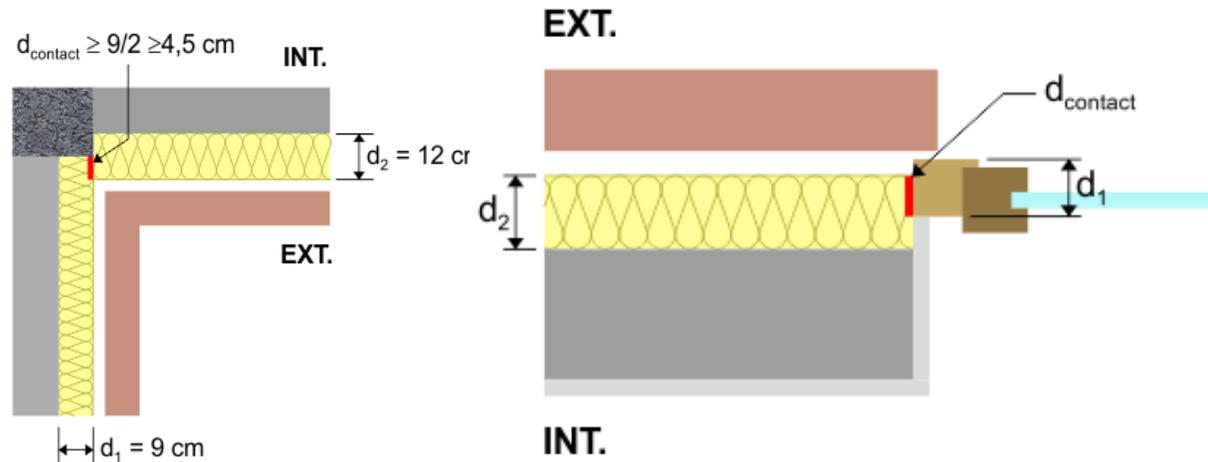
- Isolation extérieure
 - Stockage des apports
 - Mise en température lente

- Isolation intérieure
 - Risque de surchauffes et d'inconfort
 - Mise en température rapide

3. Matériaux isolants

Continuité de l'isolation

- Pour qu'une isolation soit performante, il faut garantir la continuité de l'isolation, notamment aux liaisons entre deux parois et aux liaisons mur/fenêtre

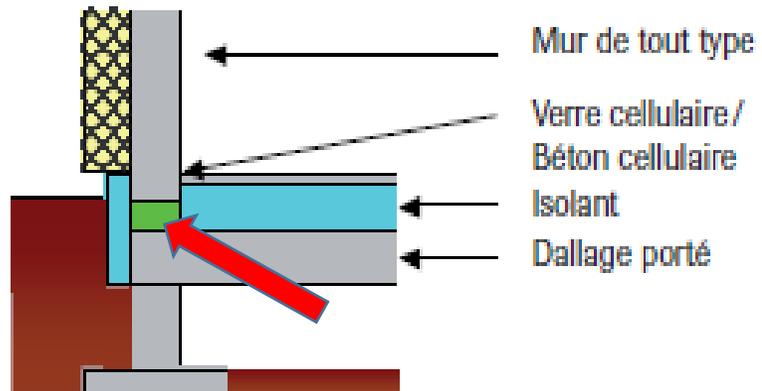


- *L'épaisseur de contact « $d_{contact}$ » doit être au moins égale à la moitié de l'épaisseur de la couche isolante*

3. Matériaux isolants

- Si la continuité de l'isolation ne peut être assurée, il y a création **d'un pont thermique**. Celui-ci peut être minimisé de deux façons:
 - Par **interposition d'un élément isolant**

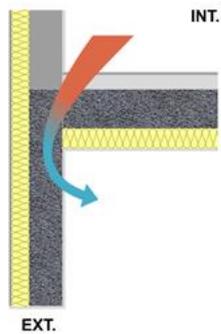
Exemple verre cellulaire pour assurer la coupure thermique mur/
plancher bas



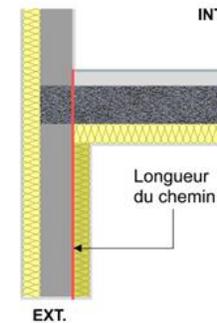
3. Matériaux isolants

➤ Par **prolongation du chemin de moindre résistance**, car la chaleur empreinte toujours le chemin le moins isolé pour s'échapper

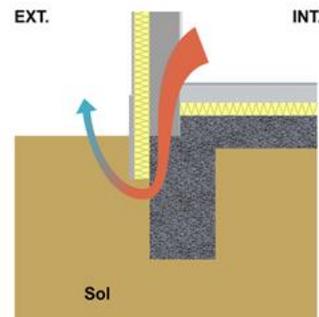
- Plancher sur sous-sol ou vide sanitaire



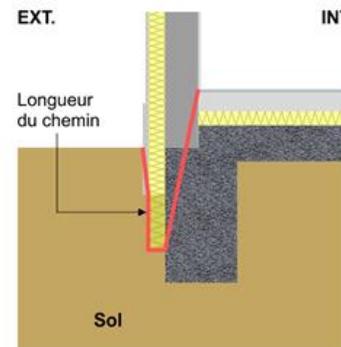
Solution



- Plancher sur terre plein



Solution

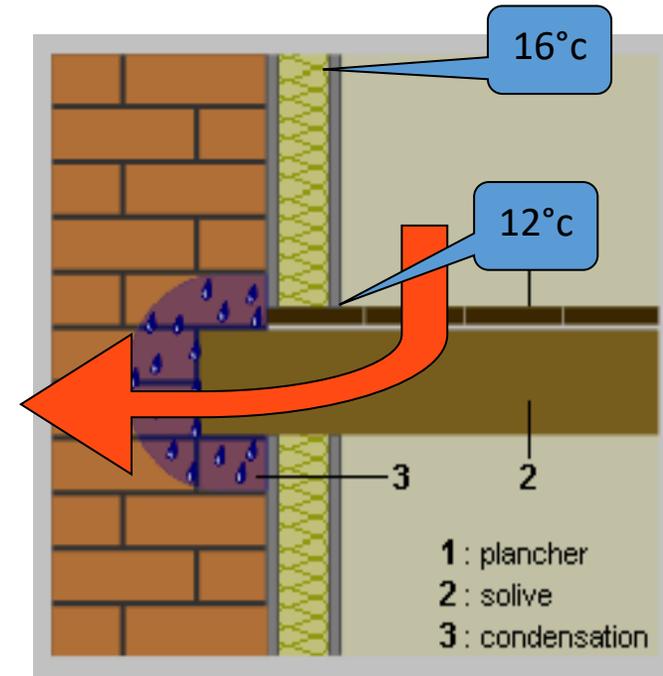


3. Matériaux isolants

Les ponts thermiques

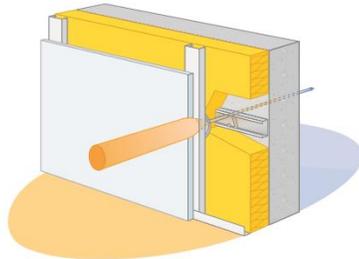
Rupture de la continuité de l'isolation

- Accroissement des pertes de chaleur
- Température de surface plus faible :
Risque de **condensation superficielle**
- Rupture du pare vapeur:
Risque de **condensation interne**

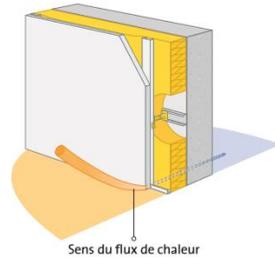


3. Matériaux isolants

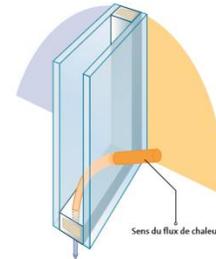
Les différents ponts thermiques



Appui métallique

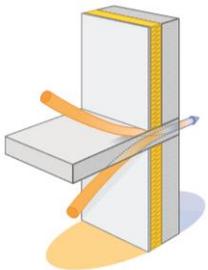


Sens du flux de chaleur
Rail métallique

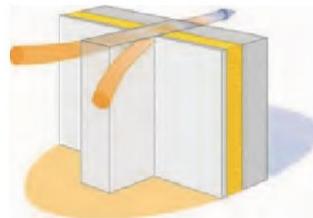


Sens du flux de chaleur
Espaceur de vitrage

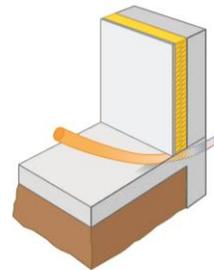
Ponts thermiques intégrés (créés dans la paroi)



Plancher intermédiaire



Mur de refend



Plancher bas

Ponts thermiques des liaisons (interfaces de parois)

ponctuels (noté χ) (exemple : appui métallique dans un doublage sur ossature) ;
linéique (noté ψ) (exemple : fourrure métallique dans un doublage sur ossature).

3. Matériaux isolants

Quelques valeurs

	Isolant	conductivité thermique en W/m.K λ	densité en kg/m ³ ρ	capacité thermique en J/kg.K C_p	résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ	énergie grise en kWh/kg
Matériaux Biosourcés	ouate de cellulose	0,037 - 0,042	30 -70	2000	2	1-2
	fibres de bois denses	0,038 - 0,049	110-240	2000-2100	3-5	1-3
	laines biosourcées	0,032 - 0,047	20-80	1350-1800	1-3	5-10
	béton de chanvre	0,06-0,15	200-800	1350-1800	5-8	1,8
	botte de paille	0,052-0,080	80-120	1550	1-2	0,1
	liège expansé	0,037-0,044	65-180	1600-1900	5-30	2-7

	Isolant	conductivité thermique en W/m.K λ	densité en kg/m ³ ρ	capacité thermique en J/kg.K C_p	résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ	énergie grise en kWh/kg
Matériaux Minéraux	laines minérales nues	0,030-0,045	10-150	800-1000	1-2	7-10
	verre cellulaire panneau	0,041	115	1000	infini	2-5
	verre cellulaire granulat	0,075-0,12	170-250	1000	4	2-5
	perlite-vermiculite-argile expansée	0,05-0,12	90-700	900-1000	3-5	NC
	polystyrène expansé	0,032-0,038	10-30	1200-1400	20-100	30-35
Matériaux Synthétiques	polystyrène extrudé	0,028-0,040	15-30	1000	80-200	30-85
	polyuréthane	0,022-0,028	30-40	1000	80-200	25-35

3. Matériaux isolants

Diffusion de vapeur d'eau

Isolant	conductivité thermique en W/m.K	densité en kg/m³	capacité thermique en J/kg.K	résistance à la diffusion de vapeur d'eau	énergie grise en kWh/kg
	λ	ρ	C_p	μ	

Le principe de la mesure, dite « la coupelle ».

$$\mu = \frac{\pi_a}{\pi}$$

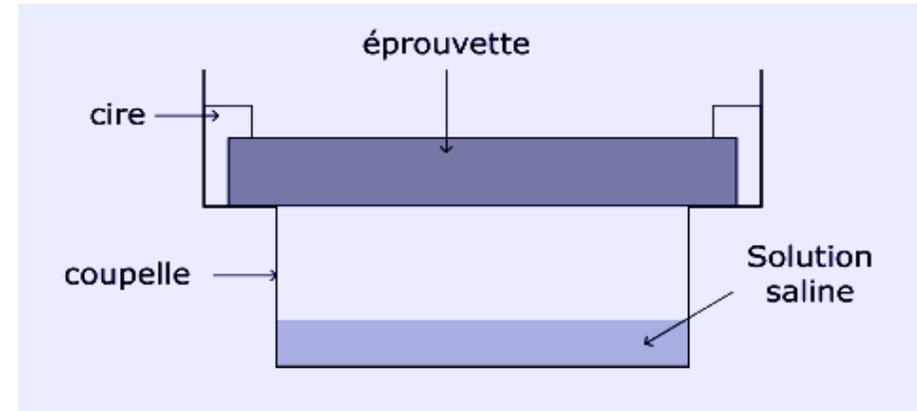
π_a est la perméabilité à l'air ($2 \cdot 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$).

Coefficient Sd (épaisseur d'air équivalente d'une couche de matériau d'épaisseur e) :

$$Sd = e \cdot \mu \text{ (m)}$$

RÈGLES Th-U FASCICULE 2 : MATÉRIAUX

Facteur de résistance (μ) sec et humide



- un dessicatif pour maintenir un état sec (condition d'essai $23^\circ\text{C} - 0\% \text{ HR}$) : **la coupelle sèche**
- une solution aqueuse pour maintenir un état humide (condition d'essai $23^\circ\text{C} - 93\% \text{ HR}$) : **la coupelle humide**

3. Matériaux isolants

Diffusion de vapeur d'eau

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (Cp) en J/(kg. K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.2 - BETONS					
2.21 - BÉTONS DE GRANULATS COURANTS SILICEUX, SILICO-CALCAIRES ET CALCAIRES (granulats conformes aux spécifications de la norme NF P 18-540)					
2.211 - Béton plein	2 300 < ρ ≤ 2 600	2,00	1 000	130	80
	2 000 < ρ ≤ 2 300	1,65	1000	120	70
2.212 - Béton caverneux	1800 < ρ ≤ 2 000	1,35	1 000	100	60
	1600 ≤ ρ ≤ 1 800	1,15	1 000	100	60



Polystyrène

Béton $\mu = 120$
 Béton de chanvre: $\mu = 5-8$
 Béton cellulaire $\mu = 10$
 Laine de verre $\mu=1$
 Polystyrène $\mu = 60$
 Polyuréthane $\mu = 10000$
 Asphalte $\mu = 50000$



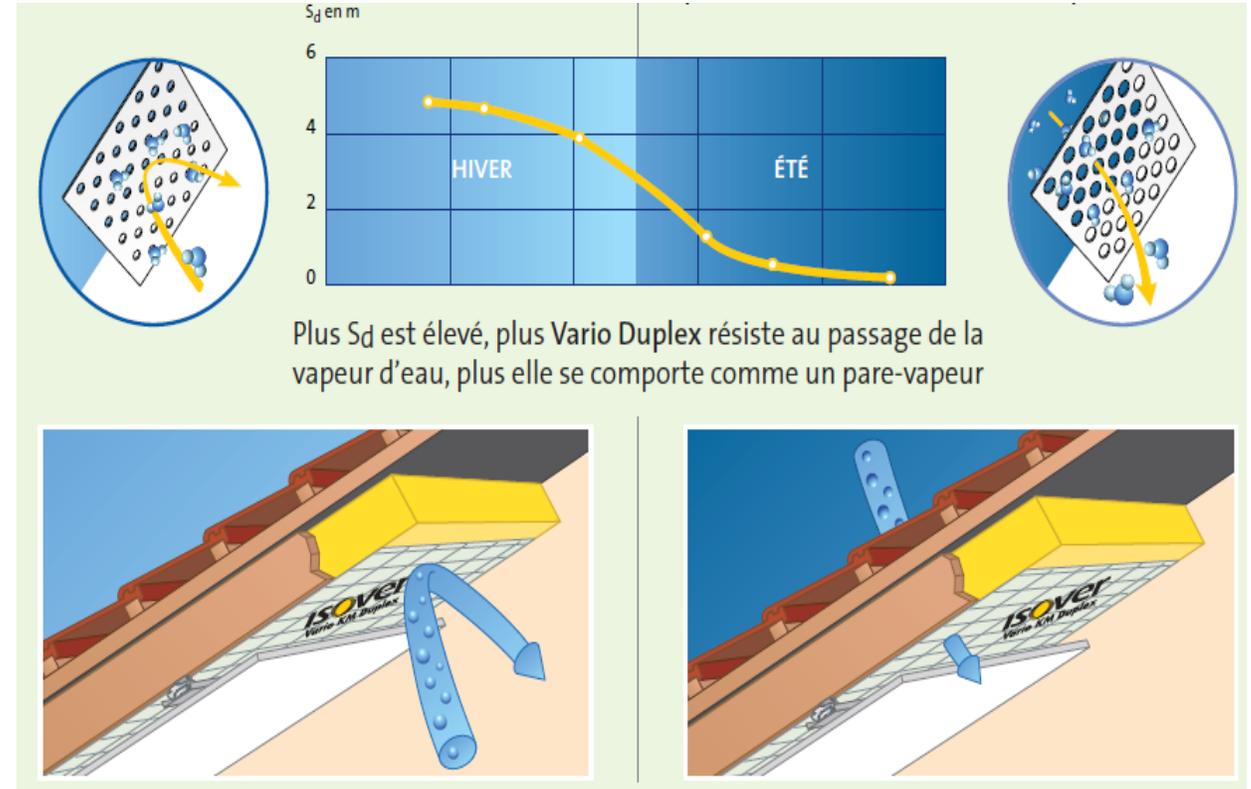
Laine de verre

3. Matériaux isolants

Diffusion de vapeur d'eau

Notion pare-vapeur et frein-vapeur

- Un **Pare-vapeur** a pour fonction d'empêcher les transferts d'humidité
- Un **Frein-vapeur** limite les transferts d'humidité
- Le **Frein vapeur hygroréglable**, S_d varie en fonction de la température et d'humidité
- Un **Pare-pluie** a pour fonction d'empêcher la pluie et donc l'eau de passer. Mais en général il stoppe également la vapeur
- Un **Pare-pluie HPV** (Hautement Perméable à la Vapeur) laissera passer la vapeur
 - Panneaux OSB



Membrane hygro-régulante $S_d=f(RH)$

3. Matériaux isolants

Diffusion de vapeur d'eau

- Ouvert à la diffusion: $0 \text{ m} \leq Sd \leq 2 \text{ m}$
- Frein-vapeur: $2 \text{ m} < Sd \leq 20 \text{ m}$
- Pare-vapeur: $20 \text{ m} < Sd \leq 150 \text{ m}$
- Barrière-vapeur: $150 \text{ m} < Sd \leq 1500 \text{ m}$
- Etanchéité à la vapeur: $1500 \text{ m} < Sd \leq \text{infini}$

La règle des Sd décroissants : mettre les couches les plus étanches à l'intérieur pour éviter l'accumulation d'humidité



3. Matériaux isolants

Projet Emibio



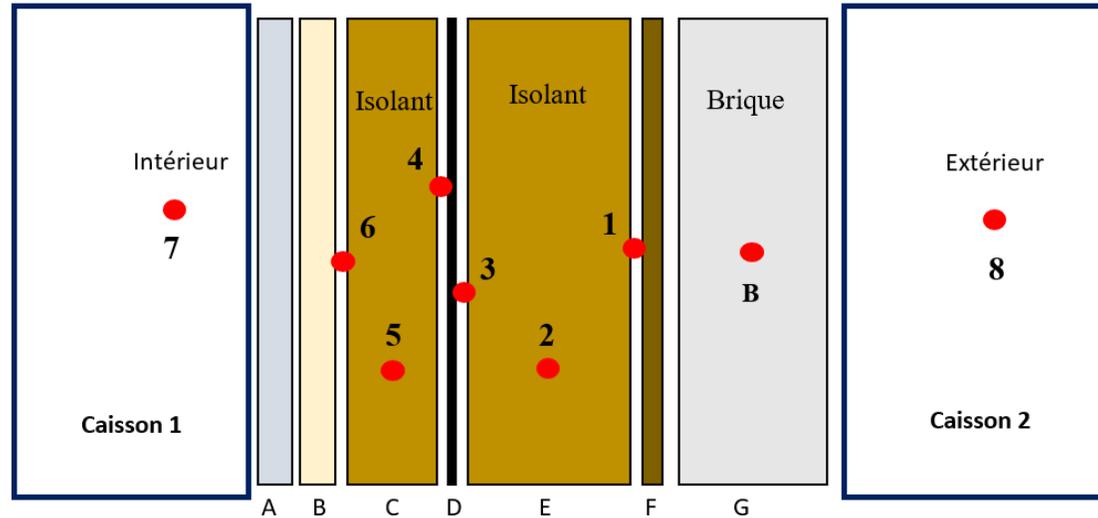
T=23,5 °C
RH=70,8 %

Pv=2049,3 Pa
AH=12,7 g/kg
C=14,97 g/m3

Condition réelle
(valeur moyenne à
partir 20^{ème} jour)

T=14,9 °C
RH=67,4 %

Pv=1141,2 Pa
AH=7 g/kg
C=8,6 g/m3



	<i>Matériaux</i>
A	BA 18 standard
B	BA 18 standard
C	Laine de bois ISONAT FLEX 55 épaisseur 60 mm
D	Pare-vapeur (AEROVAP SD18)
E	Laine de bois ISONAT FLEX 55 épaisseur 120 mm
F	Tasseau épaisseur ≈ 40 mm (évite le contact de l'isolant avec la paroi extérieure)
G	Mur Briques

T=22 °C
RH=70 %

Pv=1850 Pa
AH=11,4 g/kg
C=13,6 g/m3

Condition souhaitée

T=12 °C
RH=65 %

Pv=911 Pa
AH=5,6 g/kg
C=6,9 g/m3