

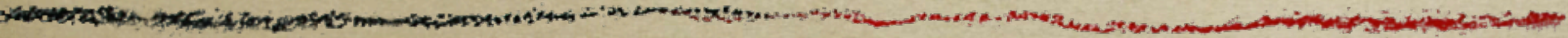
Thermique du Bâtiment (I)

Stéphane Gibout - ENSGTI - 2016

Plan

- *Introduction : Les rôles d'un bâtiment*
- *Notion de confort*
- *Echanges et Bilans*
- *Etudes en régime stationnaire*
- *Réglementation Thermique (RT)*
- *Simulation Thermique Dynamique (STD)*

Introduction



Rôles d'un bâtiment

C'est une «seconde peau» permettant d'assurer le confort des habitants/utilisateurs en découplant le climat intérieur du climat extérieur.

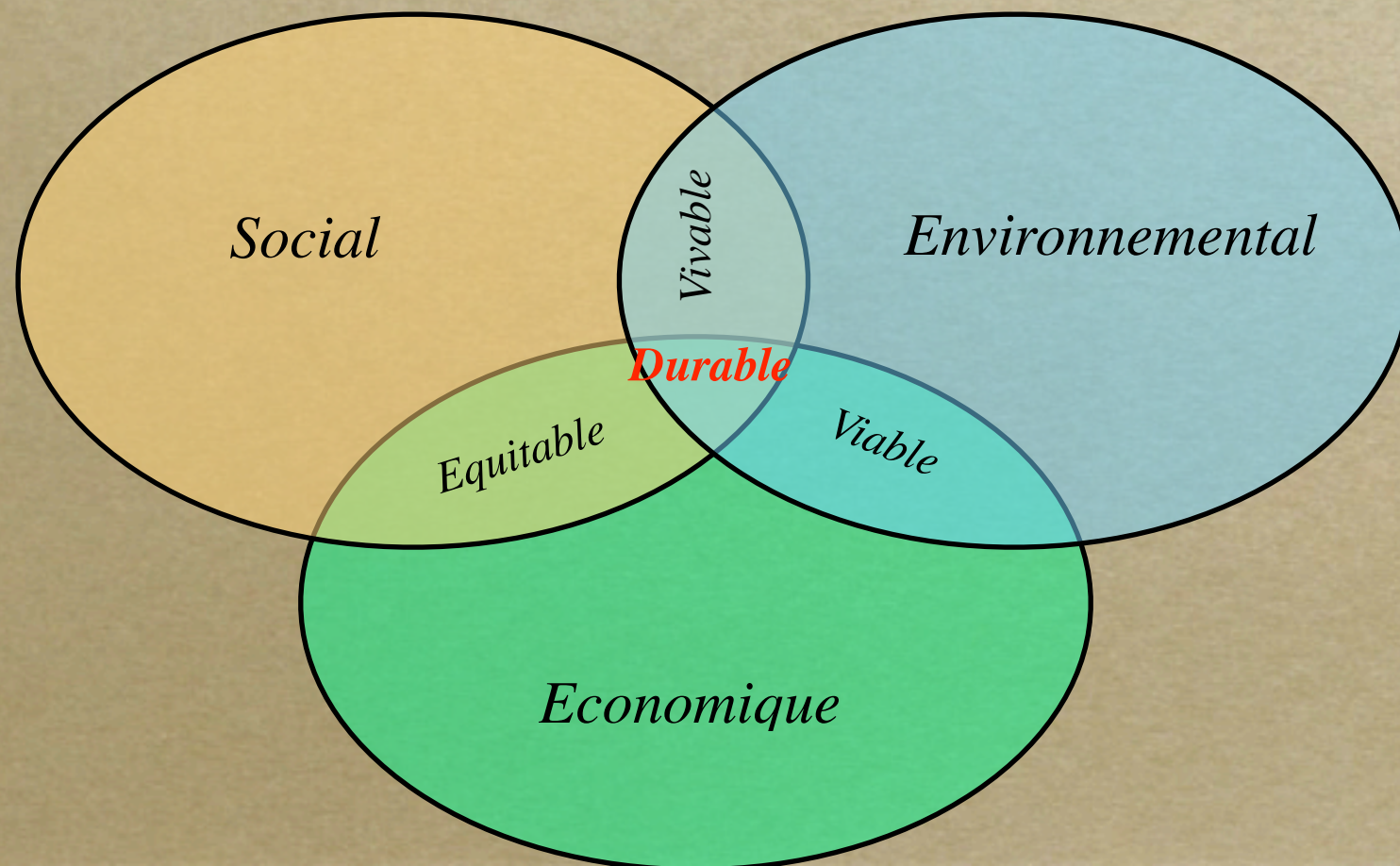
Les influences «subies»

*On retrouve les influences du climat :
(température, vent, météores, rayonnement
solaire, etc...)*

*mais également les effets induits par ses
occupants et ses usages : énergie (chaleur
métabolique, appareillages) mais aussi
vapeur d'eau et autres polluants...*

Donc :

Le bâtiment doit assurer à la fois le confort thermique et la salubrité tout en restant vivable, économe et adapté à son utilisation...



Comment ?

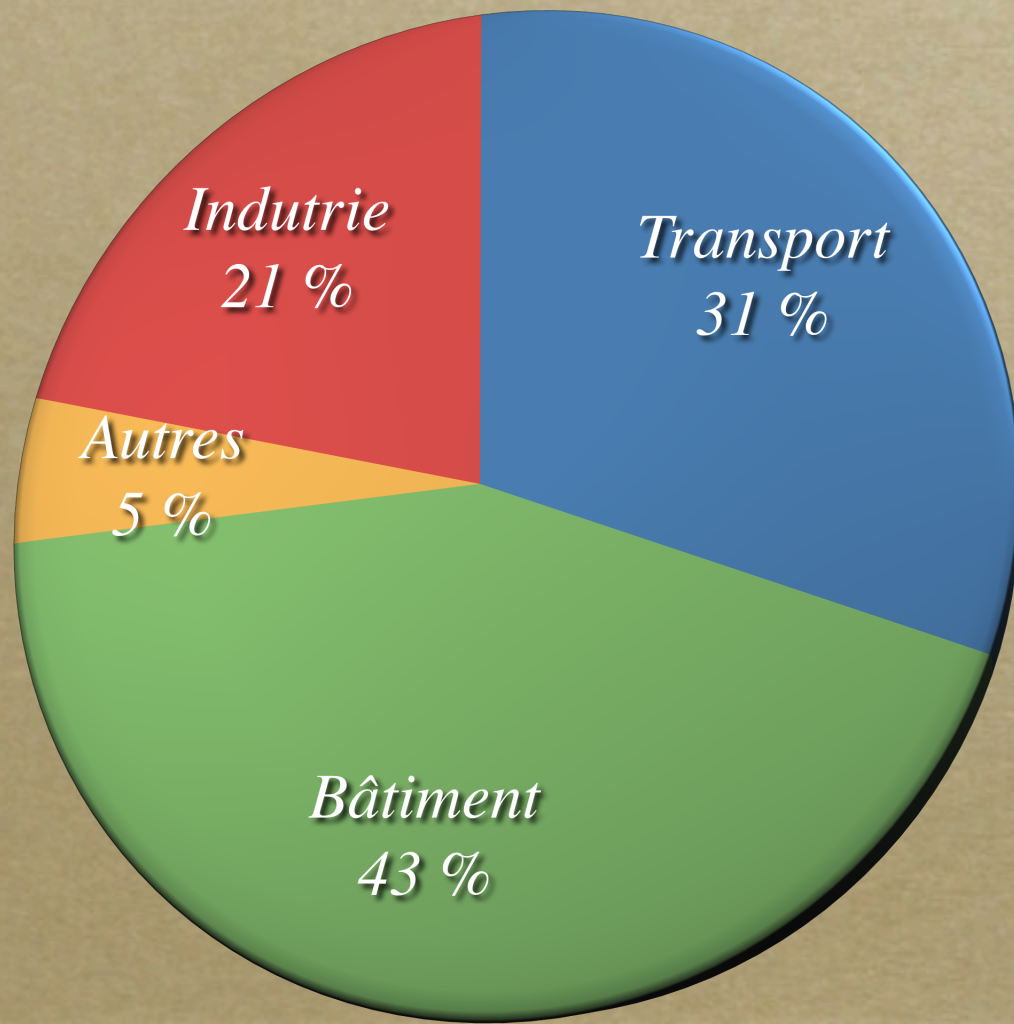
Pour assumer toutes ces contraintes, on peut jouer sur 4 facteurs seulement :

- ➔ l'enveloppe du bâti (transferts de chaleur (3 modes) et de masse (souhaité ou non))*
- ➔ les équipements techniques (production de chaud et de froid, ventilation)*
- ➔ l'inertie propre de la structure*
- ➔ les occupants (habitudes)*

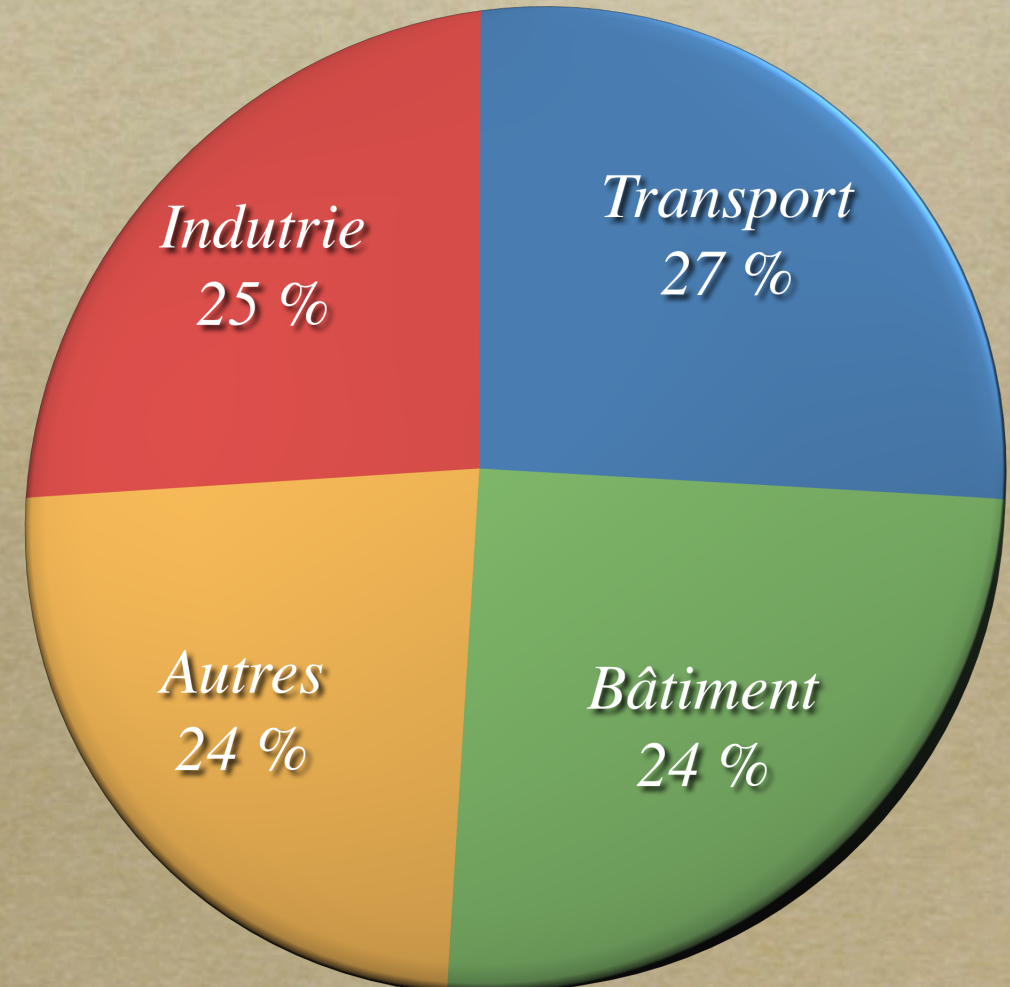
Etat des lieux

Le secteur du bâtiment en France :

Consommation en Energie Primaire



Emission de Gaz à effet de serre



Etat des lieux

- ➔ *1896 : Arrhenius décrit l'effet des combustibles fossiles sur la température terrestre.*
- ➔ *1967 : Première prévision d'un réchauffement planétaire*
- ➔ *1992 : Sommet de la Terre à Rio : 2500 recommandations d'action pour le 21ème siècle...*
- ➔ *1995 : COP1 à Berlin : principe des quotas d'émissions de GES*
- ➔ *1997 : COP3 à Kyoto : objectif de réduction de GES*
- ➔ *2005 : COP11 à Copenhague : objectif commun de limiter le réchauffement à +2°C*
- ➔ *2010 : COP16 à Cancun : Création d'institutions dédiées (par exemple le fond vert pour le climat)*
- ➔ *2014 : COP20 à Lima : 9 milliards pour les fonds vert*
- ➔ *2015 : COP21 à Paris : accord universel sur le +2°C et recueil de promesses de dons pour le fond vert...*

On avance...

Etat des lieux

- ➔ *En France :*
 - ➔ *Plan Climat ➔ Objectif facteur 4 (GES horizon 2050)*
 - ➔ *Loi POPE (Programme d'Orientation de la Politique Energétique) ➔ réduire de 30% la consommation énergétique d'ici à 2030*
 - ➔ *Durcissement des réglementations successives (RT) et adaptation à l'existant*

Etat des lieux

- ➔ *Depuis 2006 ➔ Les fournisseurs d'énergie ont obligation de réaliser (ou de faire réaliser à leurs clients) des économies ➔ Mécanisme des Certificats d'Economie d'Energie (CEE)*
- ➔ *Depuis 2007 ➔ Diagnostic de performance énergétique (DPE) obligatoire pour toute vente ou location d'un logement*

Pour information, toujours en France, on a 31.3 millions de logements anciens (traduction : passoire énergétique) et 875 millions de m² de bureaux...

Etat des lieux

Le Grenelle :

*Approche plus globale du «développement soutenable»
organisé en groupes de travail, dont le #1 :*

1	Lutter contre le changement climatique	2
1.1	Une accélération très volontariste des progrès sur le bâtiment	2
1.2	Un changement drastique de stratégie dans les transports	4
1.3	Un urbanisme plus efficace et plus équitable	8
1.4	Les énergies : réduire les consommations et le contenu en carbone de la production	9
1.5	Donner une nouvelle impulsion à la recherche et élaborer un plan d'adaptation au changement climatique.....	11

➔ *label BBC (bâtiment basse consommation i.e. $\approx 50 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$) pour toute construction neuve dès fin 2012*

➔ *Objectif bâtiment à énergie positive (BEPOS) dès 2020...*

Pourquoi en est-on là ?

Petit regard en arrière :

Au début/milieu du siècle dernier :

- ➡ *exode rurale → explosion de la population urbaine*
- ➡ *énergie bon marché (et symbole de progrès)*
- ➡ *Toutes les «erreurs» de conception pouvaient être compensées par une consommation énergétique...*

Pourquoi en est-on là ?

Petit regard en arrière :

Depuis qu'il est sédentaire, l'Homme ne se déplace plus au gré des saisons et à donc dû s'adapter à son climat (au lieu d'adapter son climat par la migration)

Pourquoi en est-on là ?

Comme l'énergie «facile» et «pas chère» est très récente (et éphémère !), l'Homme à toujours construit de façon à profiter au mieux du climat local

(regarder les igloos et autres yourtes ou tout simplement les anciennes constructions d'une région : orientation par rapport au soleil et aux vents dominants, épaisseur des murs, taille des ouvertures, etc.)

Pourquoi en est-on là ?

Petit regard en arrière :

Au début/milieu du siècle dernier :

➡ *exode rurale ➡ explosion de la population urbaine*

➡ *énergie bon marché (et symbole de progrès)*

➡ *Toutes les «erreurs» de conception pouvaient être compensées par une consommation énergétique...*

et là, c'est le drame !

Concours de Lumière

1^{er} PRIX
Le GAZ



LEGAZ est l'éclairage le moins cher, le plus puissant et propre.
Faites-le poser chez vous sans retard.....



**Le chauffage électrique,
entre nous, il a tellement
d'avantages.**

Trois manières de vivre....

	AUTREFOIS	HIER	AUJOURD'HUI
CUISSINE			
CHAUFFAGE			
LAVAGE			
NETTOYAGE			
ARROSAGE			

....mais, une seule manière de bien vivre
celle d'aujourd'hui
qui utilise pour tout l'**Electricité**

Pour toutes études et renseignements techniques s'adresser à la
SOCIÉTÉ POUR LE DÉVELOPPEMENT DES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ **APEL**
33, rue de Naples à Paris (8^e arr^t)

Et maintenant, que vais je faire ?

Comme pour les énergies renouvelables, on regarde en arrière et on adapte le «savoir des anciens» à nos nouvelles technologies et connaissances :

Le concept bioclimatique

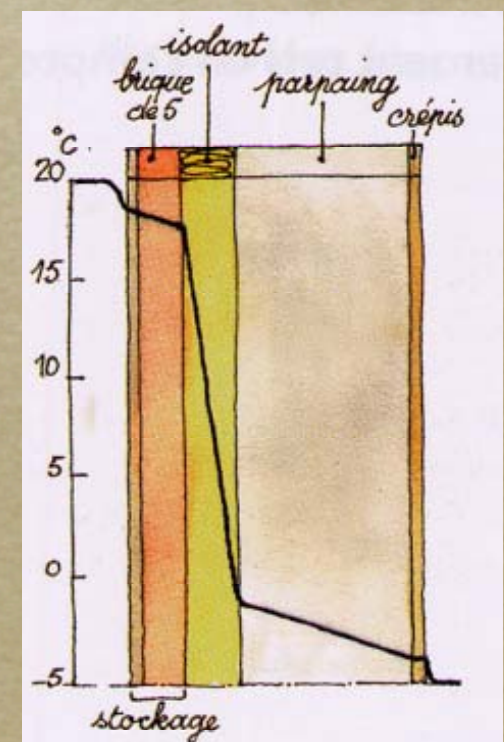
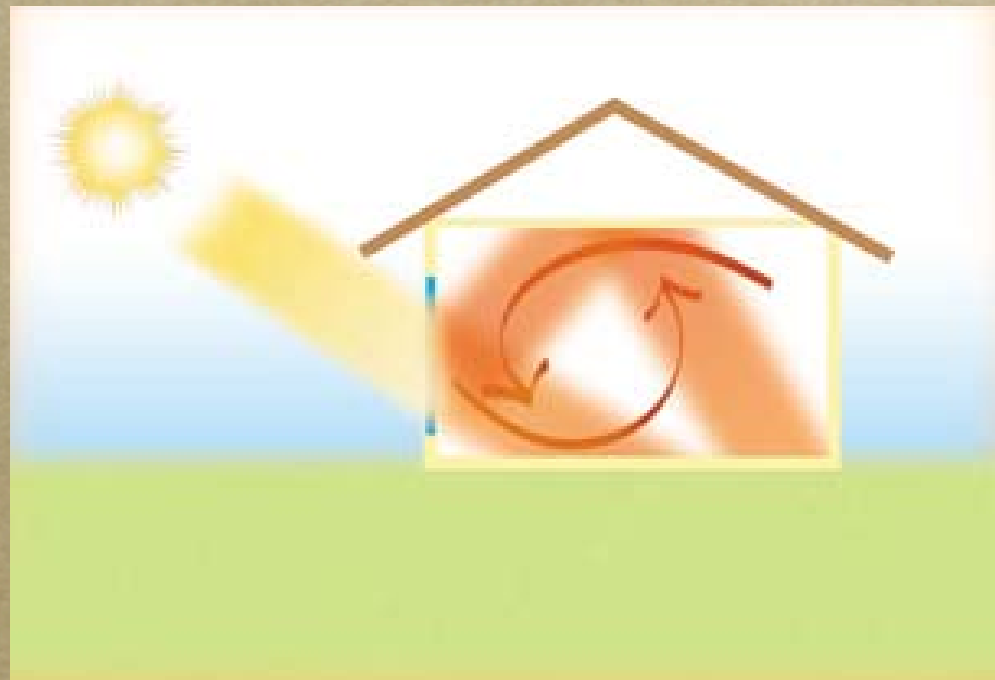
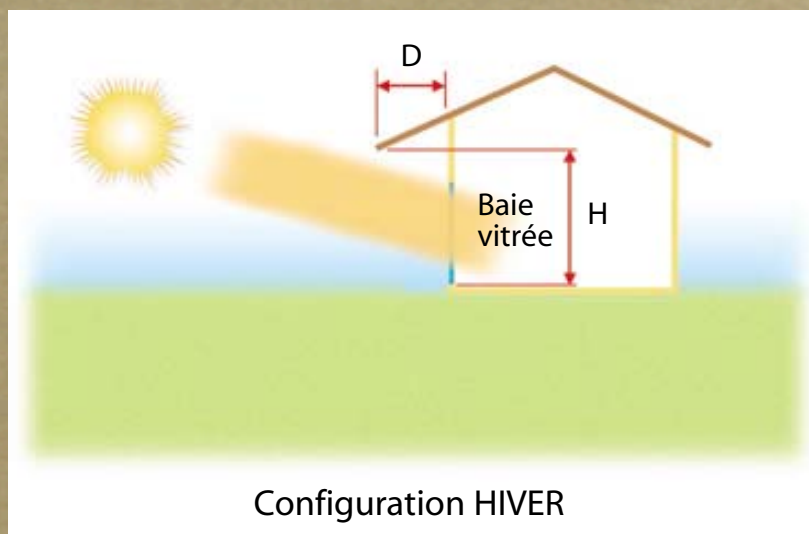
qui veut littéralement dire que l'on doit concevoir des habitations qui «vivent» avec le climat et non contre lui !

Bon sens...

L'approche bioclimatique = faire preuve de bon sens :

(1) Bien concevoir les enveloppes : frontière active

▶ en saison froide : capter le rayonnement solaire, stocker la chaleur, et éviter les déperditions

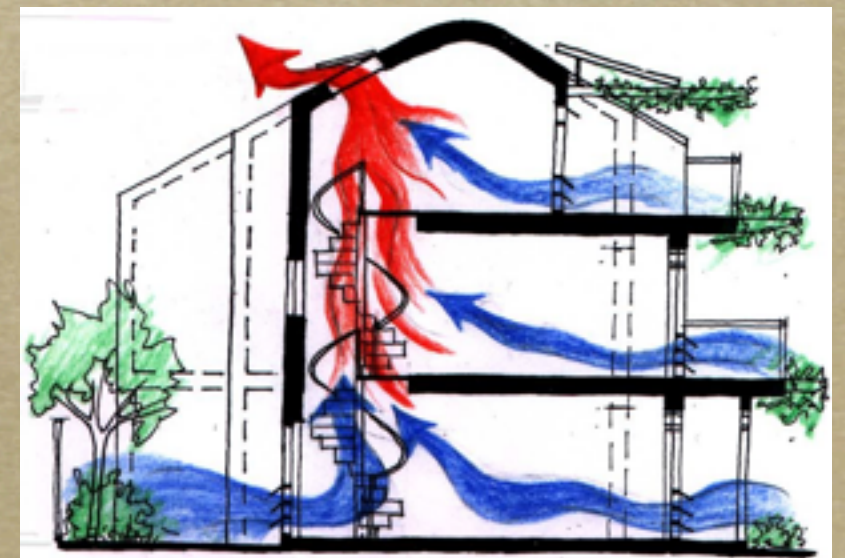
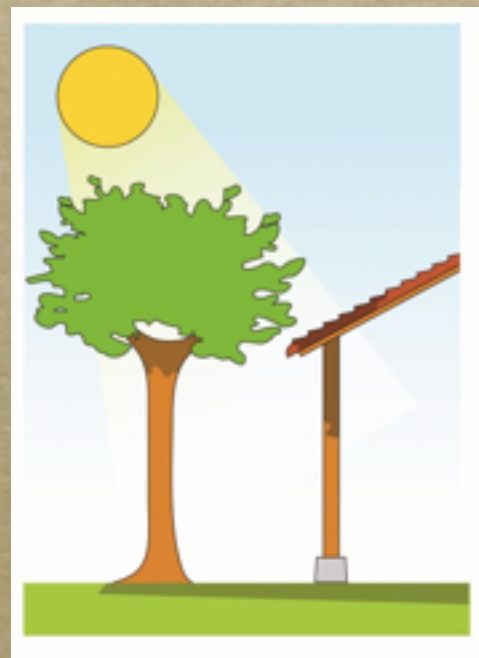
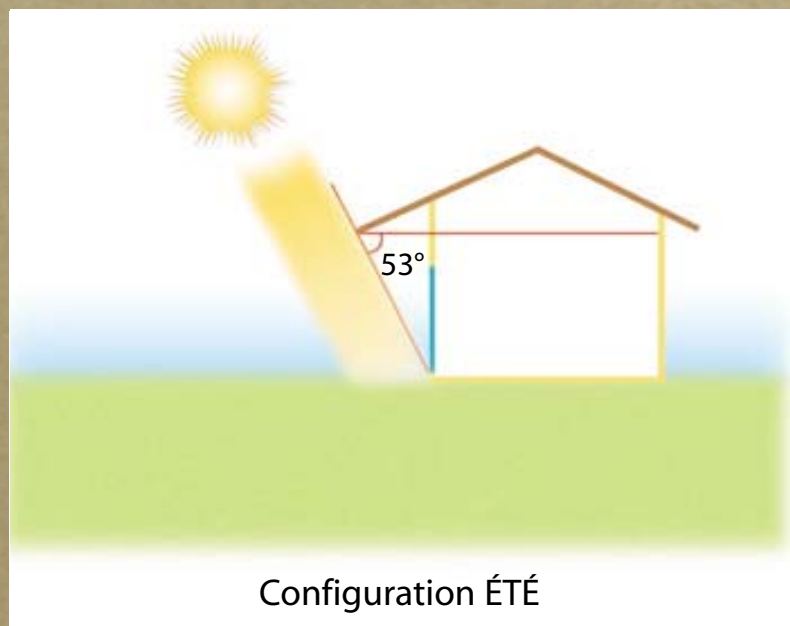


Bon sens...

L'approche bioclimatique = faire preuve de bon sens :

(1) Bien concevoir les enveloppes : frontière active

▶ en saison chaude : se protéger du rayonnement solaire, éviter les gains et d'évacuer l'excès

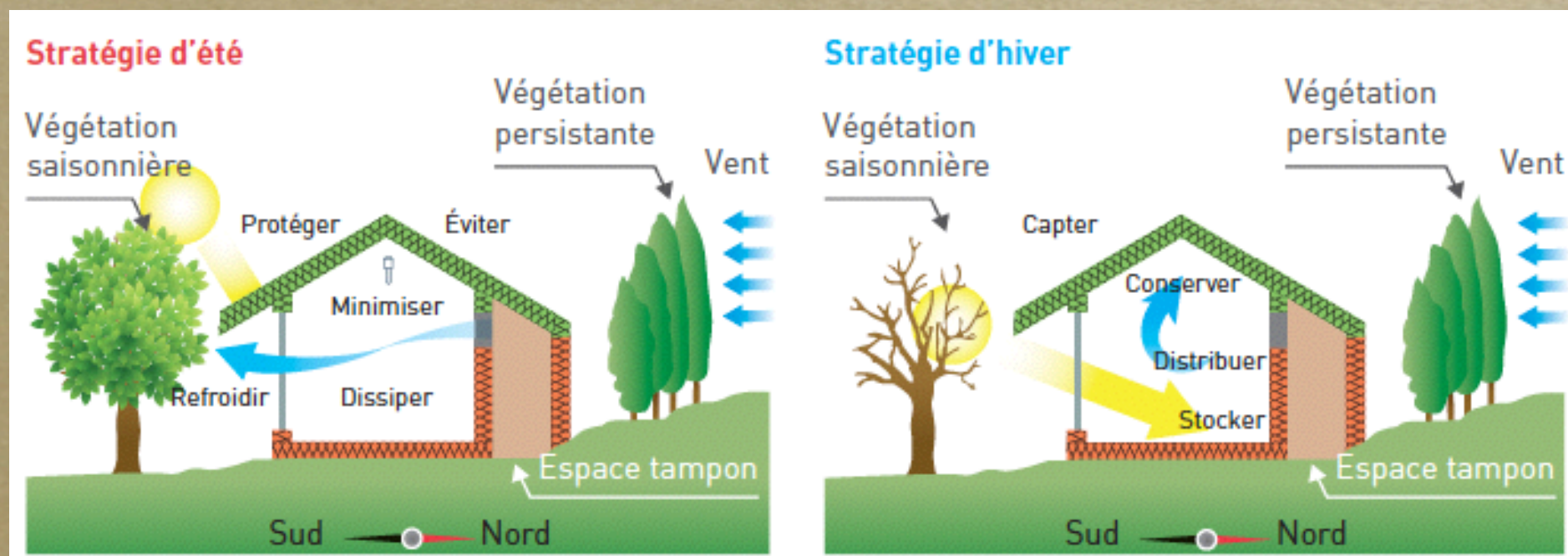


Bon sens...

L'approche bioclimatique = faire preuve de bon sens :

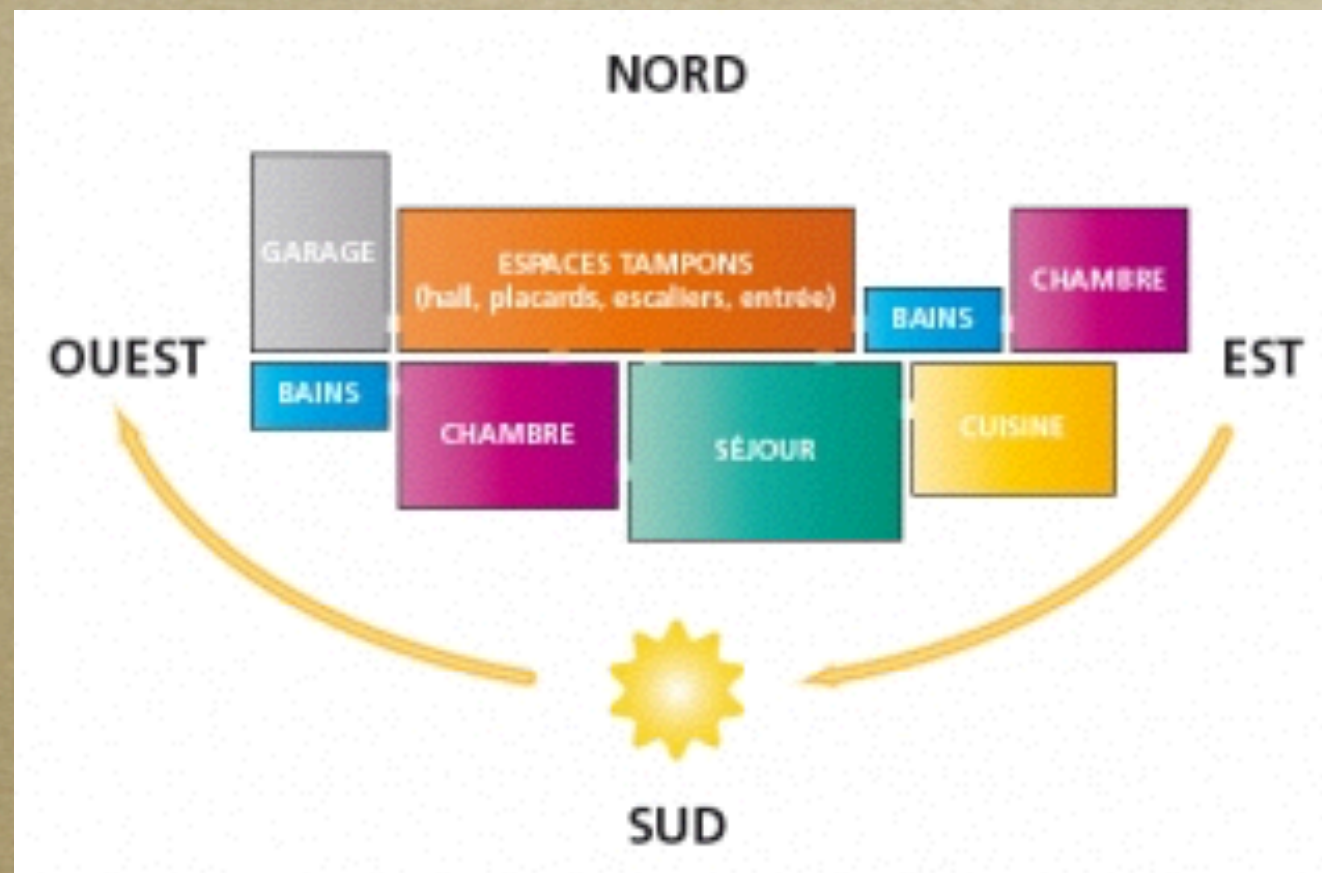
(2) Tenir compte du site

- ▶ *se protéger des vents dominants,*
- ▶ *«jouer» avec la végétations*



Bon sens...

*L'approche bioclimatique = faire preuve de bon sens :
(2) Bien concevoir la forme et l'agencement des pièces*



Notion de confort



Confort thermique

Notion hautement subjective.

Une définition empirique :

*«ni trop chaud, ni trop froid et sans courant
d'air»*

Il va falloir mettre un peu de science là dedans !

Confort thermique

Le corps humain est globalement plongé dans un environnement à une température inférieure à la sienne



Il cède de l'énergie à l'environnement (+ de la vapeur d'eau et d'autres polluants parfois odorants)

Il compense cette perte en «brulant» des aliments (métabolisme basal)

Confort thermique

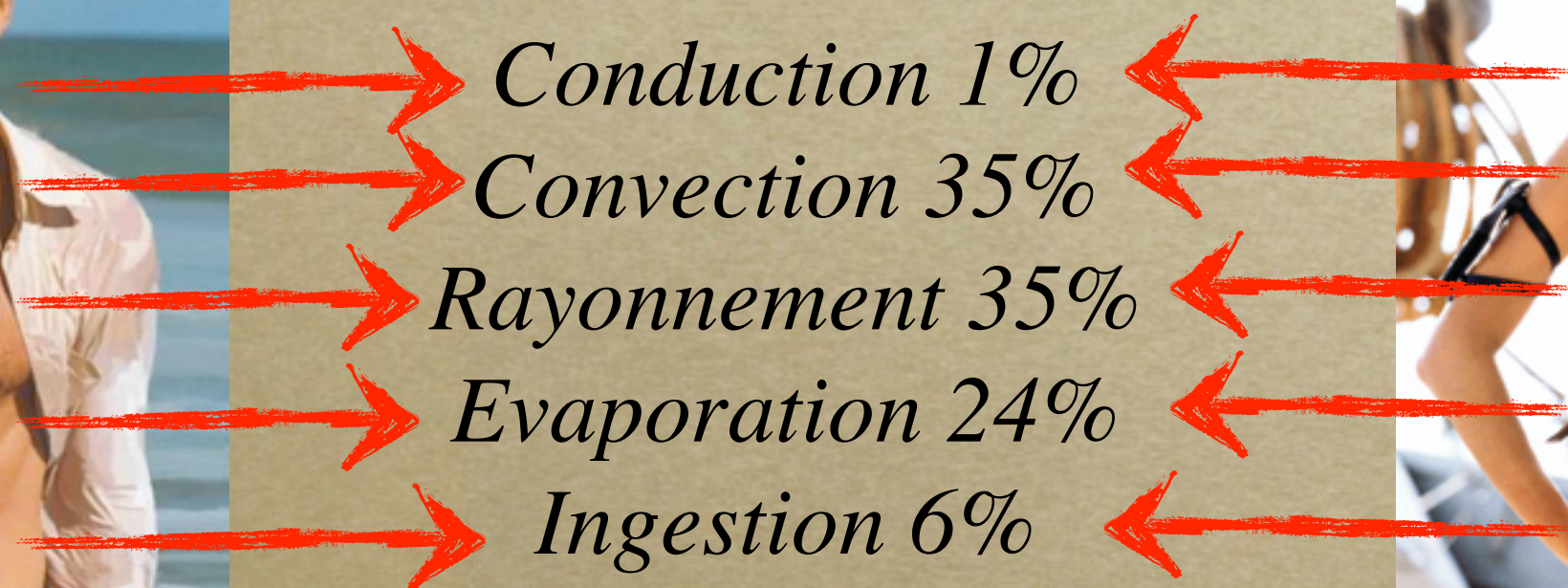
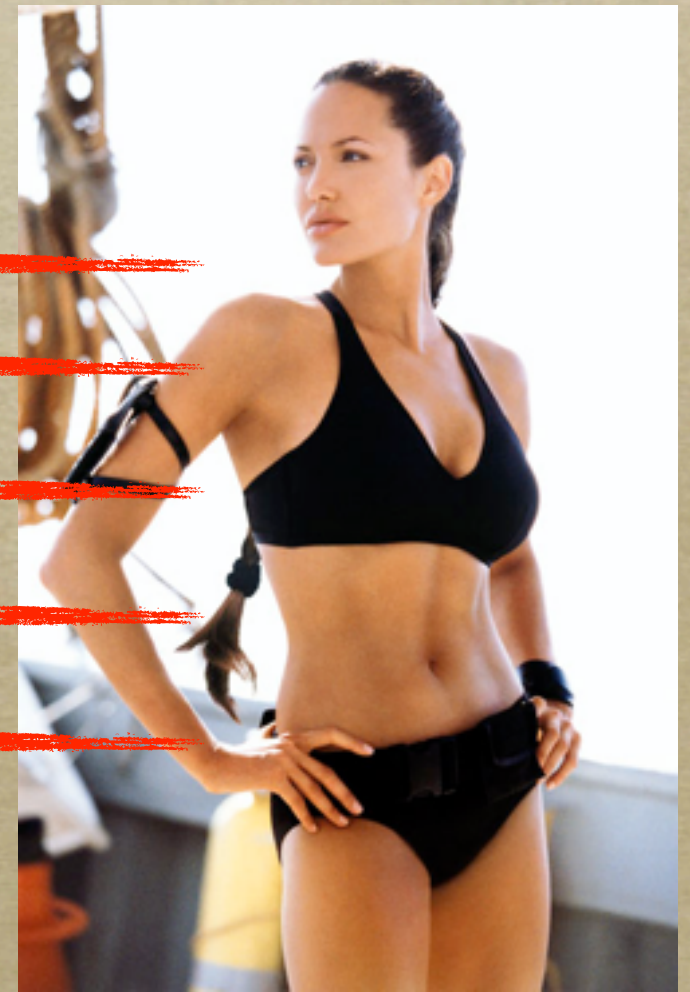
Remarque 1 : un organisme sait beaucoup mieux lutter contre le froid que l'excès de température car il ne dispose pas de système de rafraichissement efficace (sudation seulement

Remarque 2 : l'Homme (comme la plupart des mammifères) est un homéotherme avec une écorce extérieure poikilotherme. La régulation est inconsciente.

Echange Organisme-Ambiance

Corps humain = Système ouvert !

Echanges



Confort thermique

La puissance métabolique δE est convertie en :

- *puissance mécanique utile (je bouge) $\rightarrow \delta W$*
- *puissance dissipée (second principe) $\rightarrow \delta Q_m$*

$$\delta Q_m = \delta E - \delta W = \delta E \times (1 - \delta W / \delta E)$$



rendement mécanique : $r = \delta W / \delta E$

Attention, il s'agit de la chaleur dissipée dans le corps et pas par le corps...

Confort thermique

	$\delta E/A$ (W/m ²)	r (%)
<i>Sommeil</i>	41	0
<i>Repos assis</i>	58	0
<i>Activité mentale</i>	70 à 80	0
<i>Repos debout</i>	70	0
<i>Marche 5km/h</i>	160	0
<i>Travail léger</i>	120	0.0 à 0.1
<i>Travail lourd</i>	250	0.1 à 0.2
<i>Sport</i>	250 à 400	0.0 à 0.1

Surface du corps (formule de Dubois) : $A = 0.203 \times M^{0.425} \times H^{0.725}$

M=masse en kg - H=hauteur en m

«Débit» de CO₂ issu de la respiration : $\delta M_{CO_2} = 1.05 \times 10^{-7}$ kg/s

Vapeur d'eau produite par un individu : 50 g/h

Production globale de vapeur d'eau : 2.5 l/j/pers (en moyenne dans le logement).

Confort thermique

La puissance δQ_p cédée à l'ambiance par le corps se calcul en prenant en compte :

- *la respiration*
- *les échanges convectifs et radiatifs*
- *la perspiration et la sudation.*

Si le bilan global (gain δQ_m moins pertes δQ_p) est trop déséquilibré \rightarrow Inconfort

Confort thermique

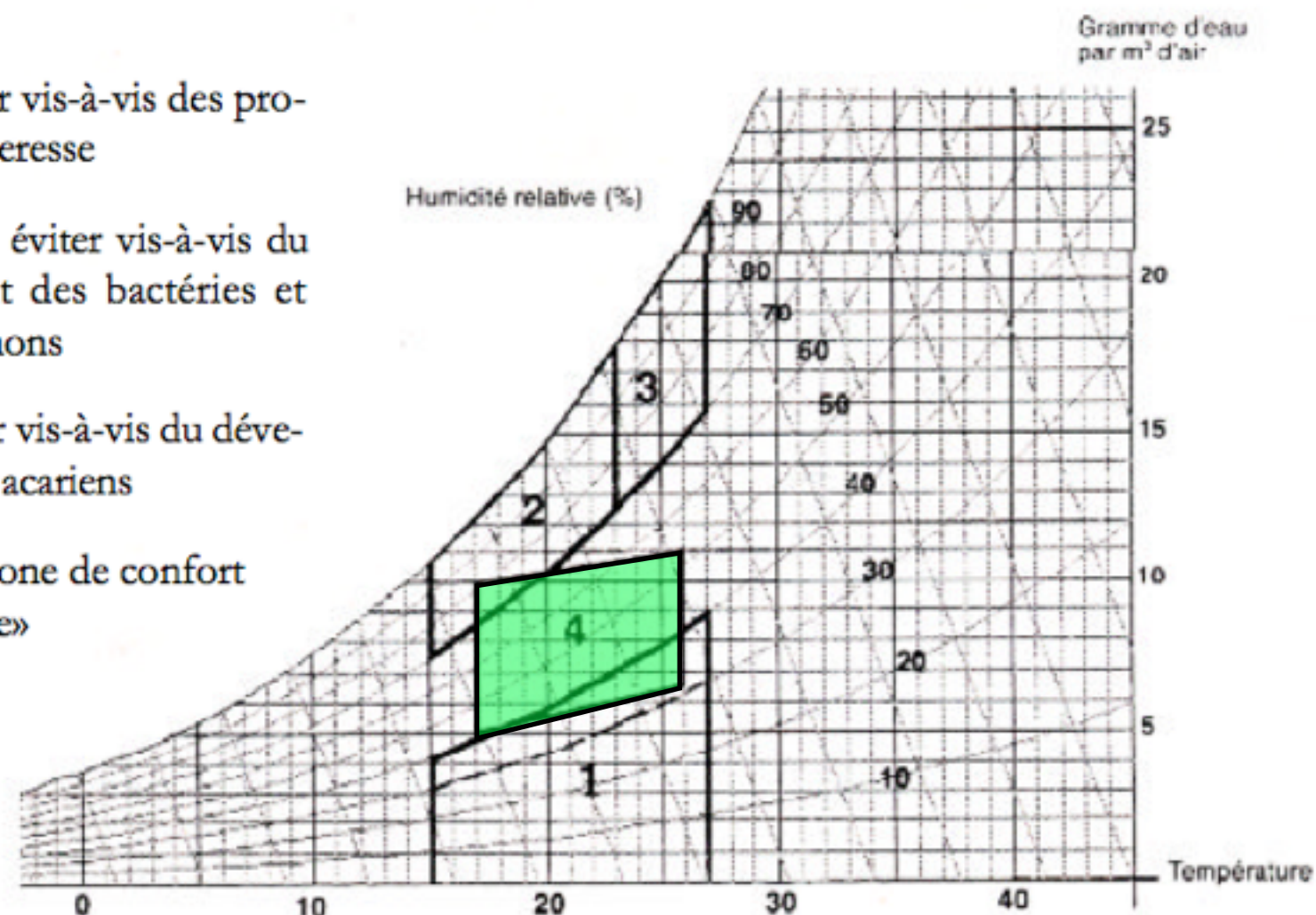
Norme ISO 7720 (2005) : «Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local»

zone 1 : à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse

zone 2 et 3 : à éviter vis-à-vis du développement des bactéries et microchampignons

zone 3 : à éviter vis-à-vis du développement des acariens

zone 4 : «polygone de confort hygrothermique»



Exemple de zone de confort (établie par le COSTIC)

Confort thermique

Dans le diagramme précédent, de quelle température s'agit-il ?

En fait, il n'existe pas une mais des températures, qui résultent des équilibres (convectifs et radiatifs principalement) avec le milieu environnant :

▶ *Température de l'air : T_a*

▶ *Température résultante des parois) : $T_r = \frac{\sum_i T_{p,i} \cdot S_i}{\sum_i S_i}$*

$T_{p,i}$: Température de surface de la paroi i

Confort thermique

En première approximation, la température ressentie est la température «apparente»:

$$T_{app} \approx \frac{T_r + T_a}{2}$$

Exemple, avec une ambiance à 20°C et des parois

- à 18°C ➡ 19°C ressentie → Confort 😊
- à 14°C ➡ 17°C ressentie → Froid

Confort thermique

Pour un individu au repos, la température est «confortable» si :

- *En hiver : $T_{\text{ressentie}} \approx 20^{\circ}\text{C}$*
- *En été :*
 - *$T_{\text{ressentie}} \approx 25^{\circ}\text{C}$ si $T_{\text{ext}} < 30^{\circ}\text{C}$*
 - *$T_{\text{ressentie}} \approx (T_{\text{ext}} - 5^{\circ}\text{C})$ si $T_{\text{ext}} > 30^{\circ}\text{C}$*

Confort thermique

Pour un individu au repos, la température est «confortable» si :

- *En hiver : $T_{app} \approx 20^{\circ}\text{C}$*
- *En été :*
 - *$T_{app} \approx 25^{\circ}\text{C}$ si $T_{ext} < 30^{\circ}\text{C}$*
 - *$T_{app} \approx (T_{ext} - 5^{\circ}\text{C})$ si $T_{ext} > 30^{\circ}\text{C}$*

Mais dépend aussi de l'humidité et de la vitesse du vent...

Confort thermique

Il existe également d'autres règles pour assurer le «confort» :

- La différence de température entre l'ambiance et une paroi ne doit pas dépasser 8°C pour une surface vitrée et 5°C pour une paroi opaque*
- La température du sol doit être maintenue au moins à 17°C*
- Pour les parois chauffantes, il ne faut pas dépasser 24°C pour les planchers et 27°C pour les autres parois.*
- Le gradient thermique vertical ne doit pas dépasser $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$*
- La vitesse de l'air ne doit pas dépasser 0.3 à 0.5 m/s*

Confort thermique

En première approximation, la température ressentie est la moyenne entre la température de l'ambiance et celle des parois...

Exemple, avec une ambiance à 20°C et des parois

• à 18°C ➡ 19°C ressentie → Confort 😊

• à 14°C ➡ 17°C ressentie → Froid 😞

Confort Thermique (2)

Confort Thermique 2

Dans cette courte partie, nous allons établir le bilan énergétique d'un «corps»

Nous avons déjà vu que le corps doit dissiper une puissance δQ_m

La question est maintenant ce qu'il dissipe réellement  δQ

Confort Thermique 2

Respiration : $\delta Q_R = \dot{m}_R \cdot (h_{air,exp} - h_{air,insp})$

Débit d'air inspiré/expiré qui est fonction du débit CO₂ (1.05×10^{-7} kg/s) et de la concentration en CO₂ de l'air expiré

$$\dot{m}_R = \dot{m}_{CO_2} \cdot \frac{M_{air}}{x_{CO_2} \cdot M_{CO_2}}$$

$$x_{CO_2} \approx 0.05$$

Enthalpie de l'air humide : inspiré aux conditions de l'air ambiant, expiré à environ 34°C et légèrement saturé ($T_{sat}=35.8^\circ\text{C}$)

Confort Thermique 2

Transpiration :

Deux mécanismes :

- ▶ *perspiration = diffusion de la vapeur d'eau au travers de la peau*
- ▶ *sudation = lié à la thermorégulation*

Confort Thermique 2

Perspiration : $\delta Q_p = \dot{m}_{w, persp} \cdot h_{vap, skin}$

*Débit de vapeur d'eau
proportionnel à l'écart des
pressions partielles (conditions de
l'ambiance d'un côté et conditions
«intradermiques» de l'autre)*

*Enthalpie de l'eau vapeur à la
température de la peau (qui
dépend de l'activité)*

$$\dot{m}_{w, persp} = A_{skin} \cdot K_D \cdot (P_{sat, skin} - P_{sat, amb})$$

$$A_{skin} = 0.203 \cdot M^{0.425} \cdot H^{0.725}$$

$$K_D = 1.3 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$T_{skin} = 35.7 - 0.028 \cdot \frac{\delta Q_m}{A_{skin}}$$

Confort Thermique 2

Transpiration : *On suppose que toute l'eau s'évapore instantanément...*

$$\delta Q_t = A_{skin} \cdot \max \left[0; 0.42 \cdot \left(\frac{\delta Q_m}{A_{skin}} - 58 \right) \right]$$

Mais on a deux limites :

1) *lorsque la peau est entièrement mouillée*

$$\delta Q_t^{max} = A_{skin} \cdot h_m \cdot (p_{sat,skin} - p_{sat,amb}) \cdot h_{vap,skin}$$

2) *limite physiologique, on ne peut pas transpirer plus d'un litre par heure (environ)*

$$h_m = 7.2 \times 10^{-9} \cdot h_c$$

Confort Thermique 2

Flux au travers de la vêtture :

$$\delta Q_{vet} = \frac{A_{skin}}{R_{vet}} \cdot (T_{skin} - T_{vet})$$

Résistance thermique de la vêtture
souvent exprimé en Clo :

$$1\text{Clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{vet} = 0.155 \cdot I_{cl}$$

Température moyenne de surface
des vêtements (tenant compte des
parties non couvertes)

Proche mais pas identique à la
température de l'ambiance...
on va la calculer...

Type	I_{vet} (en Clo)
Tropicale	0.3 à 0.4
Été	0.5
Légère (intérieur)	0.7
Normale (intérieur hiver)	1.0
Hiver	1.5
Polaire	3 à 4

Confort Thermique 2

Flux radiatif :

$$\delta Q_{rad} = A_{cl} \cdot \epsilon \sigma \cdot F \left[(T_{vet} + 273)^4 - (T_w + 273)^4 \right]$$

Aire de la vêtue

$$A_{cl} = A_{skin} \cdot (1.05 + 0.1 \cdot I_{cl})$$

*Emissivité moyenne de la
peau et de la vêtue*

$$\epsilon \approx 0.95$$

*Facteur de réduction d'aire
(concavités du corps)*

$$F \approx 0.71$$

*Température moyenne de
rayonnement de l'ambiance
(approximativement la
moyenne pondérée par les
facteurs de forme des
températures des parois
visibles)*

Confort Thermique 2

Flux radiatif : Linéarisation...

$$\delta Q_{rad} = A_{cl} \cdot F \cdot h_r (T_{vet} - T_{amb})$$

$$h_r \approx 5.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

C'est plus simple non ?!

Confort Thermique 2

Flux convectif :

$$\delta Q_{conv} = A_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{vet} - T_{amb})$$



*Coefficient d'échange convectif
(maximum entre naturelle et forcée)*

$$h_c = \max \left[\underbrace{2.5 \sqrt[4]{|T_{vet} - T_{amb}|}}_{\text{naturelle}} ; \underbrace{12.1 \sqrt{U}}_{\text{forcée}} \right]$$

U : vitesse moyenne de l'air [m/s]

Confort Thermique 2

Donc :

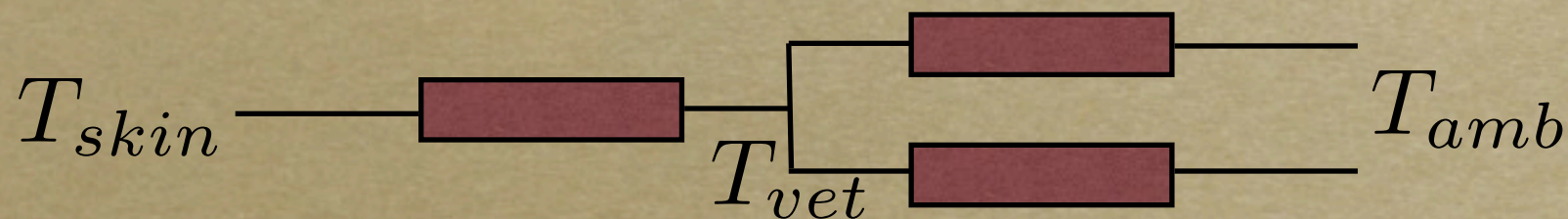
$$\delta Q_{vet} = \frac{A_{skin}}{R_{vet}} \cdot (T_{skin} - T_{vet})$$

$$\delta Q_{vet} = \frac{T_{skin} - T_{amb}}{R_{eq}}$$

$$\delta Q_{conv} = A_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{vet} - T_{amb})$$

$$\delta Q_{rad} = A_{cl} \cdot F \cdot h_r (T_{vet} - T_{amb})$$

$$R_{eq} = R_{vet'} + \left[\frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{rad}} \right]^{-1}$$



Confort Thermique 2

Bilan :

Ce que le corps peut dissiper :

$$\delta Q = \delta Q_R + \delta Q_p + \delta Q_t + \delta Q_{vet}$$

Ce que le corps doit dissiper :

$$\delta Q_m$$

La différence :

$$\delta L = \delta Q_m - \delta Q$$

Confort Thermique 2

Quantification du confort :

Vote «discret» : $V =$

+3	«très chaud»
+2	«chaud»
+1	«légèrement chaud»
0	«confortable»
-1	«légèrement froid»
-2	«froid»
-3	«très froid»

Si $|V| < 2$  confort sinon inconfort !

Confort Thermique 2

Quantification du confort :

«Vote moyen prédictif» (*Predicted mean vote PMV*)

$$PMV = C \cdot \frac{\delta L}{A_{skin}}$$

$$C = 0.303 \cdot \exp \left[-0.037 \cdot \frac{\delta Q_m}{A_{skin}} \right] + 0.0275$$

C : coefficient de «susceptibilité» de l'individu.

Confort Thermique 2

Proportion de sujets «inconfortables»

Pourcentage probable de sujet en situation d'inconfort
(*PPD* : Predicted Percentage of Dissatisfied) :

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)$$

directement en %

et c'est tout pour le confort...

Confort Thermique 2

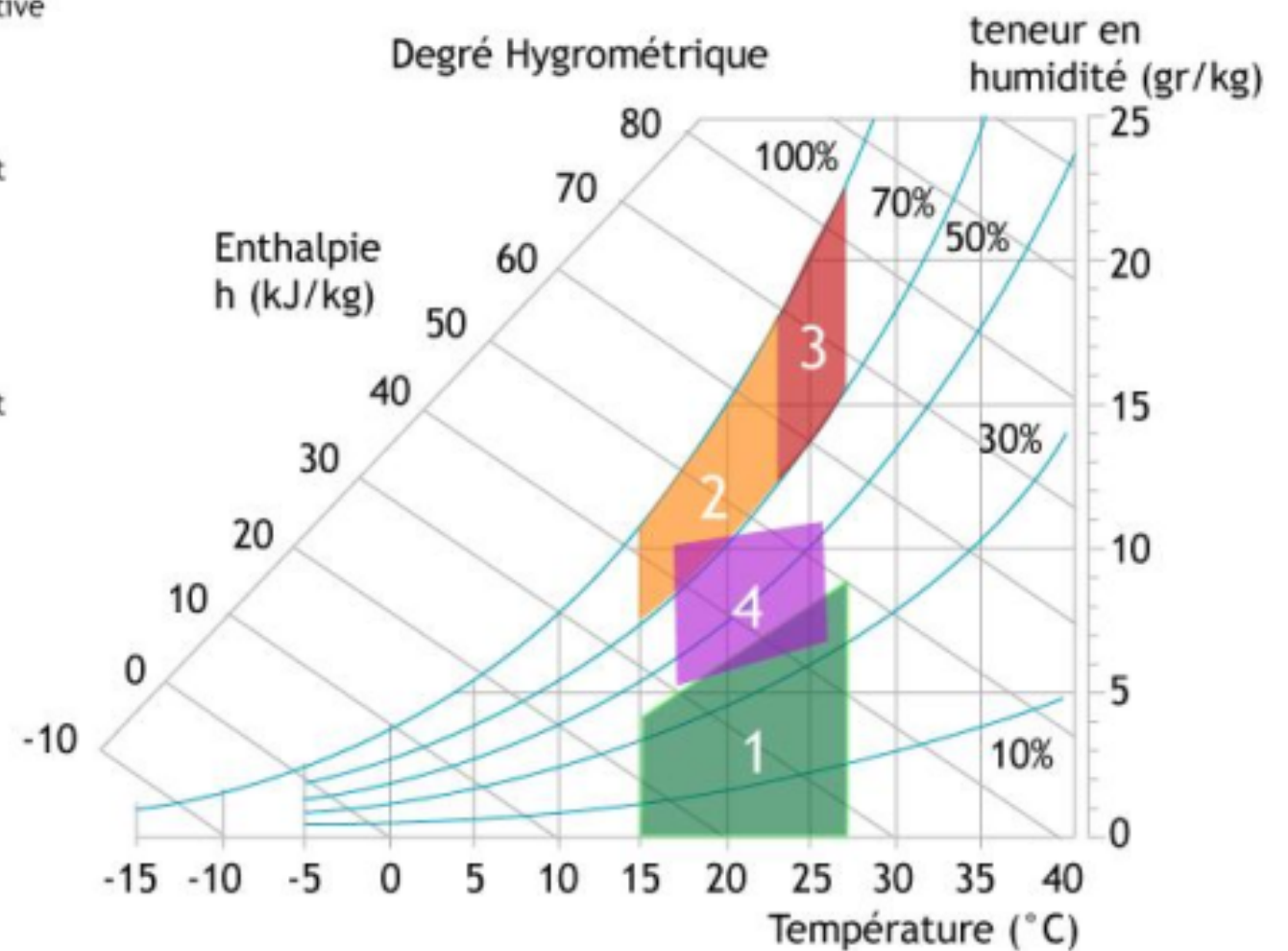
Au final...

1
zone à éviter
problèmes de sécheresse,
manque d'humidité relative

2 et 3
Zones de développement
de bactéries et de
microchampignons

3
Zones de développement
d'acariens

4
Polygone de confort
hygrothermique



Parois en régime stationnaire



Paroi plane

On considère une paroi plane séparant l'intérieur du local de l'ambiance extérieure.

On introduit les températures suivantes :

- *T_{aI} et T_{aE} les températures de l'air Intérieur et Extérieur*
- *T_{rI} et T_{rE} les températures résultantes de toutes les autres parois :*

$$T_r = \frac{\sum_i T_{p,i} \cdot S_i}{\sum_i S_i}$$

$T_{p,i}$: Température de surface de la paroi i

- *T_{sI} et T_{sE} les températures de surface correspondantes*

Paroi plane

En régime stationnaire, on peut écrire :

$$\phi = h_{cI} \cdot (T_{aI} - T_{sI}) + h_{rI} \cdot (T_{rI} - T_{sI})$$

$$= \frac{\lambda}{L} \cdot (T_{sI} - T_{sE})$$

$$= h_{cE} \cdot (T_{sE} - T_{aE}) + h_{rE} \cdot (T_{sE} - T_{rE})$$

$$= \text{constante}$$

Paroi plane

En définissant la température résultante sèche :

$$T_X = \frac{h_{cX} \cdot T_{aX} + h_{rX} \cdot T_{rX}}{h_{cX} + h_{rX}}$$

on obtient :

$$\phi = \underbrace{(h_{cI} + h_{rI})}_{H_E} \cdot (T_I - T_{sI}) = \frac{\lambda}{L} \cdot (T_{sI} - T_{sE})$$

$$= \underbrace{(h_{cE} + h_{rE})}_{H_E} \cdot (T_E - T_{sE}) = \text{constante}$$

Paroi plane

En manipulant un peu l'expression, on obtient finalement la relation suivante :

$$\phi = U \cdot (T_I - T_E)$$

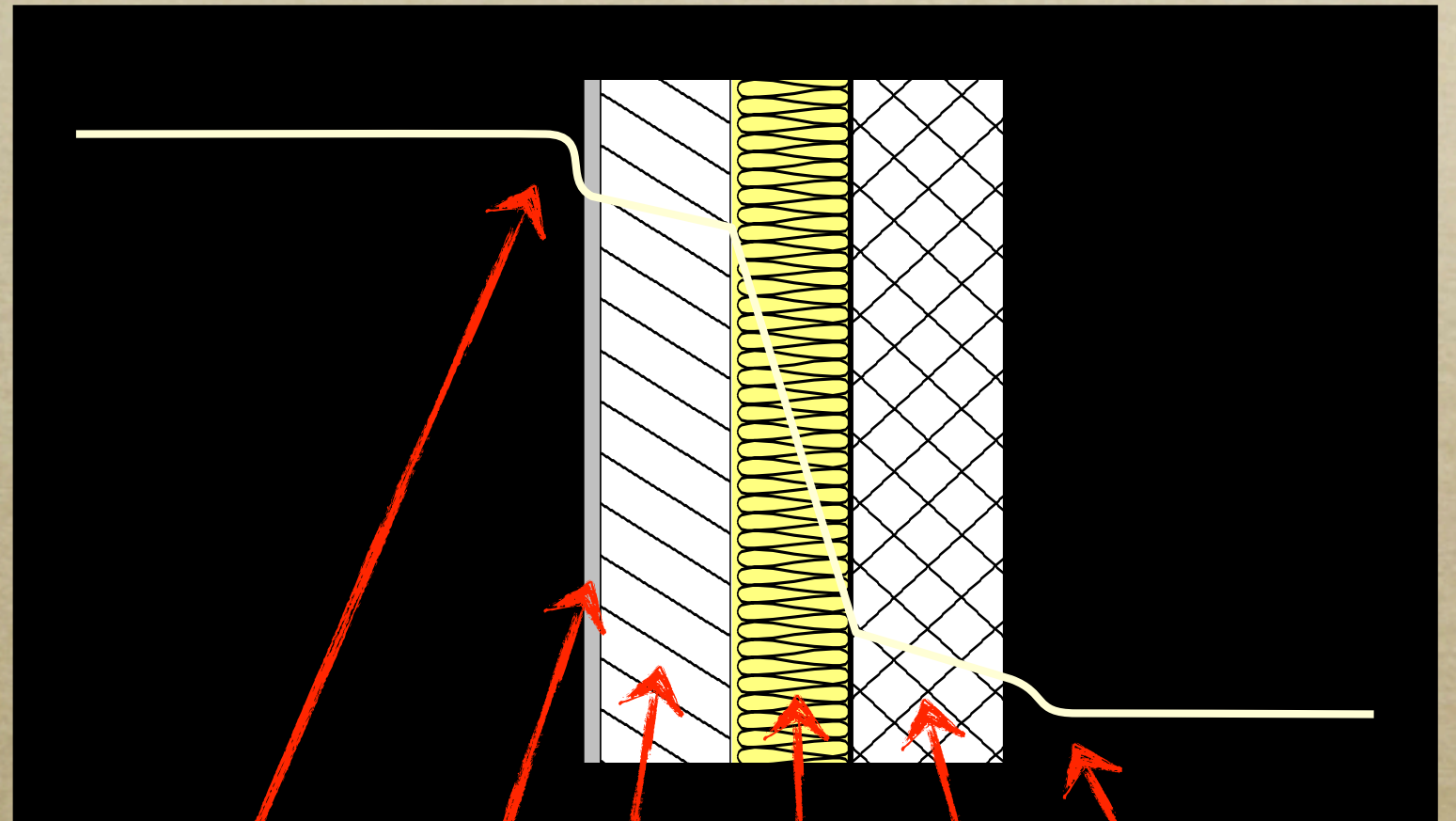
avec :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_I} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_E}$$

On retrouve donc (Ouf !) l'additivité des résistances en série mais avec un résultat supplémentaire qui concerne la température sèche résultante à prendre en compte.

Paroi plane composée

Le terme de résistance de conduction peut bien entendu être étendu au cas où la paroi est composée de plusieurs couches.



$$R_T = R_{se} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{si}$$

Paroi plane composée

Pour simplifier, les coefficients d'échanges aux parois sont exprimés sous formes de résistances thermiques et ont des valeurs fixées par la réglementation

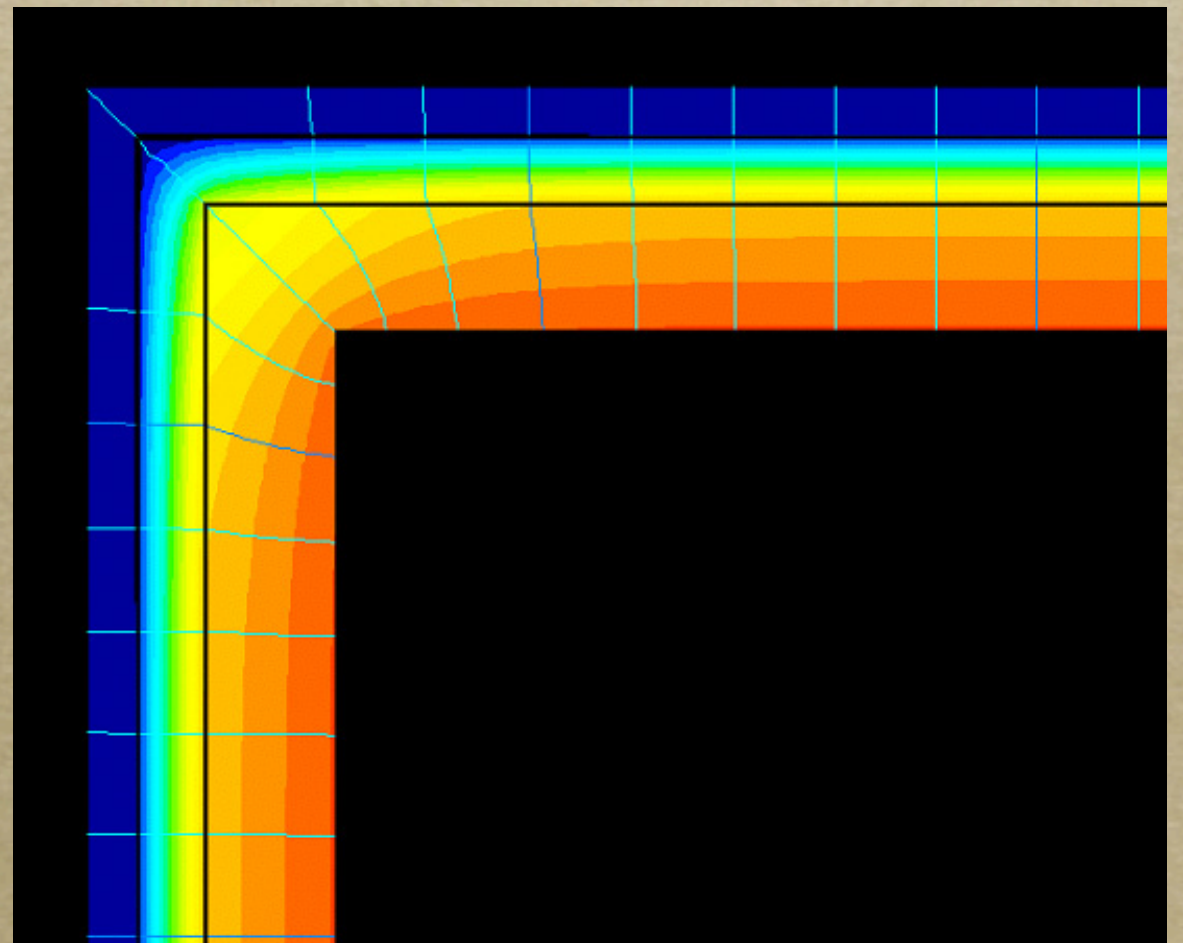
$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$		<i>Rse (ext)</i>	<i>Rsi (int)</i>
<i>Paroi verticale</i>		0.13	0.04
<i>Paroi horizontale</i>	<i>flux ascendant</i>	0.10	0.04
	<i>flux descendant</i>	0.17	0.04

Une paroi est considérée comme verticale si l'angle qu'elle fait avec l'horizontale est supérieur ou égal à 60°

Ponts Thermiques

Problème avec les bâtiments ☞ *pas que des parois planes !*

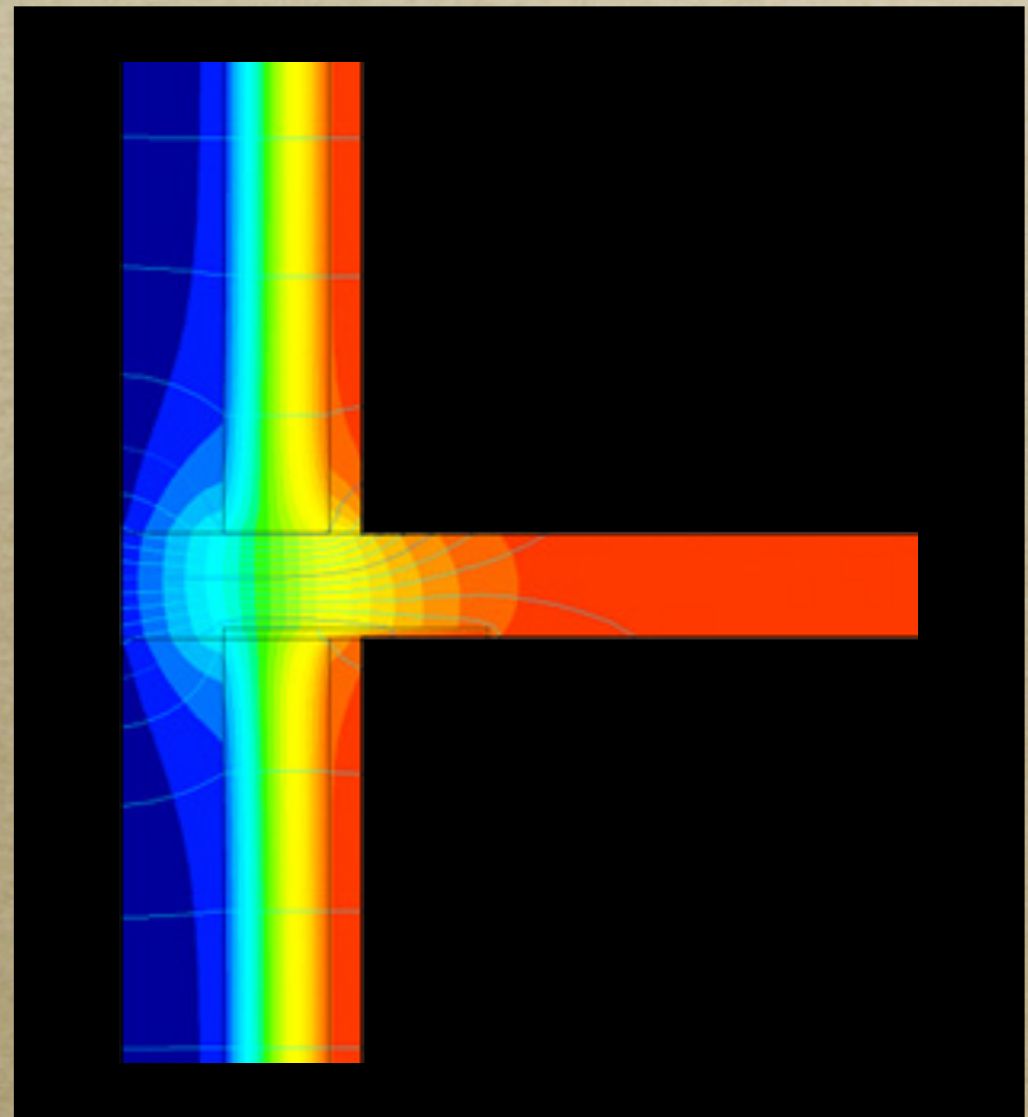
Angles...



Ponts Thermiques

Problème avec les bâtiments  *pas que des parois planes !*

Jonctions...



Ponts Thermiques

Et aussi des parois en contact avec le sol...

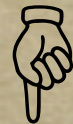


Ponts Thermiques

Pour tout ce qui n'est pas une paroi plane



Cas particulier



Pont Thermique

Linéaire ou ponctuel...

Ponts Thermiques

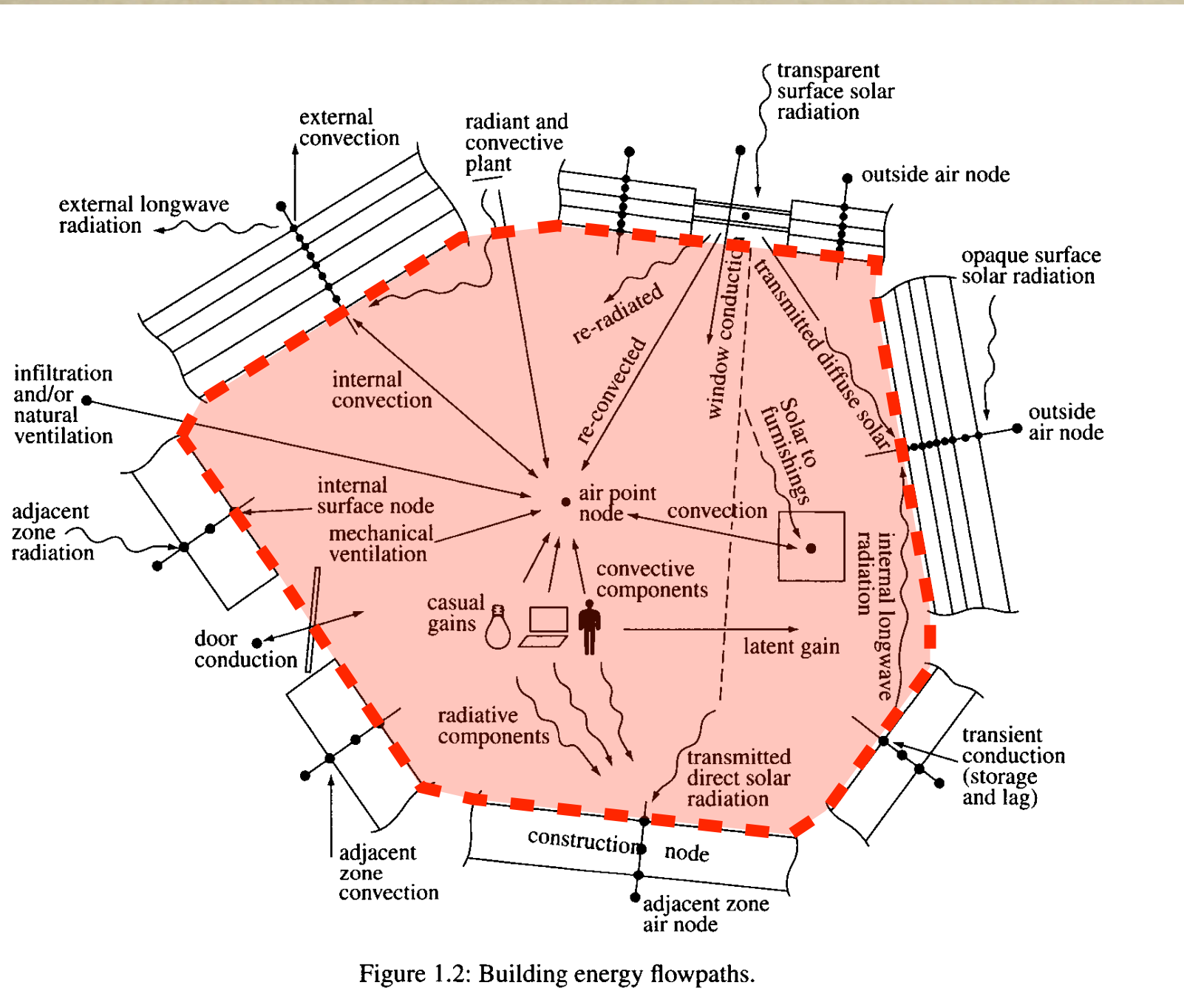
Souvent cause de déperditions importantes...



Nous y reviendrons un peu plus tard...

Bilan Global d'un local en stationnaire

Bilan d'une zone



Conduction
Convection
Rayonnement / IR
Rayonnement / VIS

Apports internes

Ventilation
Infiltration

Air Humide

Régime stationnaire

$$\overbrace{\Phi_{\text{gr}} + \Phi_{\text{cc}} + \Phi_{\text{oc}}}^{\text{Gains}} = \overbrace{\sum_j (AU)_j \cdot (T_{I,j} - T_E) + \dot{C} \cdot (T_{I,j} - T_E)}^{\text{Pertes}}$$

↑
*Apports
gratuits
(i.e. Soleil)*

↑
*Chauffage
Climatisation*

↑
*Apports
internes*

↑
*Convection
Conduction*

↑
Ventilation/infiltrations

\dot{C} : Débit de renouvellement d'air (kg/s)

A : Surface de la paroi considérée (m²)

U : Coefficient d'échange global (W·m⁻²·K⁻¹)

Régime stationnaire

En considérant que la température intérieure du local est uniforme, cette expression se simplifie :

$$\Phi_{\text{gr}} + \Phi_{\text{cc}} + \Phi_{\text{oc}} = (T_I - T_E) \cdot \left[\sum_j (AU)_j + \dot{C} \right]$$

où le terme entre crochets correspond à un coefficient global d'échange qui tient compte des échanges au travers des parois mais également des pertes par infiltration/ventilation.

Besoin en chauffage

Si on souhaite maintenir constante la température intérieure quelle que soit la température extérieure variable, il faut à chaque instant que le système d'appoint dissipe une puissance :

$$\Phi_{cc}(t) = \left(T_I - T_E(t) \right) \cdot \left[\sum_j (AU)_j + \dot{C} \right] - \Phi_{gr}(t) - \Phi_{oc}(t)$$

En intégrant sur une journée, l'énergie à apporter est :

$$q_{cc} = \underbrace{\left[\sum_j (AU)_j + \dot{C} \right]}_{Cte} \cdot \int \left(T_I - T_E(t) \right) dt - \underbrace{\int \Phi_{gr}(t) dt}_{q_{gr}} - \underbrace{\int \Phi_{oc}(t) dt}_{q_{oc}}$$

Besoin en chauffage

L'intégrale sur l'écart des températures peut se simplifier en faisant intervenir la température extérieure moyenne sur la journée :

$$\int (T_I - T_E(t)) dt = \int T_I dt - \int T_E(t) dt$$
$$\approx 1 \text{ jour} \cdot (T_I - \hat{T}_E)$$

Cette expression s'exprime donc en «degrés-jour» qui est une notion fondamentale dans le bâtiment, et qui mesure l'écart entre la température que l'on souhaite maintenir et la rigueur du climat.

Besoin en chauffage

En sommant les besoins sur les N jours d'une saison de chauffe, on obtient l'énergie totale nécessaire :

$$Q = \sum_{n=1}^N q_{cc}^n = \underbrace{\left[\sum_j (AU)_j + \dot{C} \right]}_{C_{te}} \cdot \sum_{n=1}^N DJ^n - \sum_{n=1}^N q_{gr}^n - \sum_{n=1}^N q_{oc}^n$$

On voit apparaître ici la somme des degrés-jour sur la saison de chauffe qui est une grandeur qui ne dépend que de la localisation... et que l'on trouve dans des tables.

Besoin en chauffage

Si on laisse de côté pour le moment les apports gratuits et des occupants (ce qui revient à se placer dans le cas le plus défavorable), le besoin en chauffage sur la période de chauffe s'exprime comme le produit :

- d'un terme dépendant seulement du local*
- d'un terme ne dépendant que du climat*

$$Q_{max} = 24 \cdot U_G \cdot DJ$$

Le coefficient 24 permet d'exprimer l'énergie en Wh.

Régime stationnaire

*En France, la température intérieure de référence est prise égale à 18°C, ce qui conduit à la définition des **Degrés-jour unifiés** i.e. les fameux **DJU**.*

TM : température minimale relevée entre (J-1) à 18hUTC et (J) à 18h UTC

TX : température maximale relevée entre (J) à 6hUTC et (J+1) à 6h UTC

S : seuil de référence (18°C)

MOY = (TM+TX)/2

*(toutes mesures
à 2m du sol)*

Deux méthodes de calcul et deux cas selon que l'on s'intéresse à l'excédent (climatisation) ou au déficit (chauffage)

«Météo» (Météo France)

«Professionnels de l'énergie» (COSTIC)

Calcul des DJ

Déficit - Chauffage

Excédent - Climatisation

Méthode «Météo» (Météo France) :

Si $S \leq MOY$ alors $DJ=0$

Sinon $DJ=S-MOY$

Si $S < MOY$ alors $DJ=MOY-S$

Sinon $DJ=0$

Méthode «Professionnels de l'énergie» (COSTIC) :

Si $S > TX$ alors $DJ=S-MOY$

Si $S \leq TM$ alors $DJ=0$

Sinon $DJ=(S-TM) \times (0.08 + 0.42 \times (S-TM)/(TX-TM))$

Si $S > TX$ alors $DJ=0$

Si $S \leq TM$ alors $DJ=MOY-S$

Sinon $DJ=(TX-S) \times (0.08 + 0.42 \times (TX-S)/(TX-TM))$

Calcul des DJ



Pour la France, la période de chauffage est des 232 jours entre le 1er octobre et de 20 mai.

Pour le chauffage, le cumul de DJU va de 1400°C×J en Corse et 3800°C×J dans le Jura.

On fait quoi des DJU ?

Pour finir, la consommation C se calcul par la relation

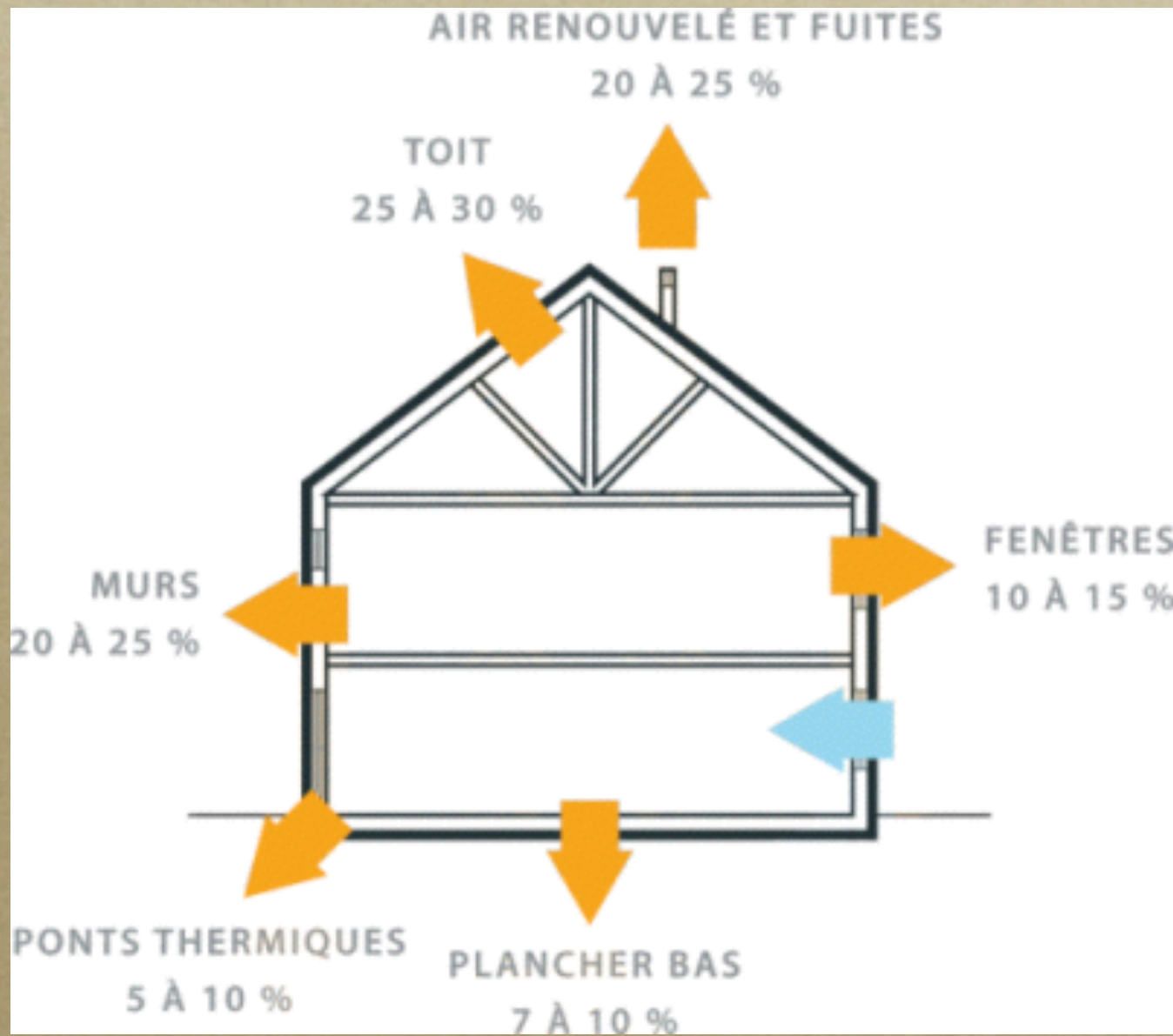
$$C = B \cdot \frac{i}{\eta}$$

où le coefficient i permet de tenir compte de l'intermittence du besoin ($i \approx 0.75$ en résidentiel) et η représente le rendement global du système de chauffage (i.e. production, distribution, émission)

Rappel : Il s'agit ici d'une approche très simplifiée de ce qui se fait dans la RT et encore plus de la simulation thermique dynamique. En particulier, on ne tient pas compte ici des apports gratuits.

Modélisation II : Déperditions

Les déperditions...



Déperditions

Renouvellement d'air

Ventilation

Infiltrations

Parois

Opaques

Surfaciques

Ponts thermiques

Linéiques

Ponctuels

Menuiseries

Mouvements d'air

Les mouvements d'air sont provoqués par :

- *Le vent (augmentation de la pression au vent et diminution sous le vent)*

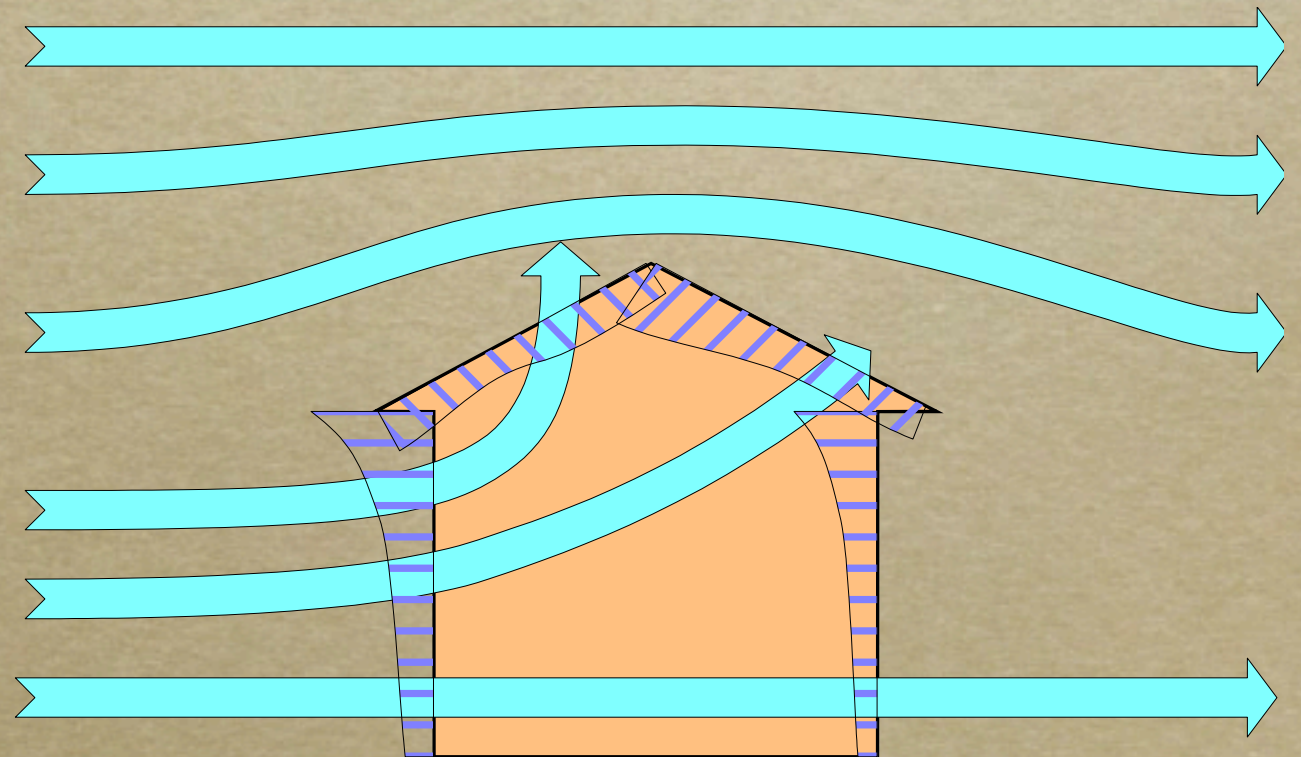
$$p = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot v_{\infty}^2$$

C_p = coefficient de pression

Walton :

$$\text{Au vent : } C_p = 0.75 - 1.05 * \frac{\alpha}{90}$$

$$\text{Sous le vent : } C_p = -0.45$$



Mouvements d'air

Les mouvements d'air sont provoqués par :

- *la différence de densité entre l'air intérieur et l'air extérieur (i.e. indirectement température)*
--> *Effet cheminée*

$$q_v = D \cdot (\Delta P)^n$$

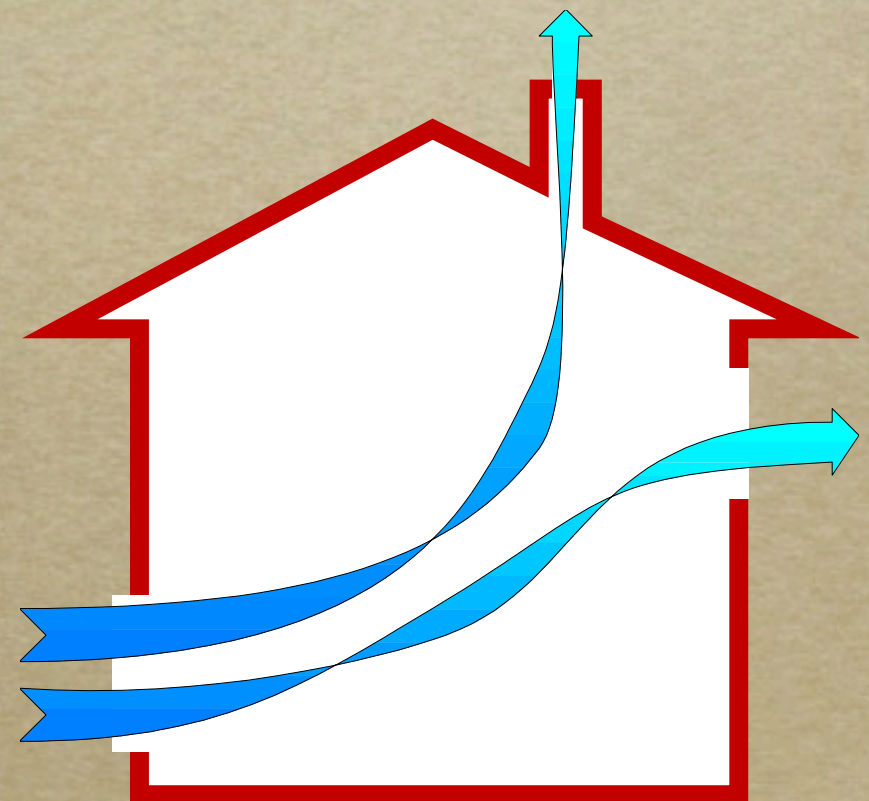
$$\Delta P = -(\rho_i - \rho_e) \cdot g \cdot z$$

$0.5 \leq n \leq 1$ mais souvent $n = 2/3$

D : perméance de l'orifice

Pour un châssis : $q_v = L \cdot C \cdot (\Delta P)^{0.63}$

$5 \times 10^{-5} \leq C \leq 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-0.63}$

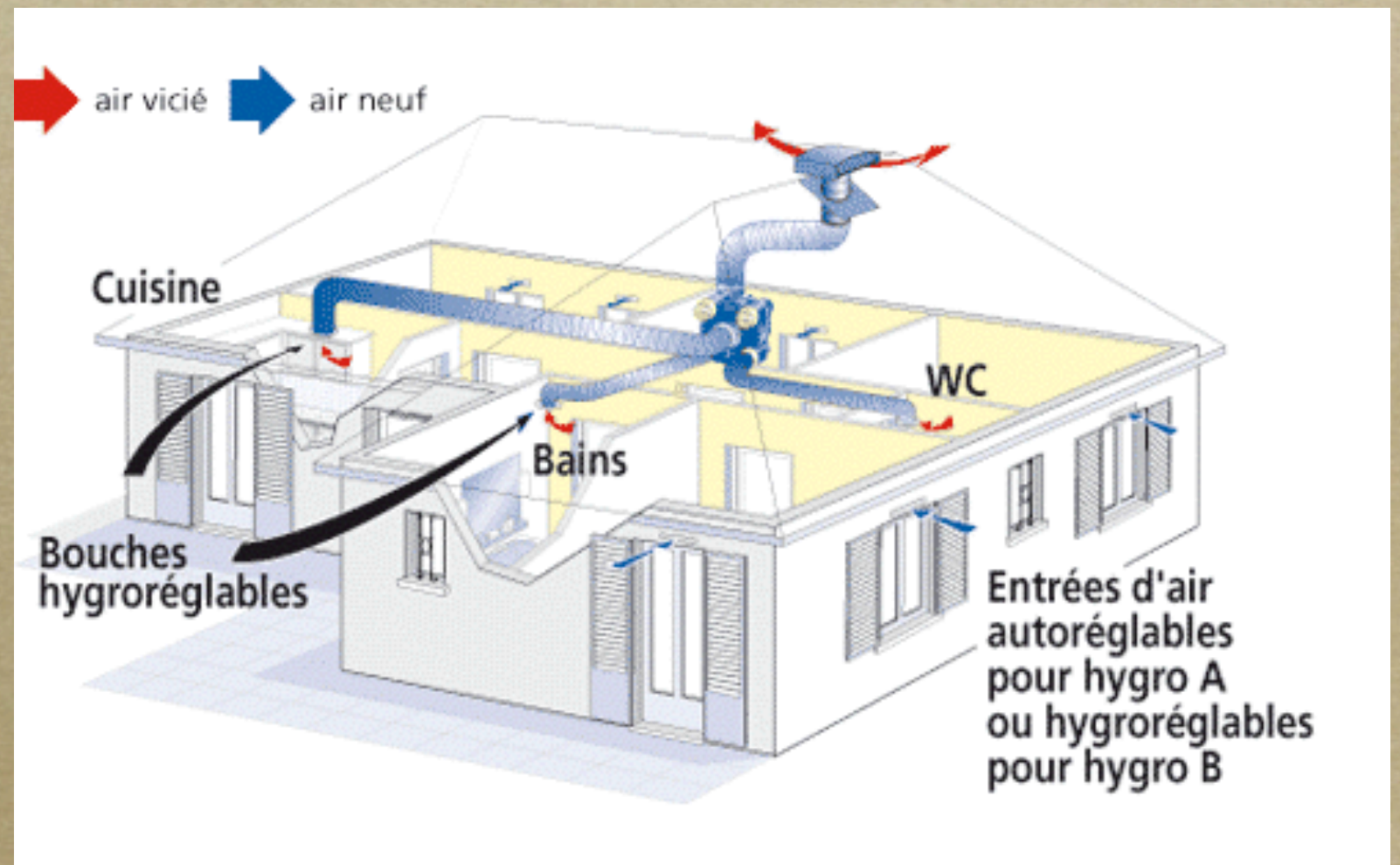


Mouvements d'air

Les mouvements d'air sont provoqués par :

- *les équipements de ventilation*

*Seule partie qui
est contrôlable et
qui doit l'être !*



Renouvellement d'air

Réglementaire :

débit en m^3/h

$$DEP_{air} = 0.34 \times \overbrace{\dot{q}_v}$$

$0.34 Wh \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$: produit ρC pour l'air à $20^\circ C$

<i>Nominal/Max</i> DEBITS EXTRAITS EXPRIMES en m^3/h					
Nombre de pièces principales du logement	Cuisine	Salle de bains ou de douches commune ou non avec cabinets d'aisances	Autre salle d'eau	Cabinet d'aisance	
				Unique	Multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	30	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

	Nombre de pièces principales						
	1	2	3	4	5	6	7
Débit total minimal en m^3/h	35	60	75	90	105	120	135
Débit minimal en cuisine en m^3/h	20	30	45	45	45	45	45

Pièces principales = toutes sauf les secondaires

Pièces secondaires = cuisines, salles d'eau, cabinets d'aisance

(Arrêtés du 24 mars 1982 et du 28 octobre 1983)

Exemple : 4 pièces principales, cuisine, bains, WC :

(m^3/h)	Cuisine	Bains	WC	Total
<i>max</i>	120	30	30	180
<i>mini</i>	45	-	-	90

Attention ! la réglementation est beaucoup plus complexe...
(et je ne tiens pas compte des infiltrations...)

Parois

Relation principale (bien connue ?) :

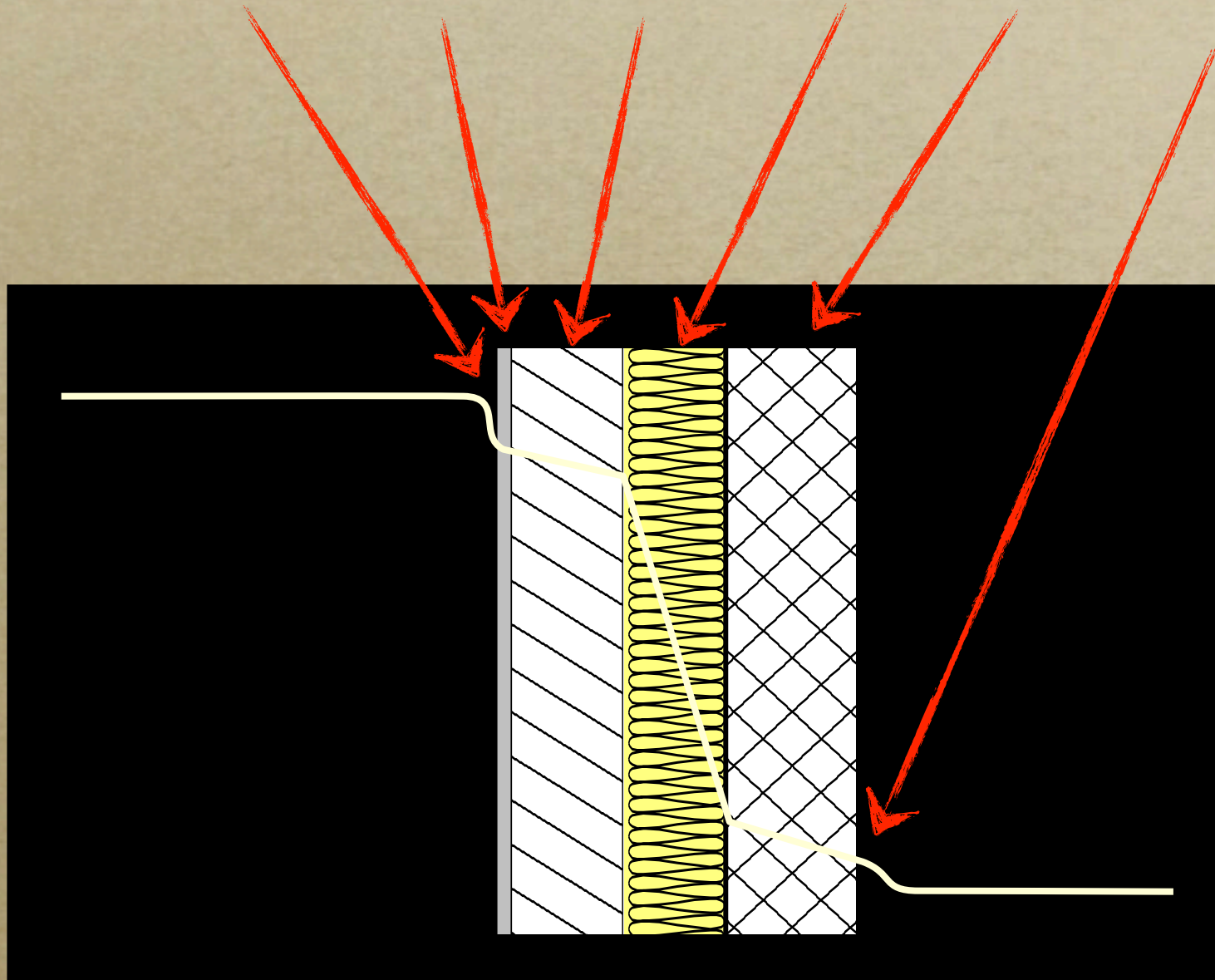
$$\frac{1}{U} = R = \frac{1}{h_e} + \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_s} = R_{se} + \sum_i R_i + R_{si}$$

$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$		<i>Rse (ext)</i>	<i>Rsi (int)</i>
<i>Paroi verticale</i>		0.13	0.04
<i>Paroi horizontale</i>	<i>flux ascendant</i>	0.10	0.04
	<i>flux descendant</i>	0.17	0.04

Une paroi est considérée comme verticale si l'angle qu'elle fait avec l'horizontale est supérieur ou égal à 60°

Parois planes

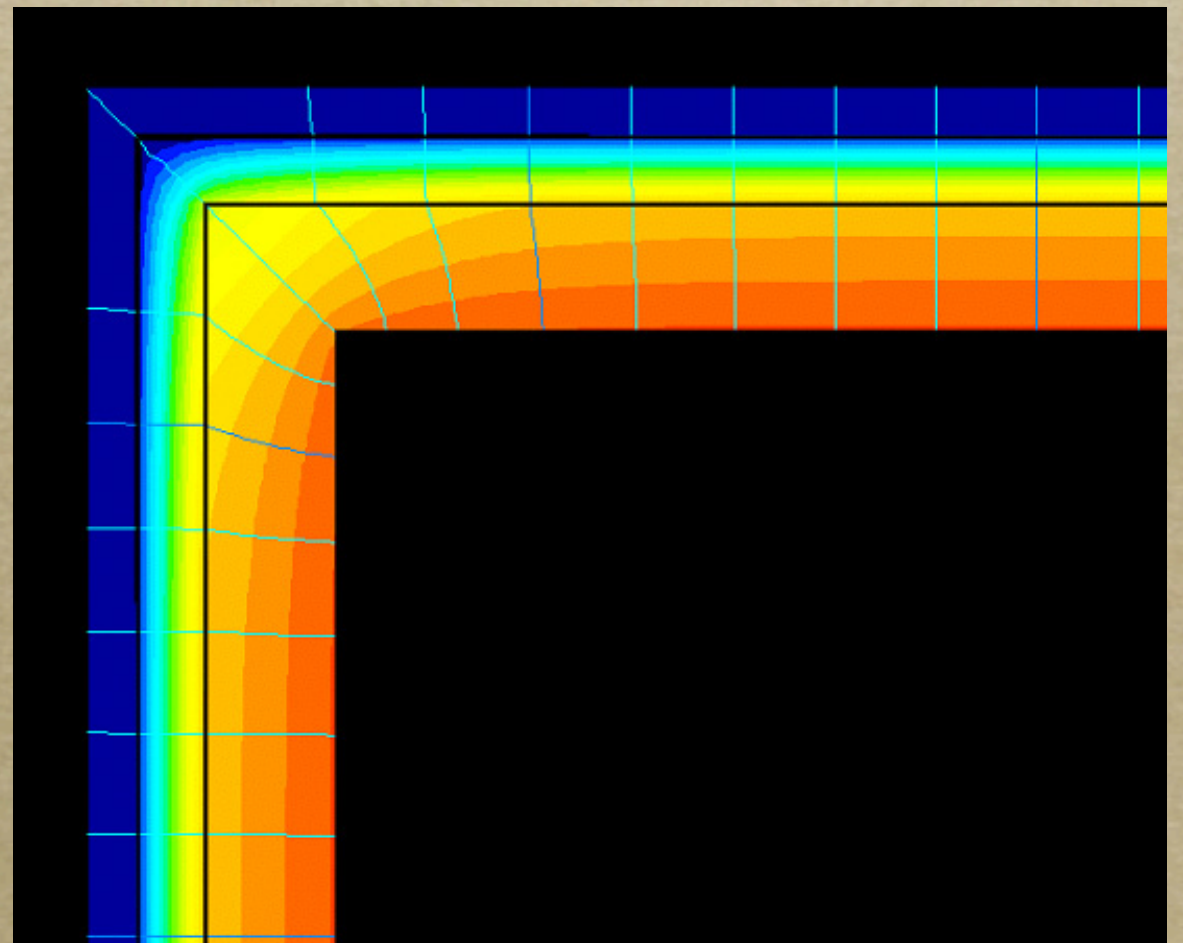
$$R_T = R_{se} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{si}$$



Ponts Thermiques

Problème avec les bâtiments ☞ *pas que des parois planes !*

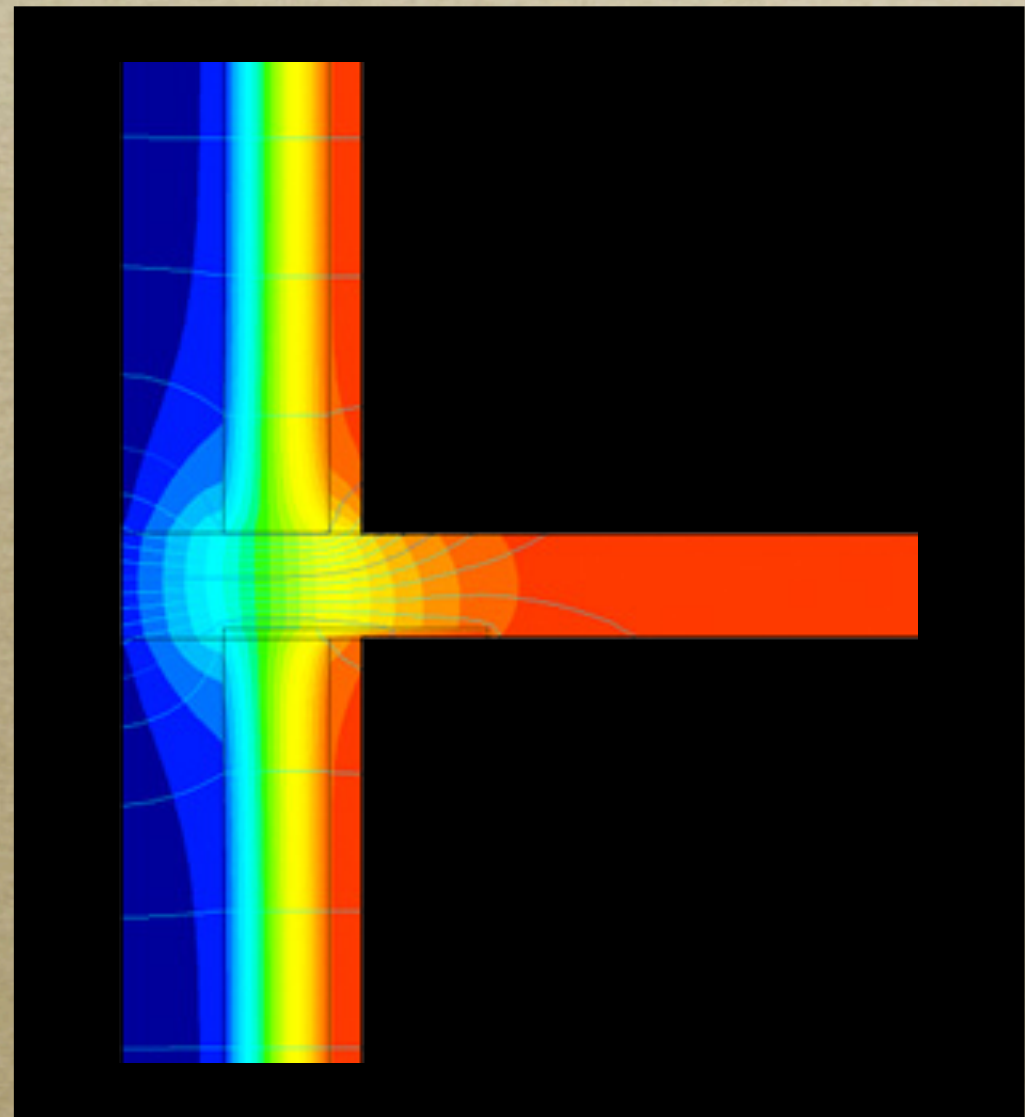
Angles...



Ponts Thermiques

Problème avec les bâtiments  *pas que des parois planes !*

Jonctions...



Ponts Thermiques

Et aussi des parois en contact avec le sol...

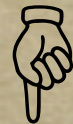


Ponts Thermiques

Pour tout ce qui n'est pas une paroi plane



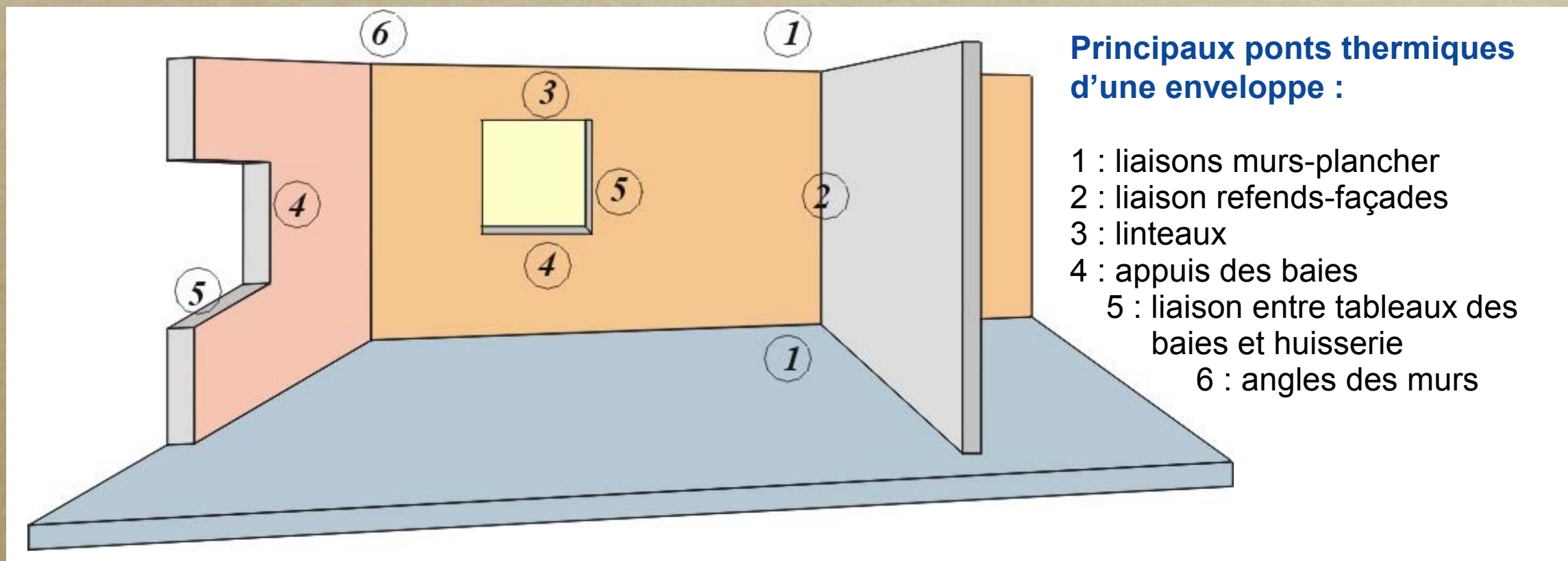
Cas particulier



Pont Thermique

Linéaire ou ponctuel...

Ponts thermiques



Ponts Thermiques

Souvent cause de déperditions importantes...



Règles Th-U

Règles Th-U

Fascicule 1/5

20 pages

Coefficient $U_{\text{bât}}$

Détermination du coefficient moyen de transmission à travers les parois

Fascicule 2/5

16 pages

Matériaux

Détermination des caractéristiques thermiques « utiles » des matériaux

Fascicule 3/5

28 pages

Parois vitrées

Calcul des coefficients thermiques des parois vitrées

Fascicule 4/5

84 pages

Parois opaques

Calcul des caractéristiques thermiques des parois opaques

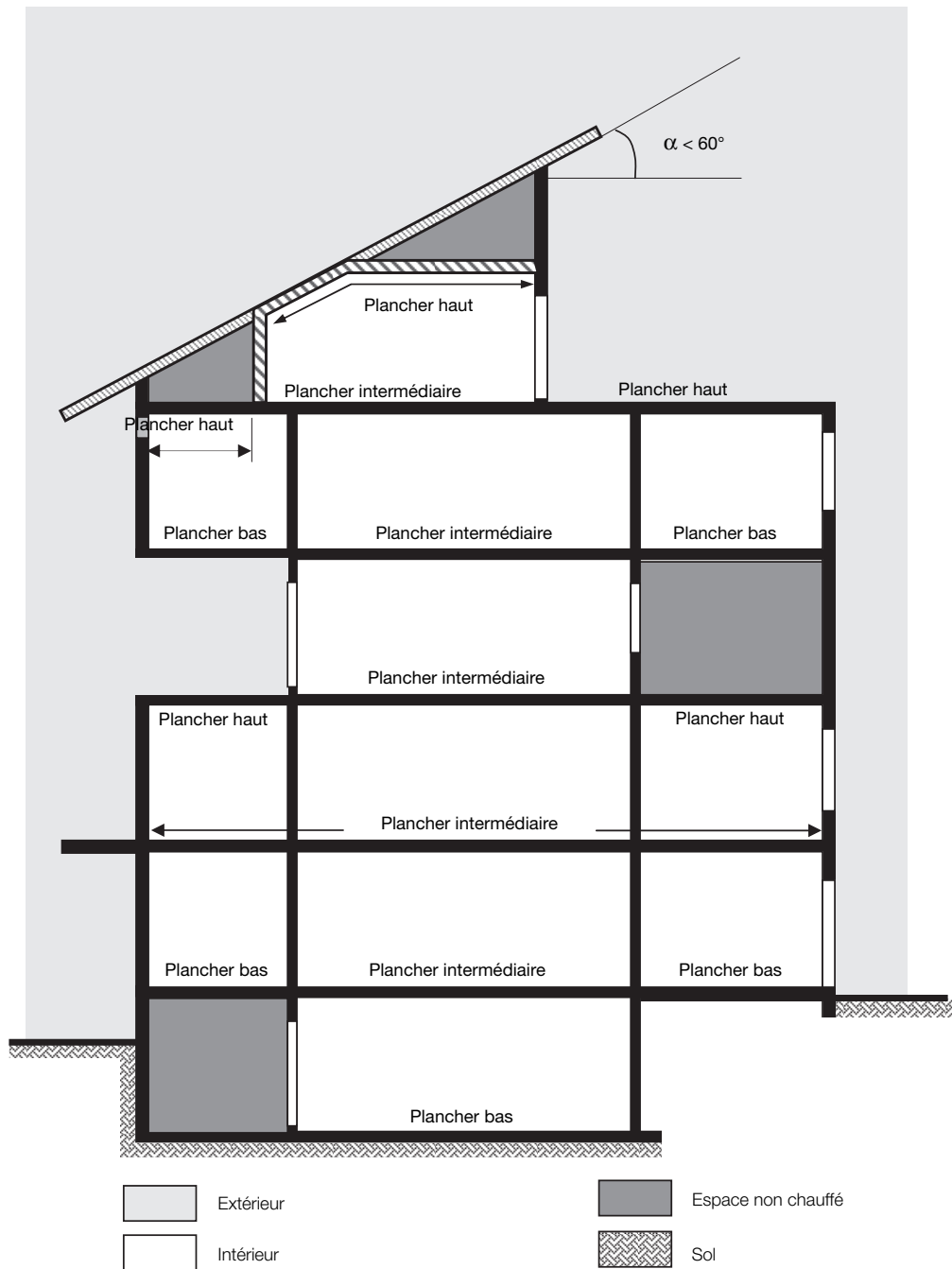
Fascicule 5/5

172 pages

Ponts Thermiques

Calcul des ponts thermiques

Règles Th-U



Quelques définitions :

Local : Un local est un volume totalement séparé de l'extérieur ou d'autres volumes par des parois fixes ou mobiles.

Espace chauffé : Local ou volume fermé chauffé à une température supérieure à 12 °C en période d'occupation.

Paroi verticale ou horizontale : Une paroi est dite verticale lorsque l'angle de cette paroi avec le plan horizontal est supérieur ou égal à 60 degrés, elle est dite horizontale lorsque cet angle est inférieur à 60 degrés.

Plancher bas : Paroi horizontale ($\alpha < 60^\circ$) donnant sur un local chauffé uniquement sur sa face supérieure.

Plancher intermédiaire : Paroi horizontale ($\alpha < 60^\circ$) donnant, sur ses faces inférieures et supérieures, sur des locaux chauffés

Plancher haut : Paroi horizontale ($\alpha < 60^\circ$) donnant sur un local chauffé uniquement sur sa face inférieure

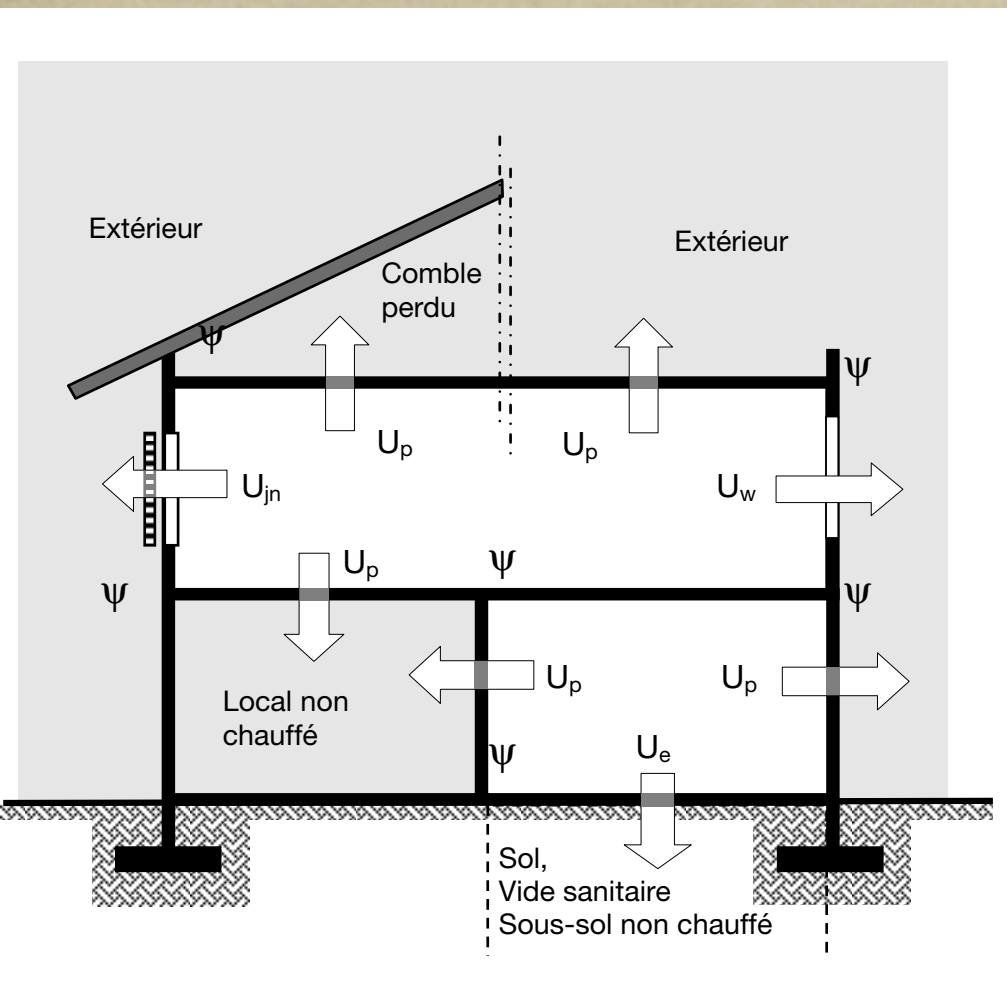
Règles Th-U

Quelques définitions : Coefficient de déperdition

...surfactive U [W/(m².K)] : Flux thermique en régime stationnaire par unité de surface, pour une différence de température de 1K entre les milieux situés de part et d'autre d'un système.

...linéique ψ [W/(m.K)] : Flux thermique en régime stationnaire par unité de longueur, pour une différence de température de 1K entre les milieux situés de part et d'autre d'un système.

...ponctuel χ [W/K] : Flux thermique en régime stationnaire ramené à un point, pour une différence de température de 1K entre les milieux situés de part et d'autre d'un système.

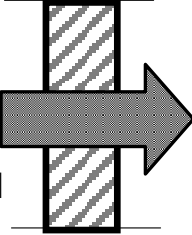
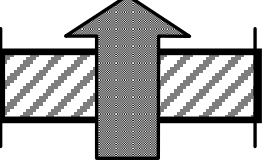
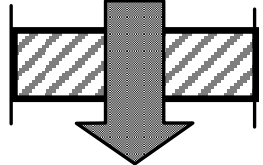


Règles Th-U

$$U_{\text{bât}} = \frac{\overbrace{\sum_i A_i \cdot U_i \cdot b_i}^{\text{Surfacique}} + \overbrace{\sum_j \ell_j \cdot \phi_j \cdot b_j}^{\text{Linéique}} + \overbrace{\sum_k \chi_k \cdot b_k}^{\text{Ponctuel}}}{\sum A_i}$$

***b** est un coefficient de réduction des déperditions qui intervient lorsque l'élément est en contact avec un local non chauffé*

Parois opaques

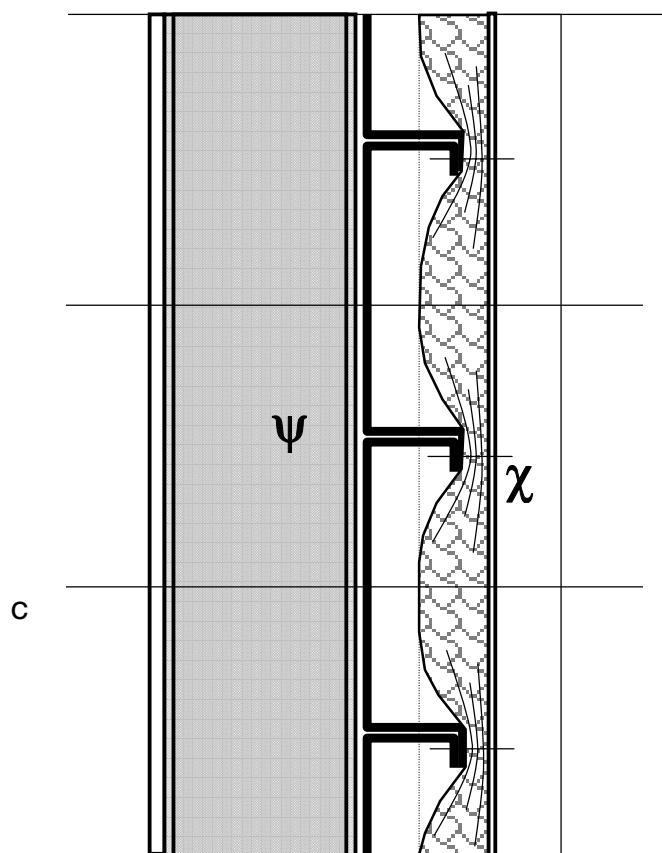
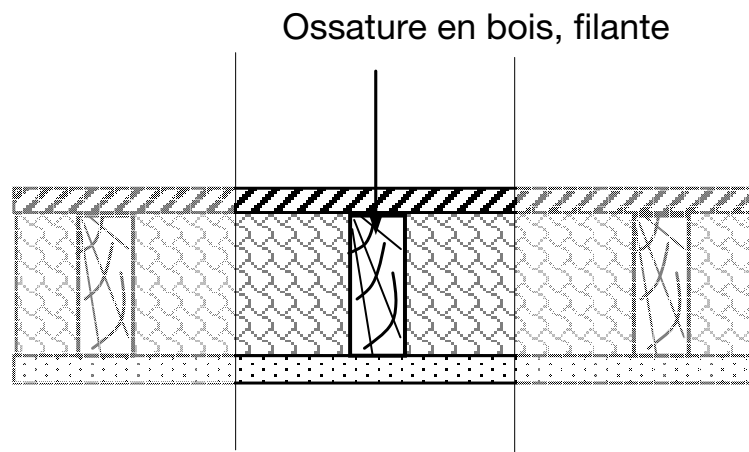
	R_{si} m ² .K/W	$R_{se}^{(1)}$ m ² .K/W	$R_{si} + R_{se}$ m ² .K/W
Paroi verticale inclinaison $\geq 60^\circ$  Flux horizontal	0,13	0,04	0,17
Flux ascendant  Paroi horizontale inclinaison $< 60^\circ$	0,10	0,04	0,14
 Flux descendant	0,17	0,04	0,21

Résistance superficielle :

Si la paroi donne sur un local non chauffé, il faut utiliser R_{si} des deux côtés

R_{se} s'utilise en cas de contact avec l'extérieur ou un local ouvert (i.e. tel que le rapport de la surface totale de ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à $0.005 \text{ m}^2/\text{m}^3$)

Parois opaques

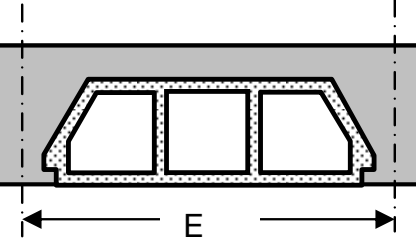
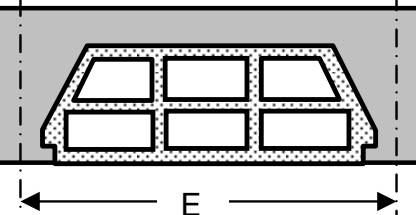


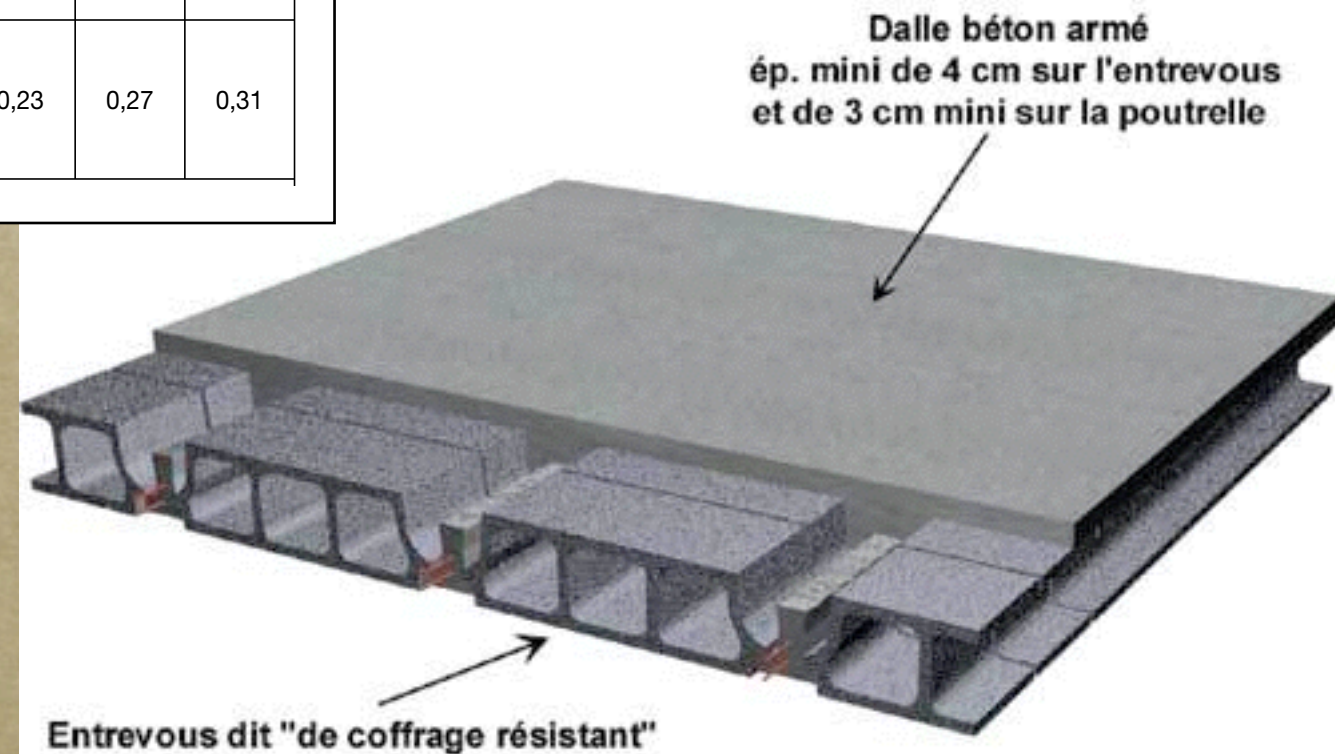
Dans le cas de parois planes constituées de couches homogènes, on fait simplement la somme des résistance (en incluant les lames d'air)

Pour les parois contenant des ponts thermiques intégrés (i.e. paroi non homogènes) on calcule une résistance moyenne équivalente....

On trouve les cas courants dans le fascicule 4/5

Exemple : Plancher à entrevous béton

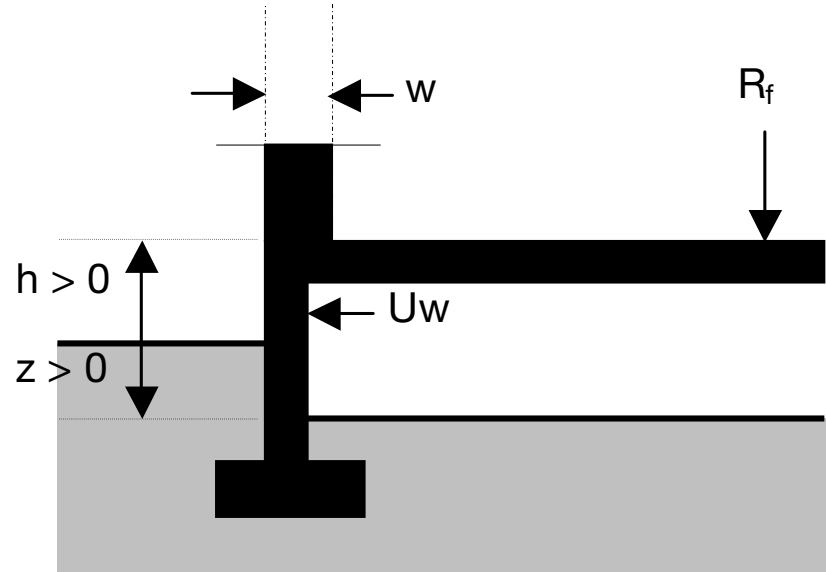
Coupe du plancher entre poutrelles	Entraxe des poutrelles (E) en cm	Hauteur des entrevous en cm					
		8	12	16	20	25	30
Planchers sans dalle de compression ou avec dalle de compression en béton de granulats lourds							
	50 < E ≤ 60	0,11	0,13	0,15	0,17	0,20	0,22
	60 < E ≤ 70	0,12	0,14	0,16	0,18	0,21	0,23
	50 < E ≤ 60	-	-	-	0,22	0,26	0,30
	60 < E ≤ 70	-	-	-	0,23	0,27	0,31



Exemple : Plancher à entrevous béton



Exemple : Plancher sur vide sanitaire



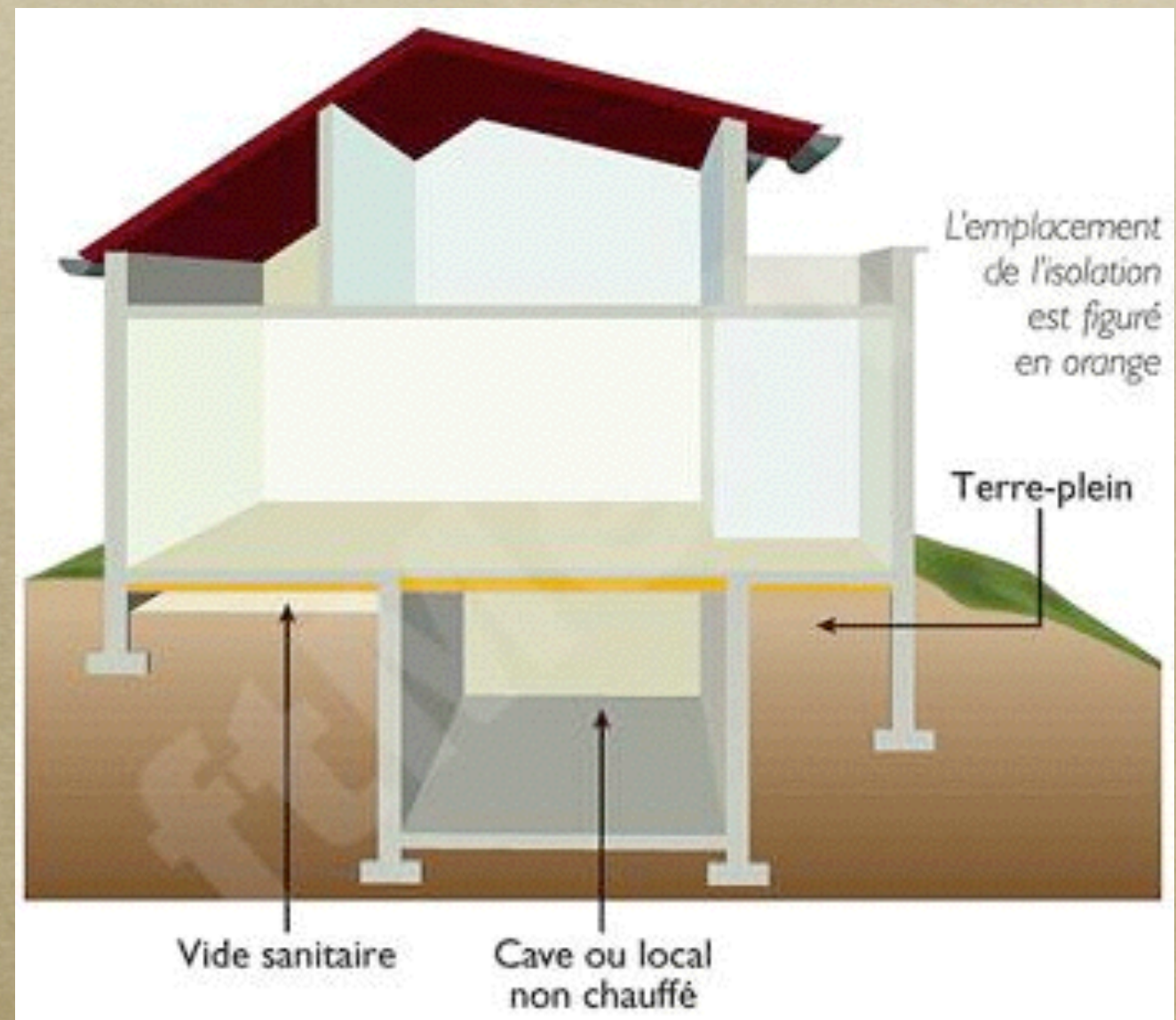
$U_w : 0,3 \leq U_w < 0,7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

	0,0 ≤ h < 0,4 m					0,4 ≤ h < 0,8 m				
	m ² .K/W R _f					m ² .K/W R _f				
B'	2,00	2,25	2,50	2,75	3,0	2,00	2,25	2,50	2,75	3,0
3	0,34	0,31	0,29	0,27	0,25	0,34	0,32	0,29	0,27	0,25
4	0,32	0,3	0,28	0,26	0,24	0,33	0,3	0,28	0,26	0,24

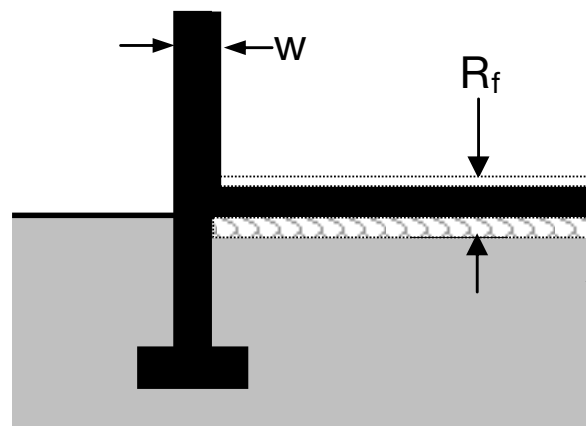
$U_w : 0,7 \leq U_w < 1,5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

	0,0 ≤ h < 0,4 m					0,4 ≤ h < 0,8 m				
	m ² .K/W R _f					m ² .K/W R _f				
B'	2,00	2,25	2,50	2,75	3,0	2,00	2,25	2,50	2,75	3,0
3	0,35	0,32	0,29	0,27	0,26	0,36	0,33	0,3	0,28	0,26
4	0,33	0,3	0,28	0,26	0,25	0,34	0,31	0,29	0,27	0,25
5	0,31	0,29	0,27	0,25	0,24	0,32	0,3	0,28	0,26	0,24

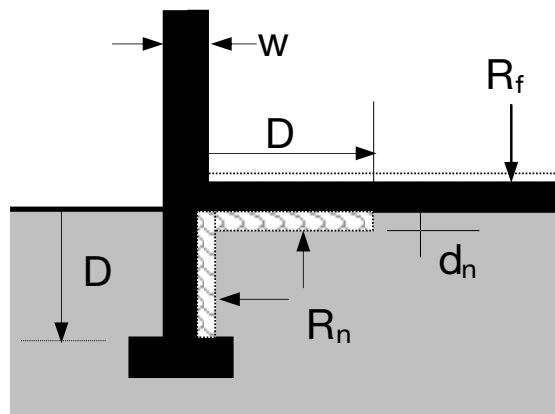
etc...



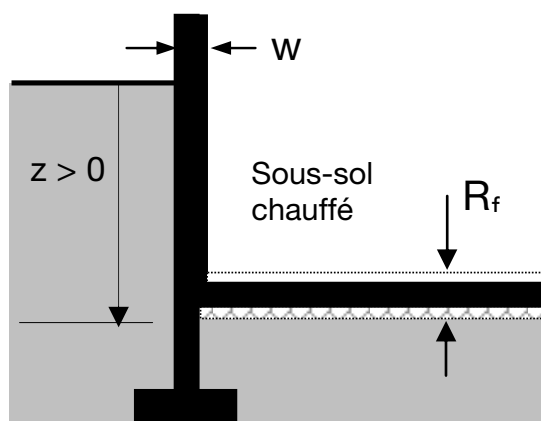
Exemple : Plancher sur terre-plein



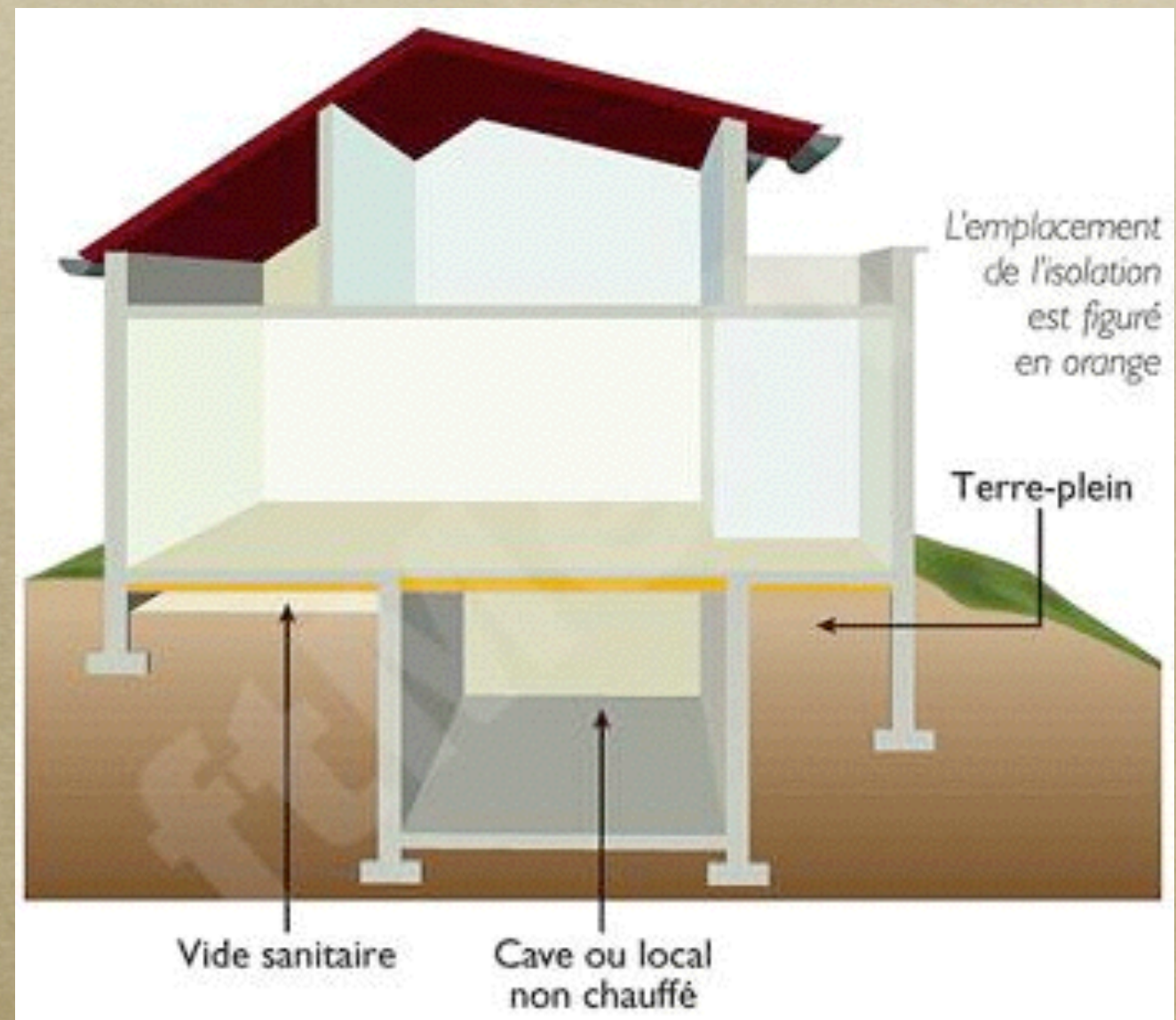
Avec isolation continue



Avec isolation périphérique

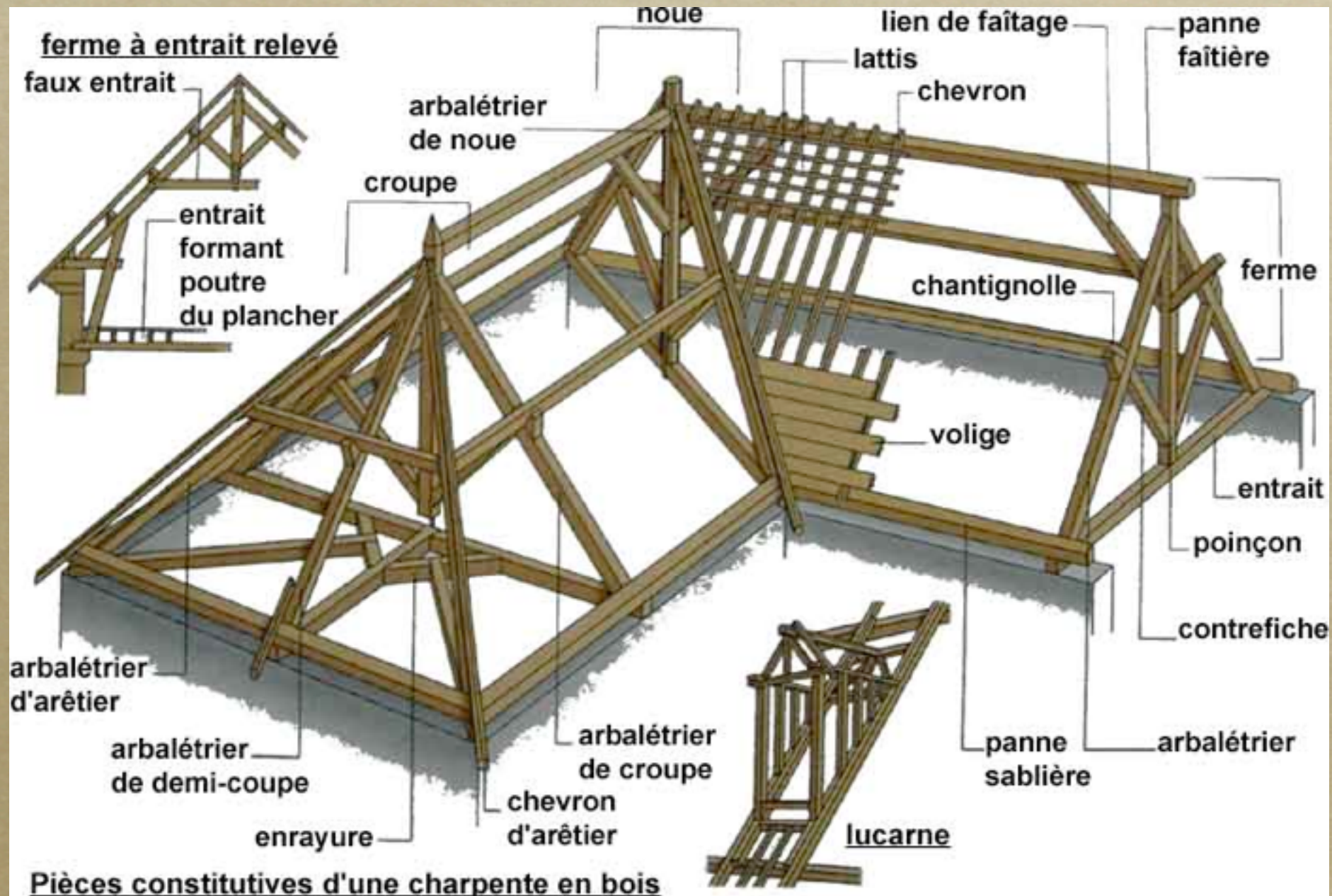


etc...

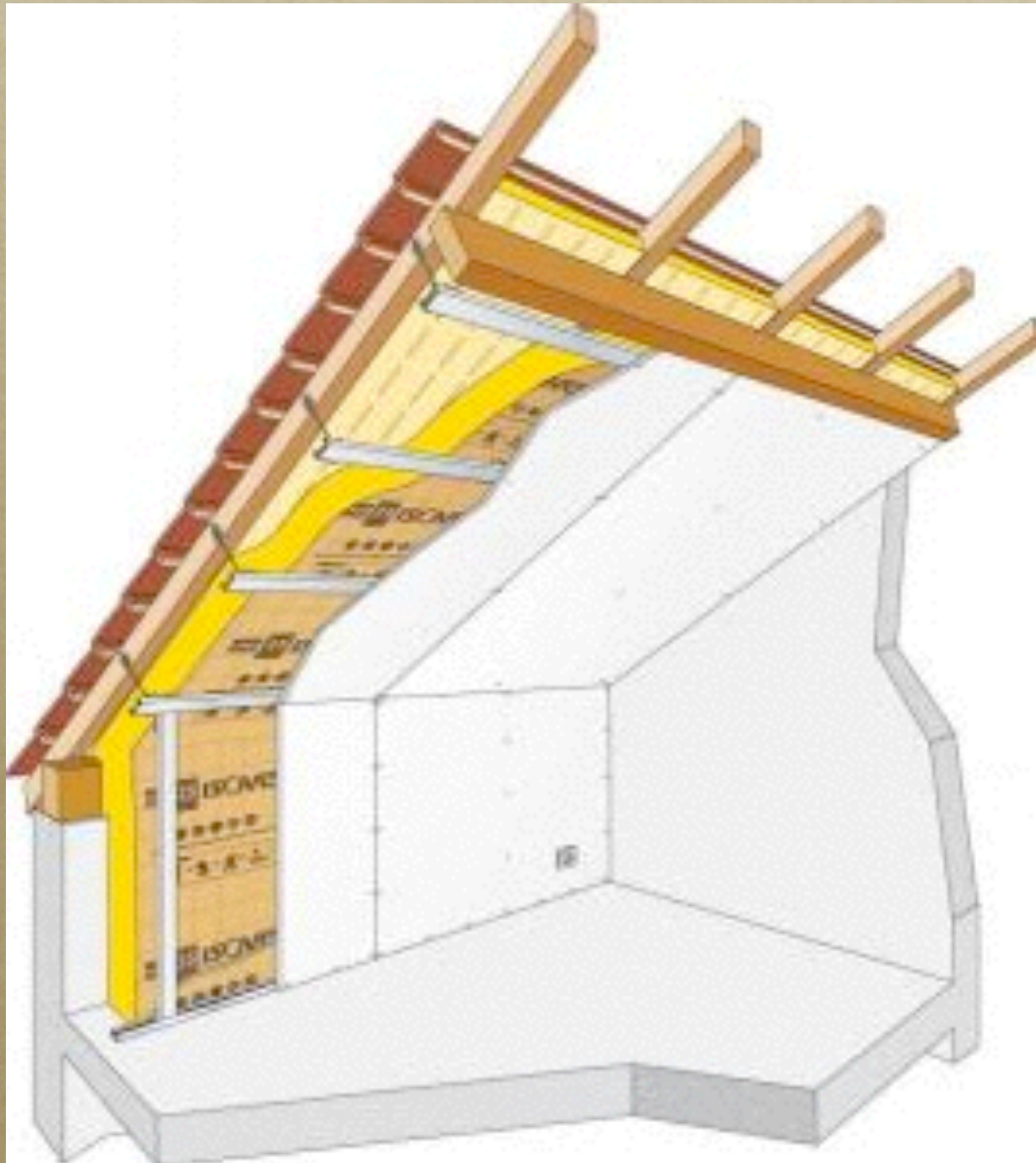


Exemple : Rampants

Même méthode mais nécessite un peu de vocabulaire



Exemple : Rampants



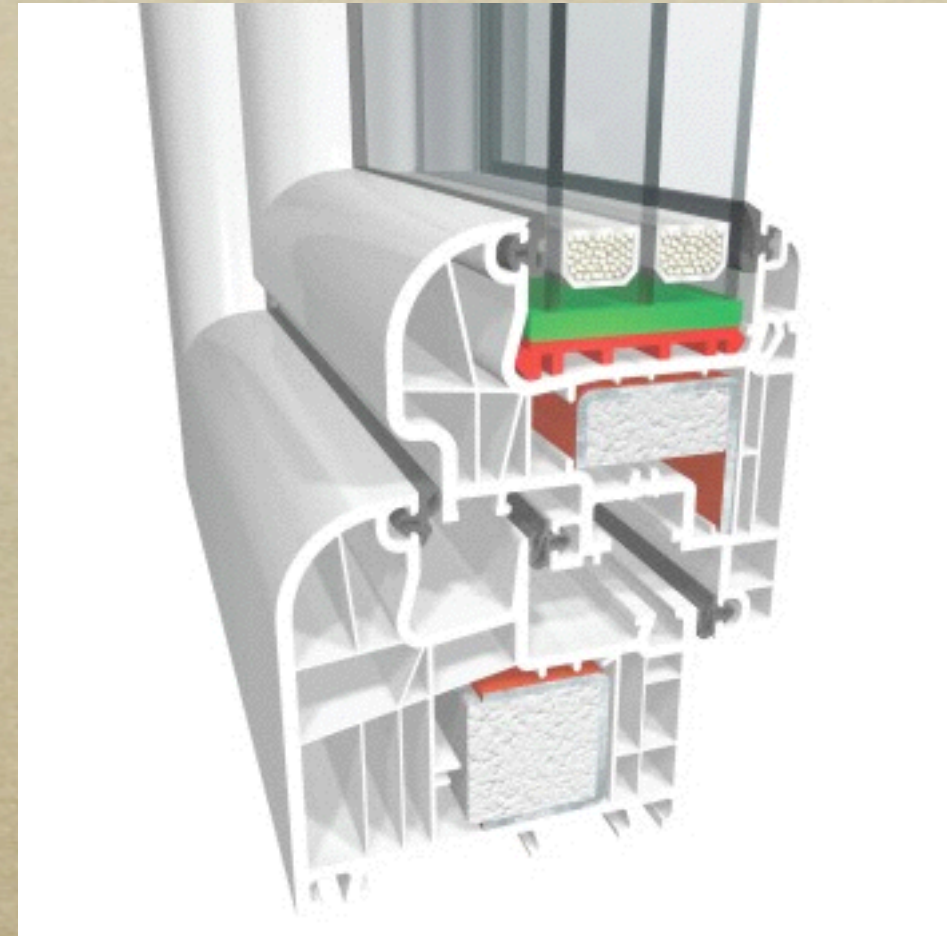
Il est obligatoire de laisser une circulation d'air sous la couverture étanche (parce que justement elle ne l'est pas toujours)

On a donc une lame d'air ventilée qui revient à considérer que la face supérieure de l'isolant est en contact avec l'extérieur.

La présence d'un pare-vapeur est également obligatoire en face intérieure de l'isolant pour éviter la condensation dans la masse et donc la détérioration de l'isolant.

Parois vitrées

*Paroi vitrée = vitrage + menuiserie
+ éventuellement des volets
+ éventuellement un coffre
(volet roulant)*

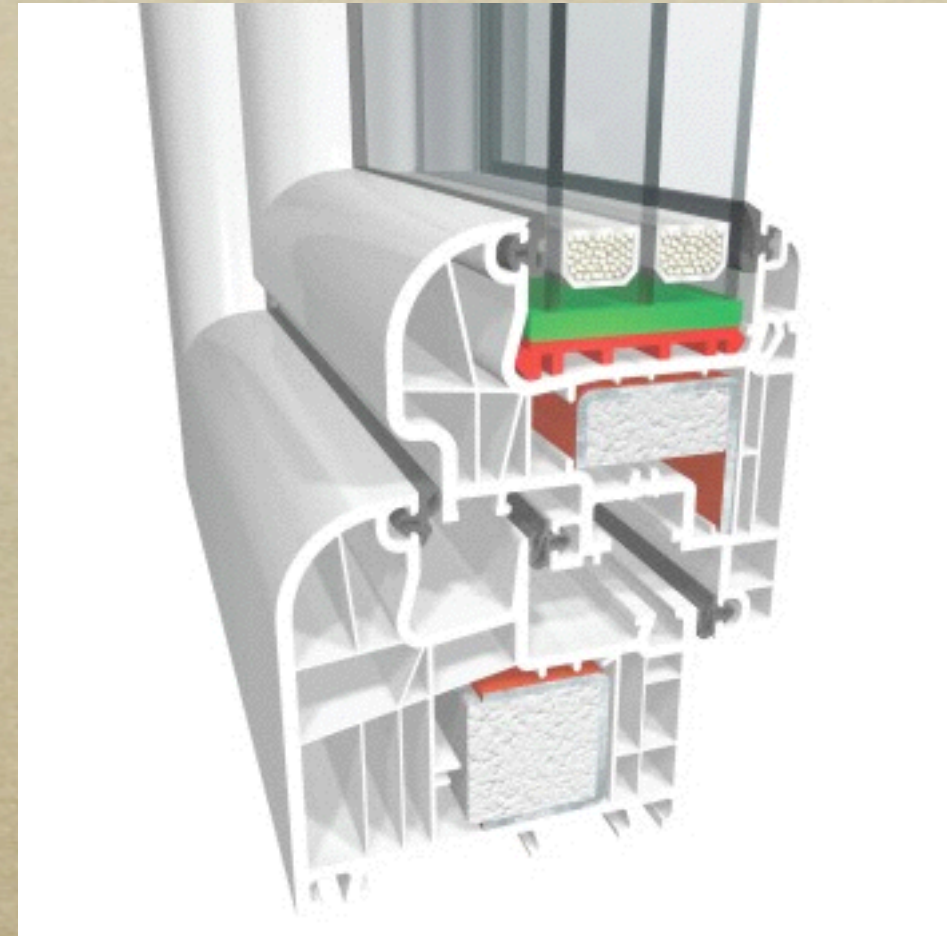


*vitrage = une ou plusieurs vitres avec zéro ou plusieurs
cavités non ventilées*

➡ Il faut tout prendre en compte...

Parois vitrées

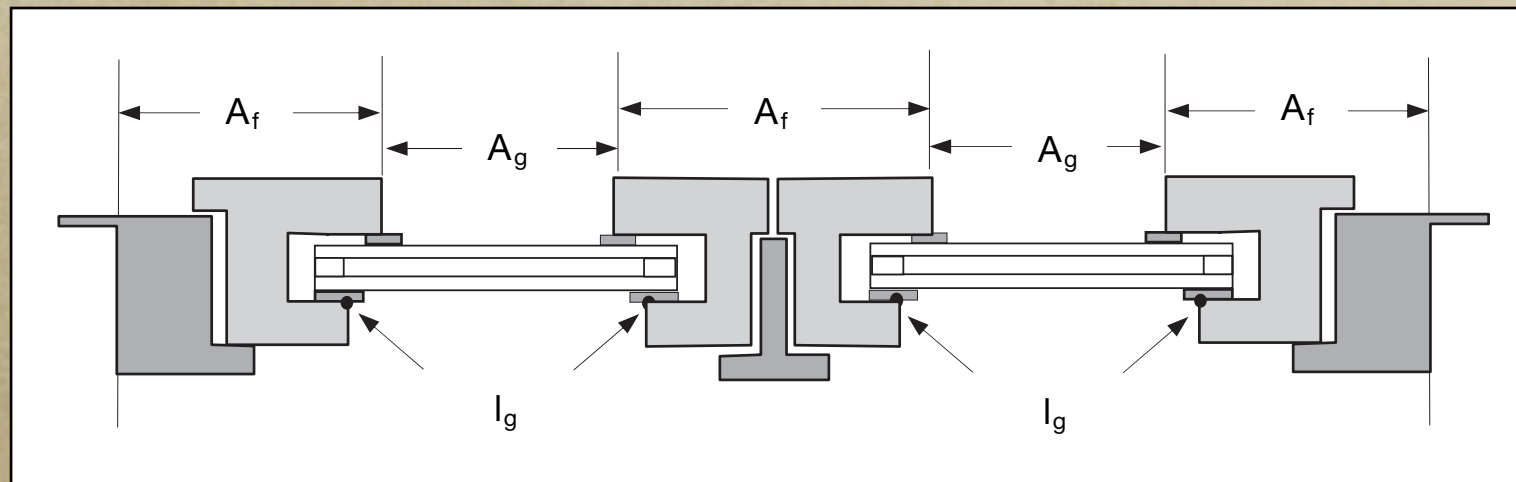
*Paroi vitrée = vitrage + menuiserie
+ éventuellement des volets
+ éventuellement un coffre
(volet roulant)*



*vitrage = une ou plusieurs vitres avec zéro ou plusieurs
cavités non ventilées*

➡ Il faut tout prendre en compte...

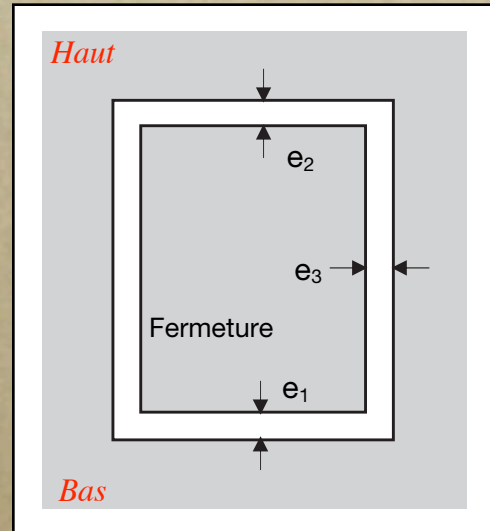
Parois vitrées



Fenêtre sans volet :

$$U_w = \frac{\overbrace{A_g \cdot U_g}^{\text{Vitrage}} + \overbrace{A_f \cdot U_f}^{\text{Cadre}} + \overbrace{\psi_g \cdot l_g}^{\text{Linéaire}}}{A_g + A_f}$$

Parois vitrées : Volets



Classe de perméabilité : $e_{\text{tot}} = e_1 + e_2 + e_3$

R_f étant la résistance thermique de la fermeture, en $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ Ces formules ne sont valables que pour $R_f \leq 0,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

- Classe 1 : Les fermetures de très forte perméabilité : $\Delta R = 0,08$
 $e_{\text{tot}} \geq 35 \text{ mm}$. De plus ces fermetures peuvent comporter en partie courante des ajours complémentaires.
- Classe 2 : Les fermetures de forte perméabilité : $\Delta R = 0,25 R_f + 0,09$
 $15 \text{ mm} \leq e_{\text{tot}} < 35 \text{ mm}$.
- Classe 3 : Les fermetures de perméabilité moyenne : $\Delta R = 0,55 R_f + 0,11$
 $8 \leq e_{\text{tot}} < 15 \text{ mm}$.
- Classe 4 : Les fermetures de faible perméabilité : $\Delta R = 0,80 R_f + 0,14$
 $e_{\text{tot}} \leq 8 \text{ mm}$.
- Classe 5 : Les fermetures de très faible perméabilité : $\Delta R = 0,95 R_f + 0,17$
 $e_{\text{tot}} \leq 3 \text{ mm}$ et $e_1 + e_3 = 0$ ou $e_2 + e_3 = 0$.
 Ces fermetures ne permettent pas d'assurer l'entrée de l'air de ventilation des logements par des orifices disposés dans la menuiserie.

Fenêtre avec volet fermé :
$$U_{wf} = \frac{1}{1/U_w + \Delta R}$$

Parois vitrées : Volets

$U_{jn} = \text{moyenne jour (volets ouverts) / nuit (volets fermés)}$

Jours : volets fermés sur 20% des parois vitrées

Nuits : volets fermés sur 75% des parois vitrées

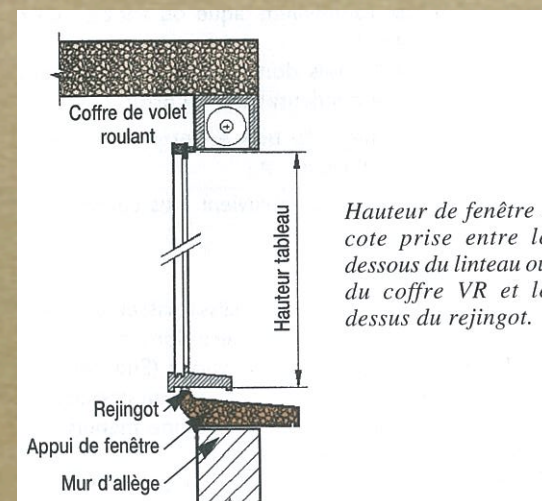
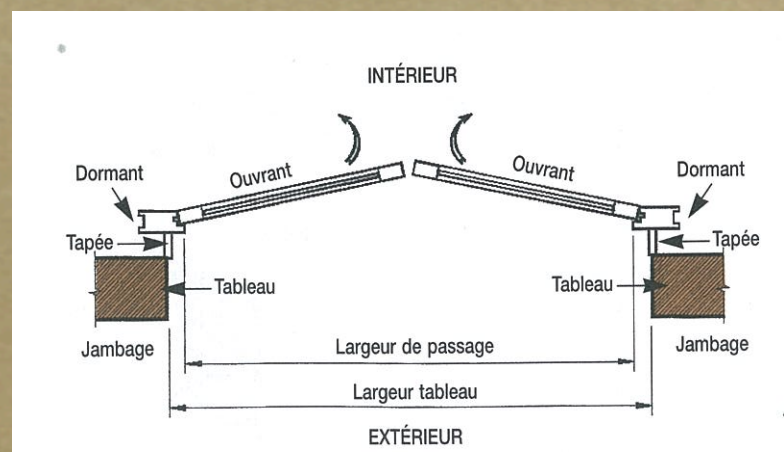
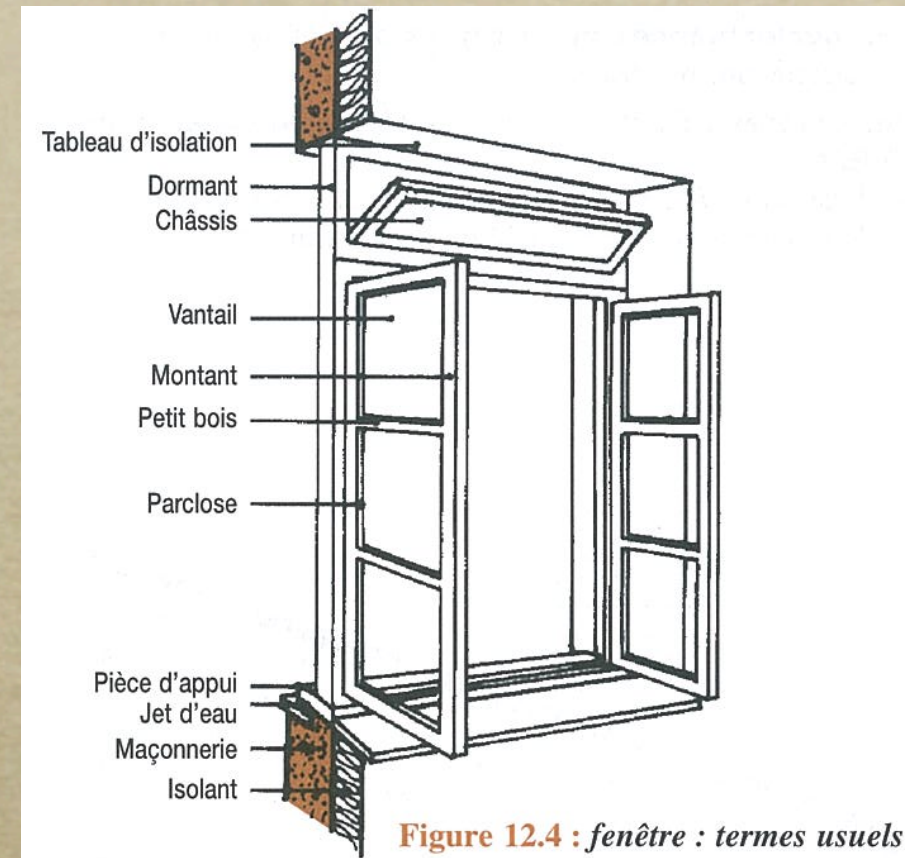
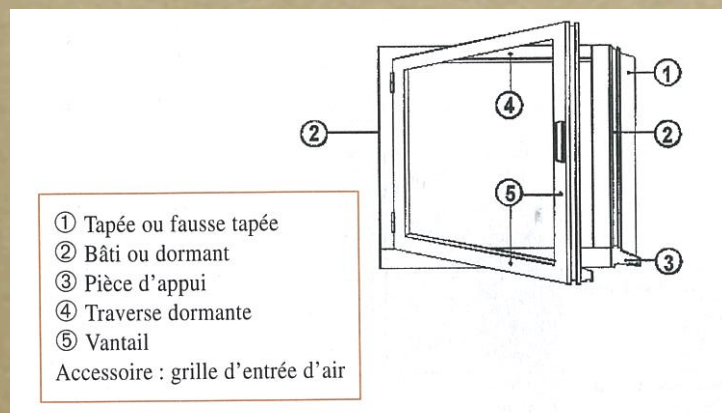
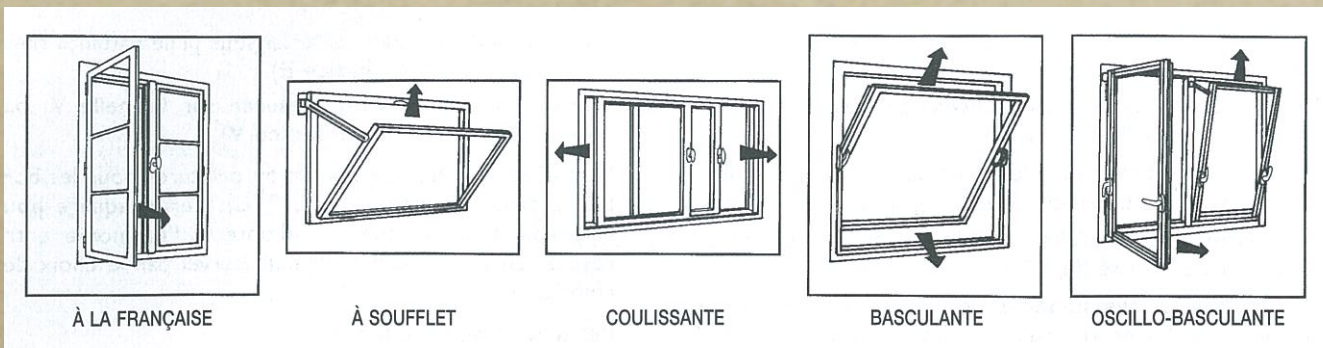
or

Jours : environ 45% des DJU

Nuits : environ 55% des DJU

☞ $0.2 \times 0.45 + 0.75 \times 0.55 \approx 0.50$ soit $U_{jn} \approx \frac{U_w + U_{wf}}{2}$

Terminologie Ouvertures



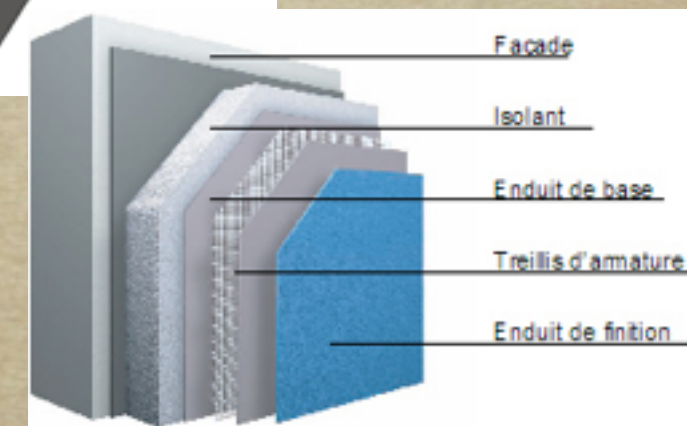
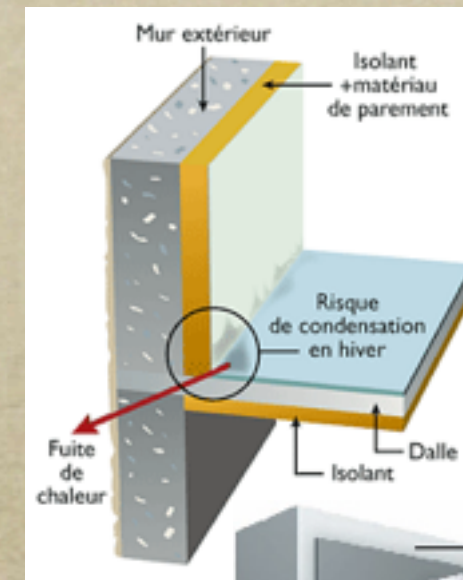
Ponts thermiques

Quelques définitions :

Isolation par l'intérieur : Isolation par une couche isolante appliquée du côté intérieur sur une paroi verticale de l'enveloppe.

Isolation par l'extérieur : Isolation par une couche isolante appliquée du côté extérieur sur une paroi verticale de l'enveloppe.

Isolation répartie : Isolation assurée exclusivement par l'épaisseur de la partie porteuse de la paroi (ex. : blocs à perforations verticales en terre cuite, blocs en béton cellulaire)

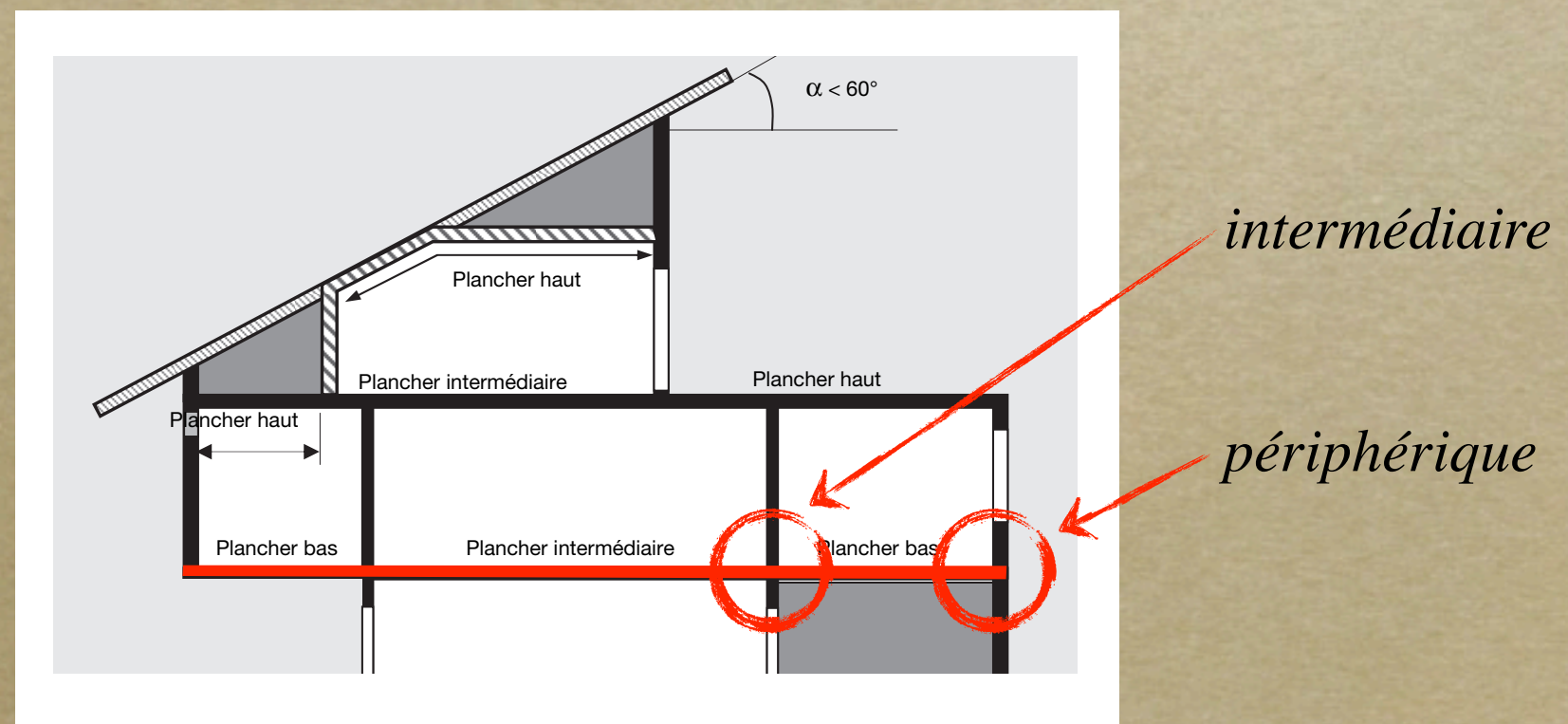


Ponts thermiques











Quelques définitions :

Liaisons périphériques : Liaisons situées au pourtour d'un plancher donné.

Liaisons intermédiaires : Liaisons situées à l'intérieur du pourtour d'un plancher donné.



Ponts thermiques

	Maçonnerie courante
	Béton
	Maçonnerie isolante de type b
	Maçonnerie isolante de type a
	Isolation répartie en béton cellulaire
	Isolation répartie en terre cuite
	Isolant
	Sol
	Entrevous béton ou terre cuite
	Isolation répartie

Quelques définitions :

Maçonnerie courante : Maçonnerie couramment utilisée (à base de béton ou de terre cuite) de conductivité thermique équivalente $\lambda \geq 0,7 \text{ W/(m.K)}$.

Maçonnerie isolante type a : Maçonnerie à isolation répartie de conductivité thermique équivalente $\lambda \leq 0,2 \text{ W/(m.K)}$.

Maçonnerie isolante type b : Maçonnerie à isolation répartie de conductivité thermique équivalente $0,2 < \lambda < 0,4 \text{ W/(m.K)}$.

Plancher en béton plein : Dalle de béton ou plancher préfabriquée en béton plein avec prédalle.

Ponts thermiques

Plancher en béton plein : Dalle de béton ou plancher préfabriquée en béton plein avec prédalle.



Ponts thermiques

(Encore) Quelques définitions :

(Mur de) Refend : Mur porteur situé à l'intérieur de la structure (i.e. pas un mur en contact avec l'extérieur !)

Feuillure : Entaille dans laquelle vient s'insérer une porte ou une fenêtre

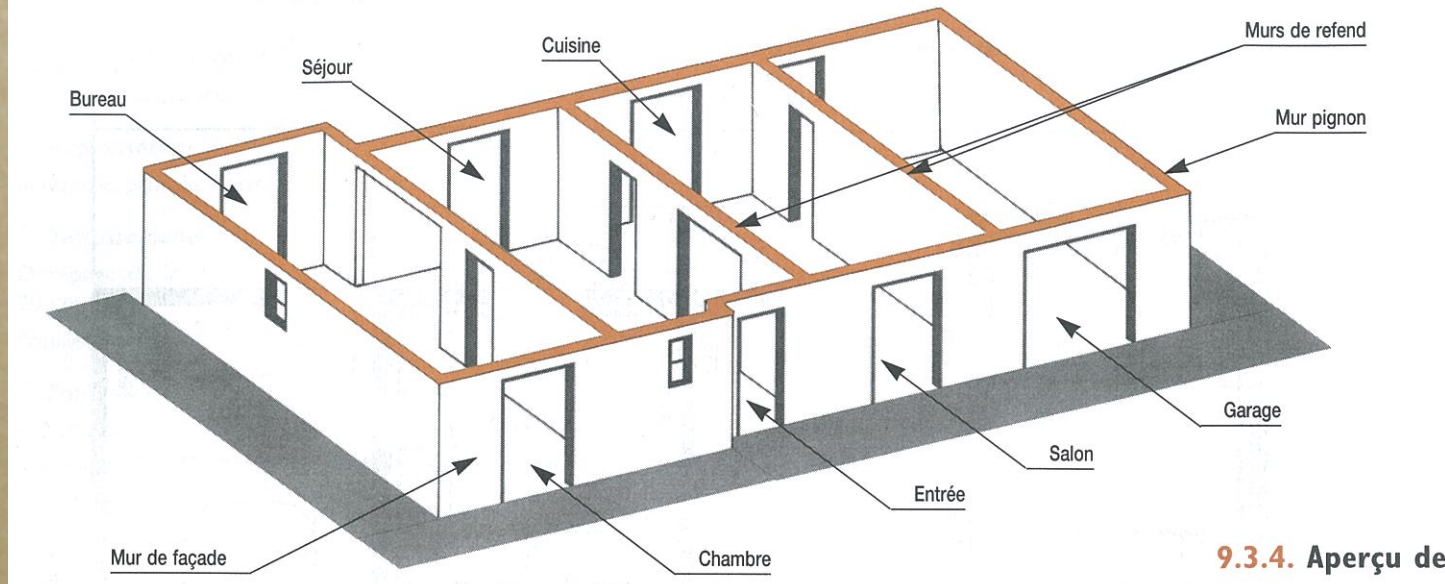
Chainage : Élément de construction en béton armé, qui solidarise les parois et les planchers d'un bâtiment

Poutre : Élément porteur horizontal et linéaire faisant partie de l'ossature d'un plancher de bâtiment

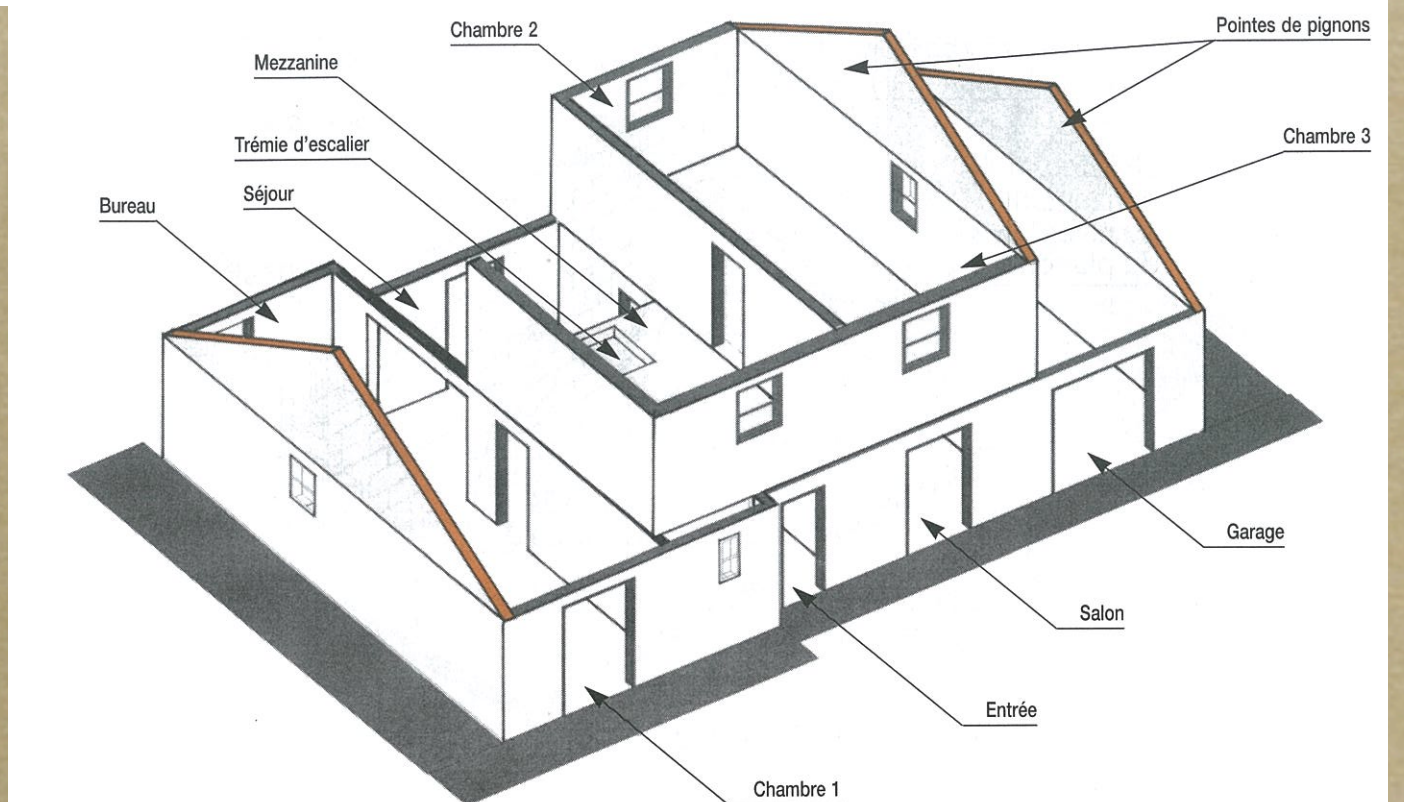
Linteau : Élément servant à soutenir la maçonnerie ou les matériaux du mur au-dessus d'une baie, d'une porte, ou d'une fenêtre.

Ponts thermiques

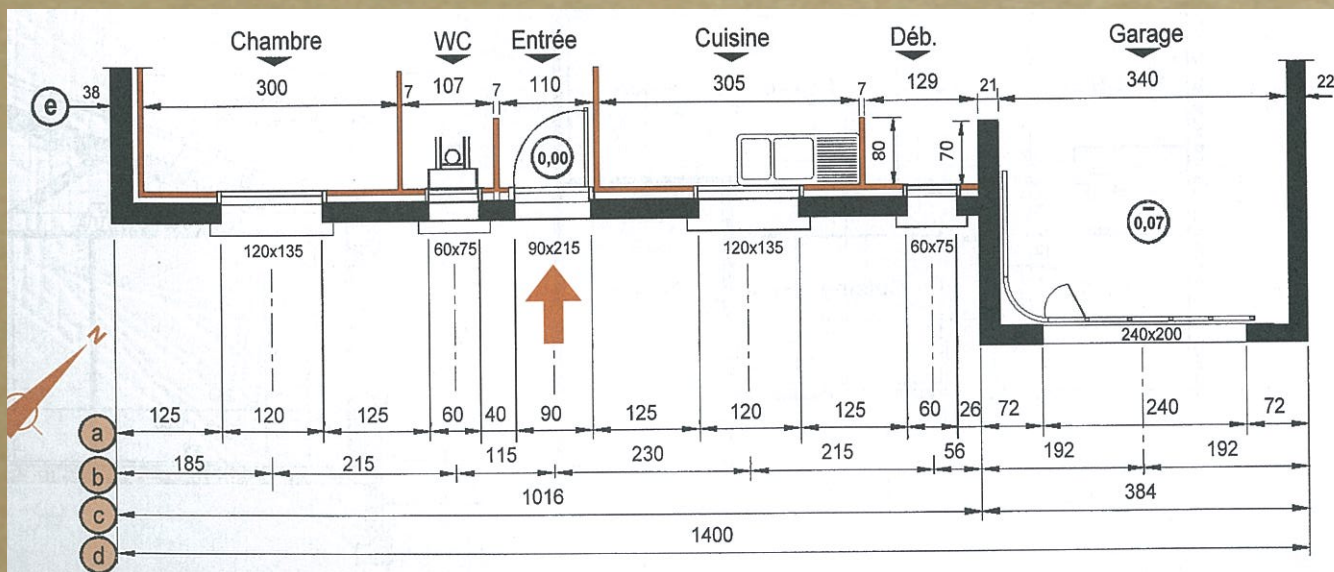
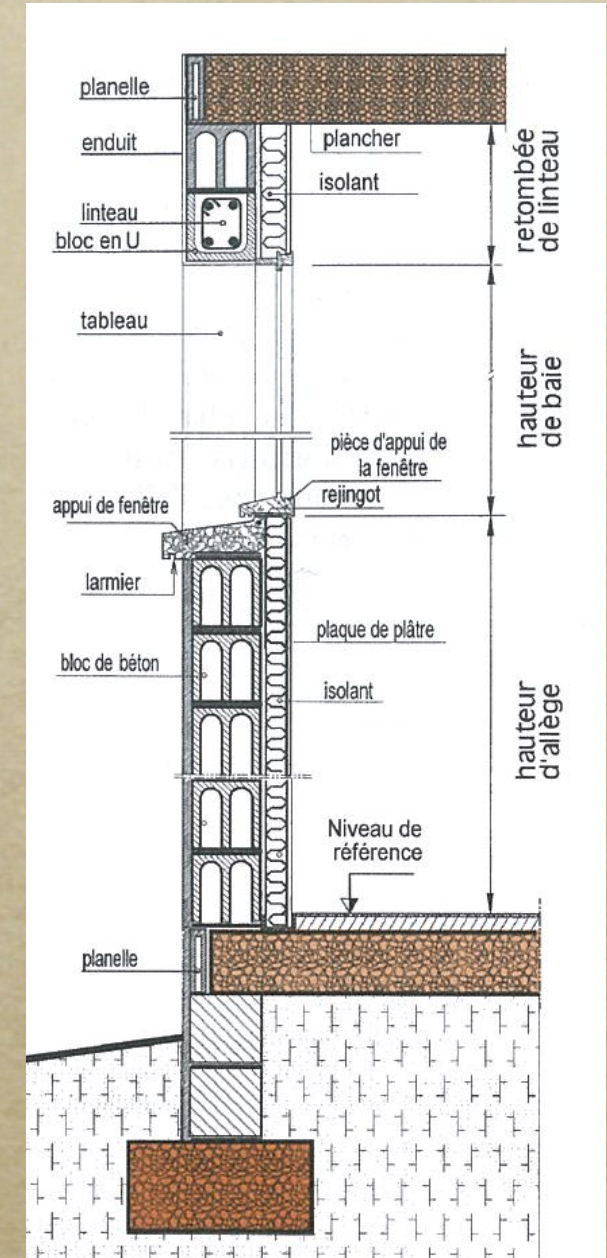
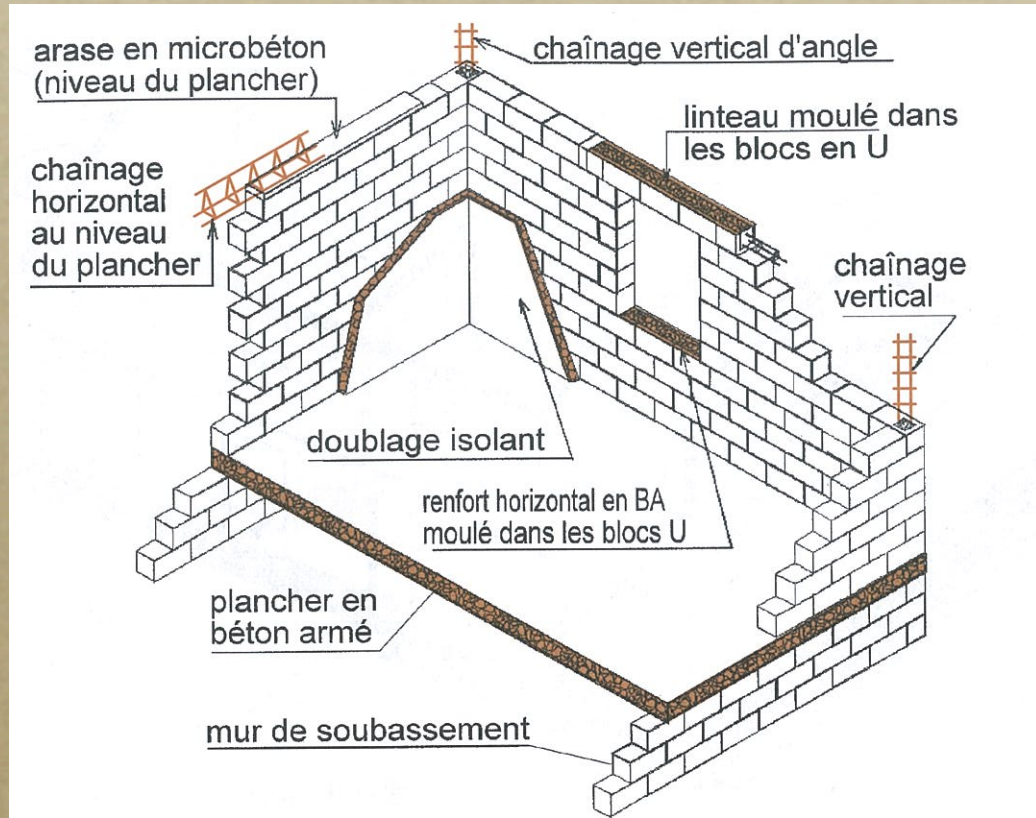
9.3.2. Vue aérienne des murs du rez-de-chaussée



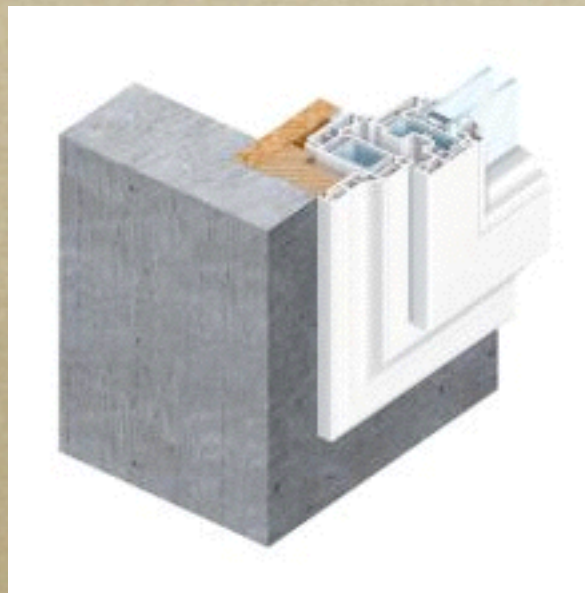
9.3.4. Aperçu des murs porteurs



Ponts thermiques



Ponts thermiques



Valeurs tabulées Ouvertures

Tout est dans le fascicule Th-U 3/5 !!

Nature de la menuiserie	Type de portes	Coefficient U W/(m ² .K)
Portes simples en bois	Portes opaques : - pleines - pleines avec montants de 45 mm	3,5 3,3
	Portes équipées de vitrage simple : - proportion de vitrage < 30 % - proportion de vitrage comprise entre 30 et 60 %	4,0 4,5
	Portes équipées de vitrages doubles à lame d'air de 6 mm quelle que soit la proportion du vitrage	3,3
Portes simples en métal	Portes opaques	5,8
	Portes équipées de vitrages simples quelle que soit la proportion du vitrage	5,8
	Portes équipées de vitrage double : - proportion de vitrage < 30 % - proportion de vitrage comprise entre 30 et 60 %	5,5 4,8
Portes en verre sans menuiserie	Portes en vitrage simple	5,8
Éléments souples battants		5,8

U _w Paroi nue W/(m ² .K)	U _{in} pour une résistance thermique complémentaire ΔR de : m ² .K/W			
	0,08	0,14	0,19	0,25
1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
1,3	1,2	1,2	1,2	1,1
1,4	1,2	1,2	1,2	1,2

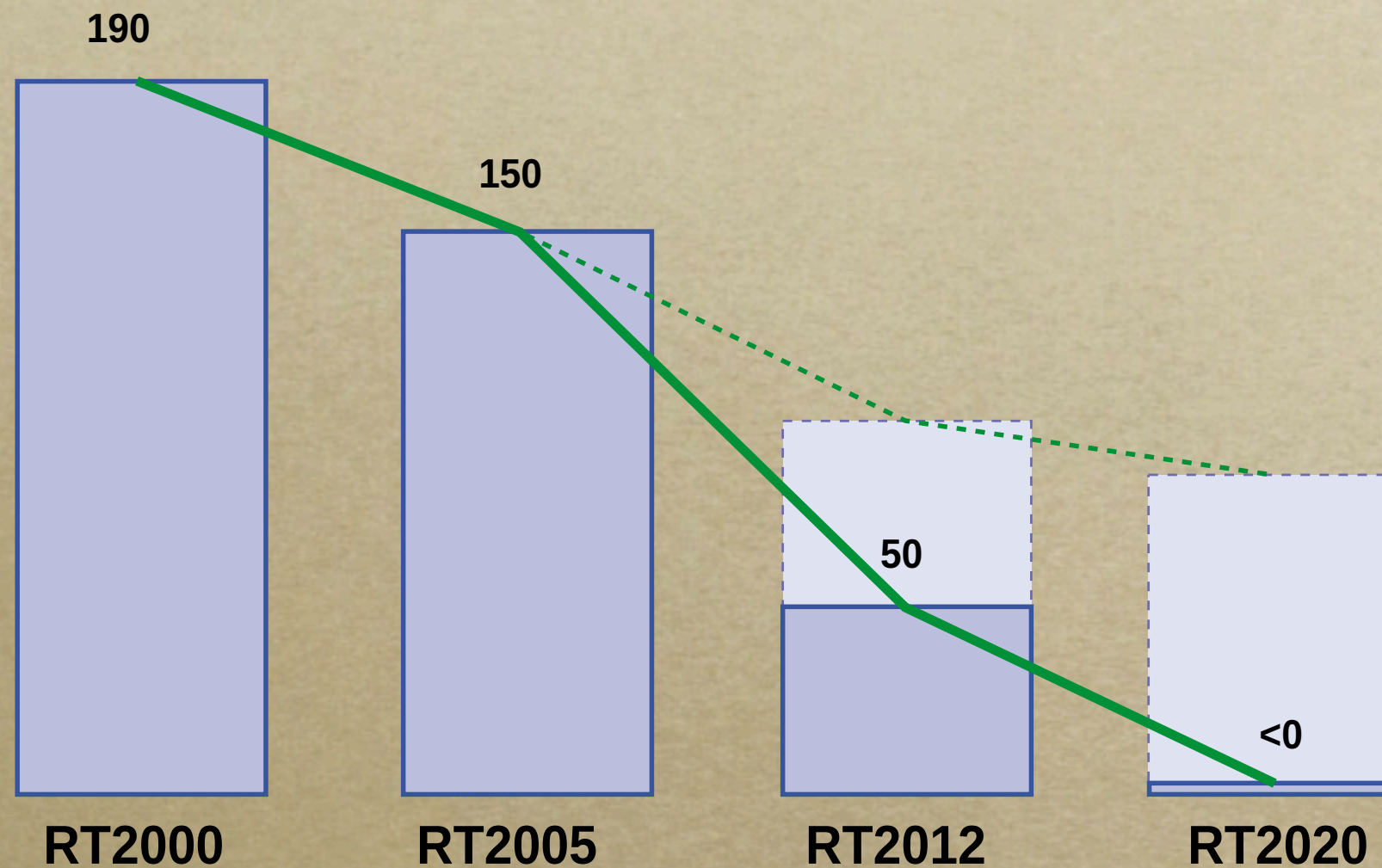
Type de la paroi vitrée	U _g du vitrage W/(m ² .K)	U _w de la paroi vitrée nue en fonction de la conductivité thermique utile du bois W/(m ² .K)	
		λ = 0,13 W/(m.K)	λ = 0,18 W/(m.K)
Fenêtres battantes	1,2	1,8	1,9
	1,3	1,8	2,0
	1,4	1,9	2,1
	1,5	2,0	2,1
	1,6	2,0	2,2
	1,7	2,1	2,2
	1,8	2,2	2,3
	1,9	2,2	2,4
	2,0	2,3	2,4
	2,1	2,3	2,4
	2,2	2,4	2,5

Type de la paroi vitrée	U _g du vitrage W/(m ² .K)	U _w de la paroi vitrée nue en fonction de la conductivité thermique utile du bois W/(m ² .K)	
		λ = 0,13 W/(m.K)	λ = 0,18 W/(m.K)
Portes-fenêtres battantes avec soubassement	1,2	1,8	2,0
	1,3	1,9	2,1
	1,4	2,0	2,1
	1,5	2,0	2,2
	1,6	2,1	2,2
	1,7	2,1	2,3
	1,8	2,2	2,4
	1,9	2,3	2,4
	2	2,3	2,4
	2,1	2,3	2,4
	2,2	2,3	2,5

Réglementation Thermique 2012



Evolution des RTs



- Évolution prévisible sans l'adoption du Grenelle Environnement
- Dynamique de réduction impulsée par le Grenelle Environnement
- Consommations en kWh_{EP}/(m².an)

Principes Généraux

Des exigences
de performance

- Besoin bioclimatique conventionnel $B_{bio} \leq B_{bio_{max}}$
- Consommation conventionnelle d'énergie
 $Cep \leq Cep_{max}$
- Confort d'été $Tic \leq Tic_{ref}$

Des exigences
de moyens

- Perméabilité à l'air
- Traitement des ponts thermiques
- Comptage de l'énergie

$$B_{bio} \leq B_{bio_{max}}$$

L'indicateur B_{bio} ou Besoin bioclimatique exprime la capacité d'une construction à utiliser le moins d'énergie possible pour assurer voire augmenter le confort de vie de ses occupants (le bioclimatique est de retour !).

Le B_{bio} prend en compte les consommations de Chauffage, Climatisation et Eclairage. On doit avoir $B_{bio} \leq B_{bio_{max}}$

$$B_{bio_{max}} = B_{bio_{maxmoyen}} * (M_{bgéo} + M_{balt} + M_{bsurf})$$

Le $B_{bio_{maxmoyen}}$ qui dépend du type d'occupation (2 seulement: bureaux et le reste) et par catégorie (CE1 pas de climatisation nécessaire, CE2 les autres)

$$C_{ep} \leq C_{ep_{max}}$$

L'indicateur C_{ep} (pour consommation en énergie primaire) s'exprime en $kWh_{EP}/m^2_{SHONRT}/an$

Tient compte de 5 postes:

- 1. Chauffage*
- 2. Refroidissement*
- 3. Eau chaude sanitaire*
- 4. Eclairage*
- 5. Auxiliaires de ventilation*

Le calcul se fait sur des scénarios conventionnels (donc non réelles) au pas horaire sur une année entière.

$$C_{ep} \leq C_{ep_{max}}$$

On doit vérifier : $C_{ep} \leq C_{ep_{max}}$

avec $C_{ep_{max}} = 50 \times M_{ctype} \times (M_{cgéo} + M_{calt} + M_{csurf} + M_{cGES})$

- *M_{ctype} : dépend de la nature du logement et de sa catégorie CE1/2*
- *M_{csurf} : est une modulation en fonction de la surface des parties logement (donc 0 en non résidentiel)*
- *M_{cGES} : permet de tenir compte des chauffage bois ou réseau urbain.*
- *M_{calt} : modulation en fonction de l'altitude.*
- *$M_{cgéo}$: modulation en fonction de la zone*

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

Le respect de la Tic (température intérieure conventionnelle) permet d'assurer l'exigence de confort d'été.

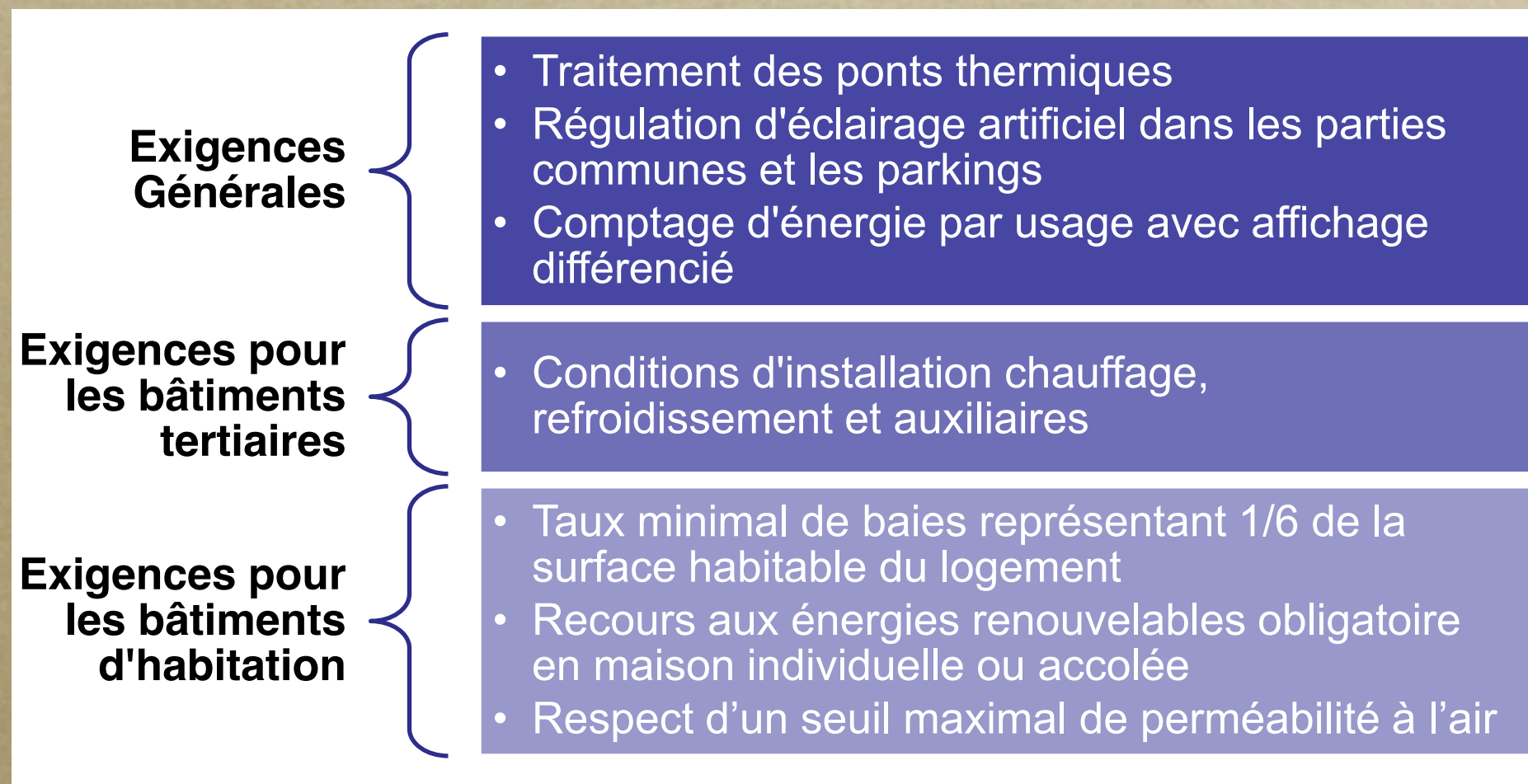
La Tic est la température maximale atteinte au cours des 5 jours les plus chaud de l'année.

On doit avoir $T_{ic} \leq T_{ic_{ref}}$

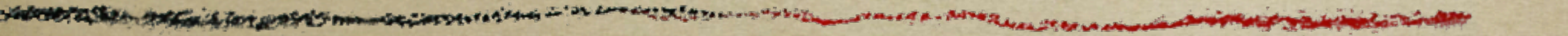
NB : En cours de refonte avec l'introduction de la DIES (Durée d'Inconfort d'Eté Statistique)

Exigences de moyens

Outre les exigences de performances précédents, la RT2012 introduit des exigences de moyens :



Transfert d'humidité



Pourquoi ?

L'air humide est un mélange d'air et de vapeur d'eau, mais la quantité maximale d'eau «vapeur» (i.e. humidité relative de 100%) dépend de la température et décroît avec celle-ci.

Dans le domaine du bâtiment, cela a deux conséquences :

- *La condensation en surface*
- *La condensation en masse*

Qui sont toutes les deux à l'origine de problèmes...

Pourquoi ?

La condensation en surface intervient lorsque un air «chaud et humide» entre en contact avec une surface «froide» : Une partie de l'eau «vapeur» passe à l'état liquide et se dépose sur la surface.

C'est par exemple le cas de la vitre de votre salle de bains après votre douche.

Cela devient beaucoup plus problématique si le «point froid» est dû à un défaut d'isolation ou au mauvais traitement d'un pont thermique. Cette zone humide devient alors le «Club Med» des moisissures !

Pourquoi ?



Pourquoi ?

La condensation en volume concerne la condensation au coeur même des parois.

De même que l'écart de température entre les deux faces crée un gradient dans la paroi et donc un flux de chaleur, la différence «d'humidité» crée un gradient dans le matériau et donc un «écoulement» de l'humidité.

La grandeur pertinente est la pression de vapeur donc on va devoir calculer le profil dans la paroi.

Si la pression de vapeur devient supérieure à la pression de saturation, on a condensation et donc désordre...

Rappels sur l'Air Humide

L'air humide est donc un mélange en proportions variables d'air sec et de vapeur d'eau.

La pression (partielle) de vapeur d'eau $p_v(T)$ est la pression qu'aurait la vapeur d'eau si elle occupait seule le volume du système.

La pression de saturation $p_{v,sat}(T)$ correspond à la pression partielle maximale que peut atteindre $p_v(T)$ sans avoir de condensation

Rappels sur l'Air Humide

$$p_{v,sat}(T) = \begin{cases} 610.5 \cdot \exp\left(\frac{17.269 \cdot T - 4717.03}{T - 35.85}\right) & \text{pour } T \geq 273.15 \text{ K} \\ 610.5 \cdot \exp\left(\frac{21.875 \cdot T - 5975.16}{T - 7.65}\right) & \text{pour } T < 273.15 \text{ K} \end{cases}$$

L'humidité spécifique r (ou rapport de mélange) représente le rapport entre la masse de vapeur et la masse d'air sec (et pas la masse totale...)

A la saturation, on a $r=r_{sat}$

Rappels sur l'Air Humide

*L'humidité relative **HR** (ou φ) est une mesure de la quantité de vapeur d'eau par rapport à la saturation.*

$$\varphi = 100 \cdot \frac{r}{r_{sat}} = 100 \cdot \frac{p_v(T)}{p_{v,sat}(T)}$$

On a donc une humidité relative de 0% pour un air complètement sec et de 100% pour un air saturé.

Enfin, la température de rosée T_r est la température pour laquelle on atteint la saturation pour une composition donnée.

Condensation en surface

Exemple : Condensation en surface.

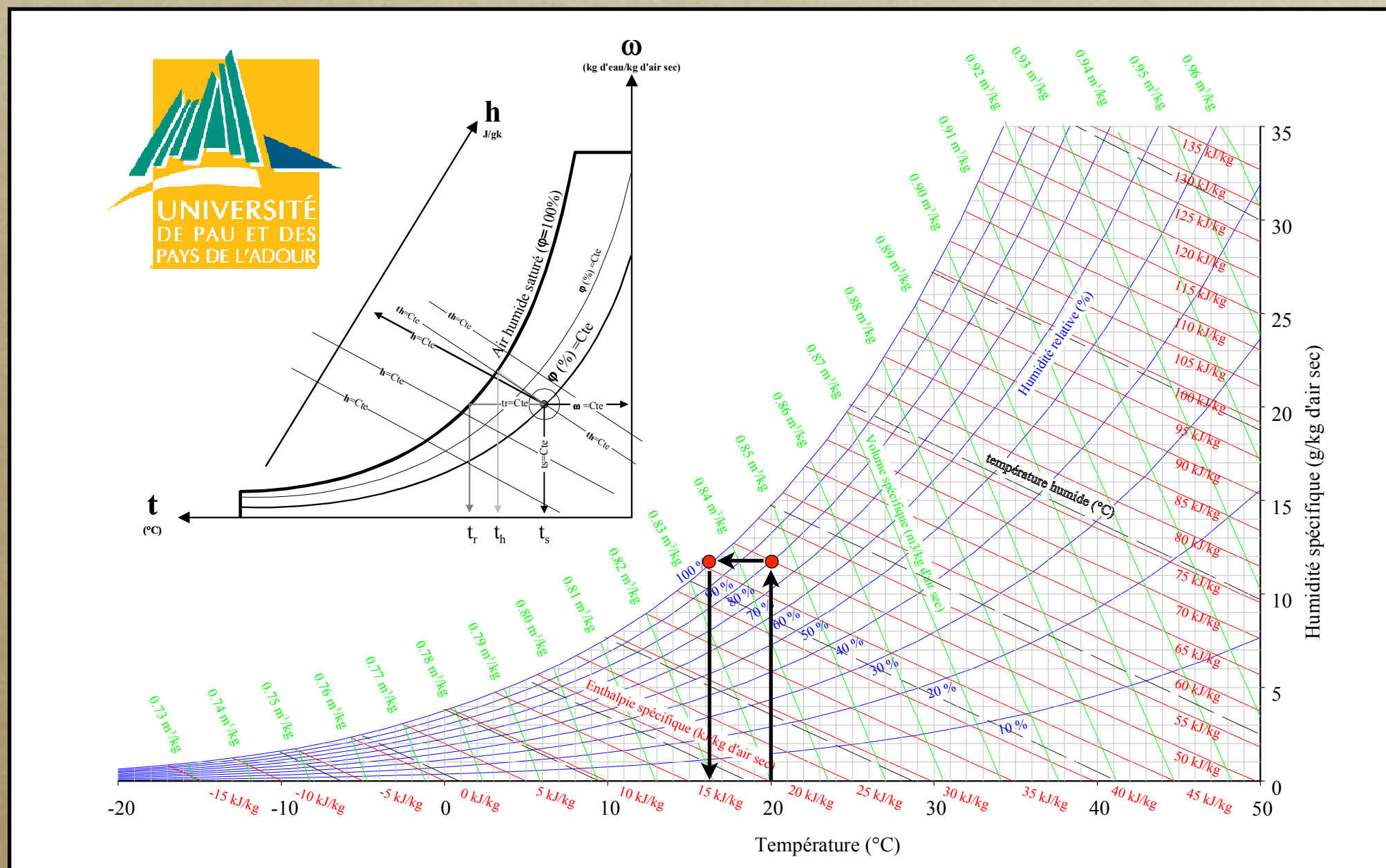
L'air dans ma pièce est à 20°C avec une HR de 80%. Quelle est la température minimale de paroi que je dois maintenir pour éviter la condensation en surface ?

- 1) on calcule $p_{v,sat}=2336.9 \text{ Pa}$ puis $p_v=1869.5 \text{ Pa}$
- 2) on cherche la température T_r telle que $p_{v,sat}(T_r)=p_v$
et on trouve $T_r=16.4^\circ\text{C}$

Donc méfiance si une paroi approche cette température...

Rappels sur l'Air Humide

On peut également faire la même chose à l'aide d'un diagramme :



Condensation en masse

Le critère de condensation est exactement le même que dans le cas précédent i.e. elle intervient partout où $p_v \geq p_{v,sat}$.

Deux difficultés :

- *$p_{v,sat}$ est une fonction de la température et on voit donc apparaître le couplage entre transfert de chaleur et d'humidité*

***Solution** → Calculer le profil de température*

- *Il faut connaître le profil de p_v à l'intérieur du matériau*

***Solution** → Calculer le profil de p_v ! (j'aime les solutions simples)*

Calcul du profil de p_v

On va (encore !) utiliser une approche simplifiée basée sur l'analogie électrique.

On doit d'abord admettre que le «moteur» du «flux d'humidité» au travers de la paroi n'est autre que la pression partielle de vapeur p_v .

Au travers d'une paroi homogène d'épaisseur e , cela donne l'expression suivante :

$$g = \frac{\pi}{e} \cdot \Delta p_v$$

g [kg·s⁻¹·m⁻²] *débit de vapeur saturante*
 π [kg·s⁻¹·m⁻¹·Pa⁻¹] *perméabilité du matériau*

Calcul du profil de p_v

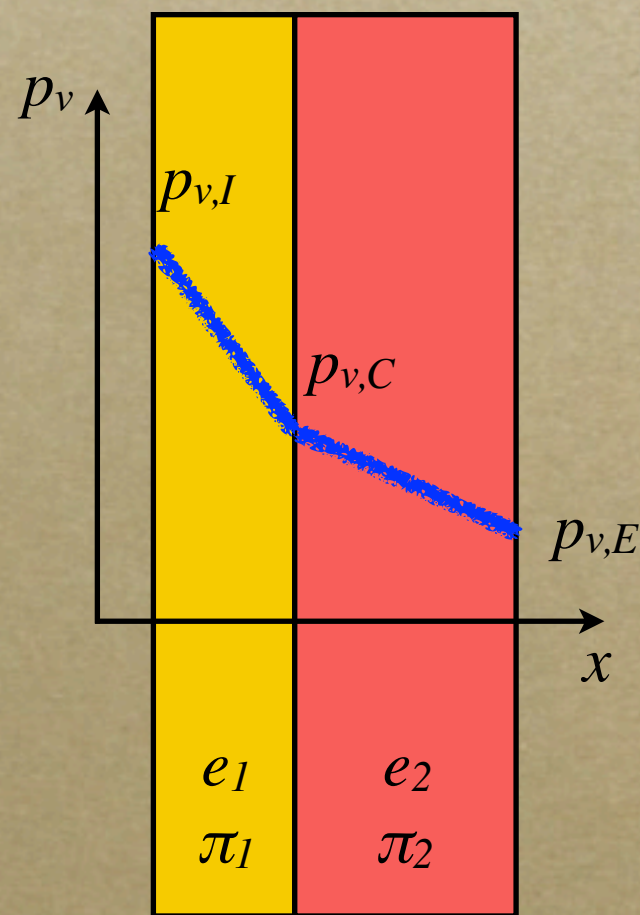
$$g = \frac{\pi}{e} \cdot \Delta p_v \qquad R_d = \frac{e}{\pi}$$

Le rapport $\frac{\pi}{e}$ est appelé perméance de la paroi et son inverse correspond à la résistance à la diffusion de la vapeur R_d .

matériau	π (kg.s ⁻¹ .Pa ⁻¹)
verre, métal, ...	≈ 0
Air au repos (lame d'air)	$210 \cdot 10^{-12}$
Béton plein siliceux ou calcaire sec	$1,6 \cdot 10^{-12}$
terre cuite sèche	$13 \cdot 10^{-12}$
Plâtre, plaques et carreaux	$21 \cdot 10^{-12}$
béton cellulaire sec - $\rho = 400$ à 800 kg.m ⁻³	$21 \cdot 10^{-12}$
laine minérale	$210 \cdot 10^{-12}$
polystyrène expansé	$3,5 \cdot 10^{-12}$
polystyrène extrudé	$1,4 \cdot 10^{-12}$
polyuréthane	$3,5 \cdot 10^{-12}$
mousse phénolique ($\rho = 30$ à 100 kg.m ⁻³)	$4,2 \cdot 10^{-12}$

Calcul du profil de p_v

Un petit exemple ?



$$g = \frac{1/R_1}{\pi_1} \cdot (p_{v,I} - p_{v,C})$$

$$g = \frac{\pi_2}{e_2} \cdot (p_{v,C} - p_{v,E})$$

$$\Rightarrow R = R_1 + R_2$$

$$g = \frac{1}{R} \cdot (p_{v,I} - p_{v,E})$$

$$\frac{p_{v,I} - p_{v,C}}{p_{v,I} - p_{v,E}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$p_{v,C} = p_{v,I} - (p_{v,I} - p_{v,E}) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Les vitesses de transfert dans les matériaux étant très faible, ce sont eux qui sont limitants. Il n'est donc pas utile de prévoir une quelconque résistance de air/paroi.

Calcul du profil de p_v

Dans la RT, la perméabilité est remplacée par le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ qui est simplement le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air sur celle du matériau.

La résistance R_d est donc directement proportionnelle à $e\mu$ qui peut être utilisé directement dans le calcul du profil.

Matériaux ou application	Masse volumique sèche (ρ) en kg/m ³	Conductivité thermique utile (λ) en W/(m.K)	Capacité thermique massique (C_p) en J/(kg.K)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	
				sec	humide
2.3 – PLÂTRES ⁽³⁾					
2.3.1 – PLÂTRES SANS GRANULATS					
• Plâtre « gaché serré » ou « très serré » (plâtre de très haute dureté (THD), plâtre projeté et plâtre fin)	1 200 < ρ ≤ 1 500	0,56	1 000	10	4
	900 < ρ ≤ 1 200	0,43	1 000	10	4
	600 ≤ ρ ≤ 900	0,30	1 000	10	4
	ρ ≤ 600	0,18	1 000	10	4
• Plâtre courant d'enduit intérieur (plâtre fin de construction (PFC) ou plâtre gros de construction (PGC))	1 000 ≤ ρ ≤ 1 300	0,57	1 000	10	6
	ρ ≤ 1 000	0,40	1 000	10	6
• Enduit intérieur à base de plâtre et de sable	ρ ≤ 1 600	0,80	1 000	10	6
• Plaques de plâtres à parement de carton « standard » et « haute dureté » ou éléments préfabriqués en plâtre à parements lisses	750 ≤ ρ ≤ 900	0,25	1 000	10	4
2.3.2 – PLÂTRE AVEC GRANULATS LÉGERS OU FIBRES MINÉRALES					
• Plaques de plâtre à parement de carton « spéciales feu » et plaques de plâtre armées de fibres minérales	800 ≤ ρ ≤ 1 000	0,25	1 000	10	4
• Plâtre d'enduit avec perlite tout venant ou vermiculite					

...puisque le calcul des p_v intermédiaires se fait en utilisant la règle des «ponts diviseurs» qui ne dépend que des valeurs relatives des résistances.

Diagramme de Glaser

On peut maintenant tout recoller tous les morceaux en traçant sur le même graphique :

- 1. le profil de température*
- 2. le profil de pression de saturation (qui dépend de T)*
- 3. le profil de pression de vapeur*

Et si, en un point, la courbe p_v passe au dessus ce $p_{v,sat}$, alors on a un risque de condensation et donc de désordre...

Diagramme de Glaser

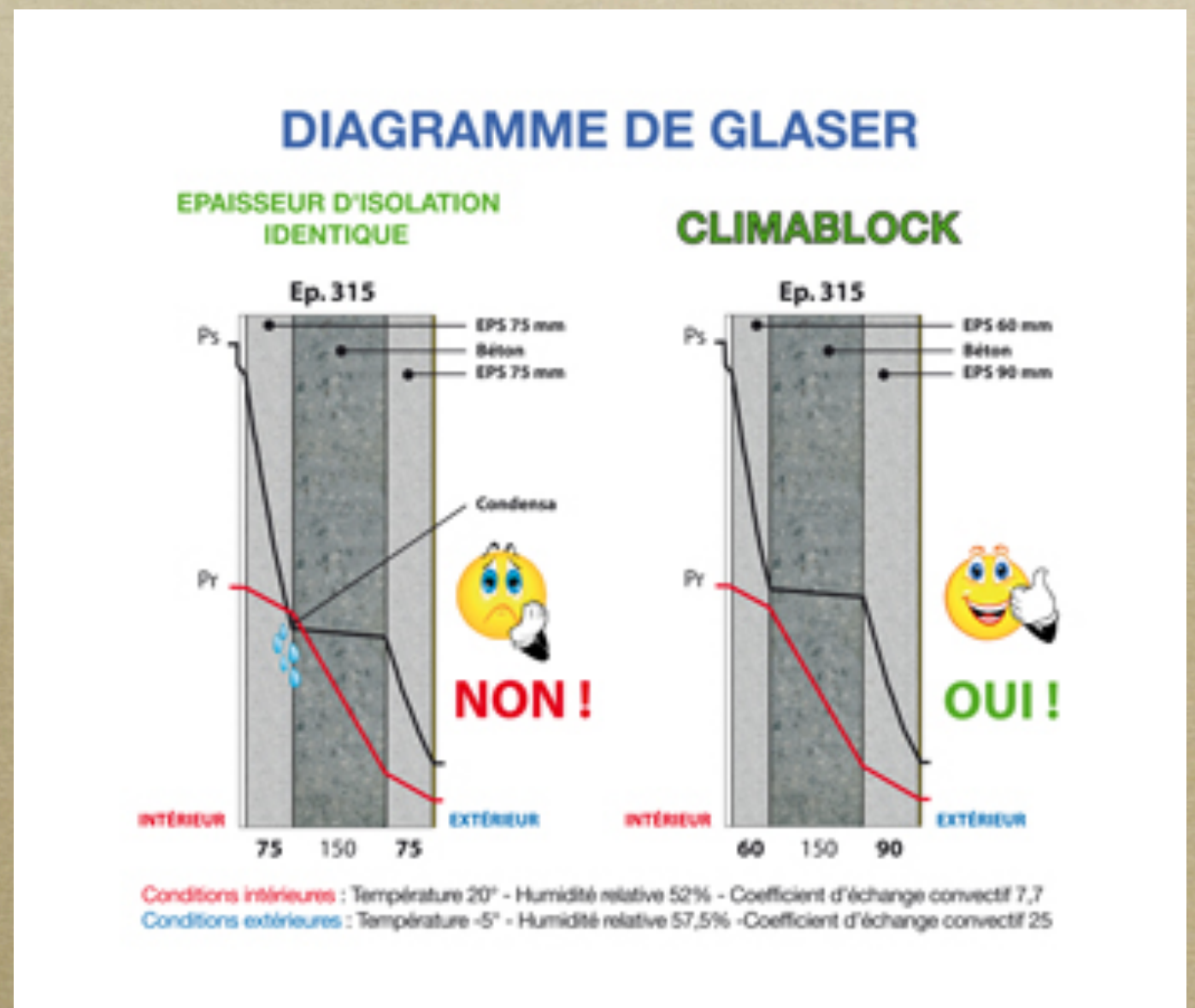
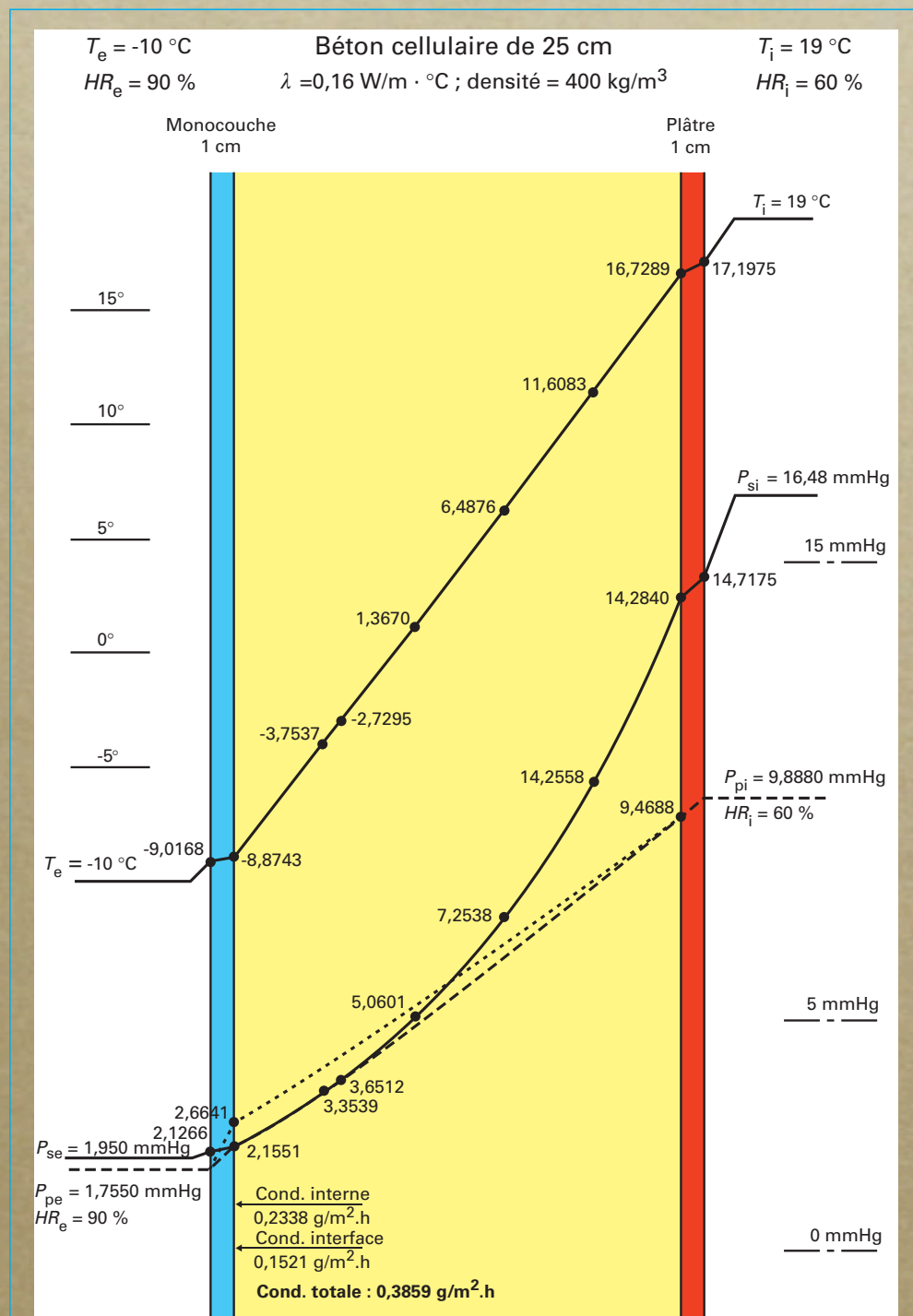
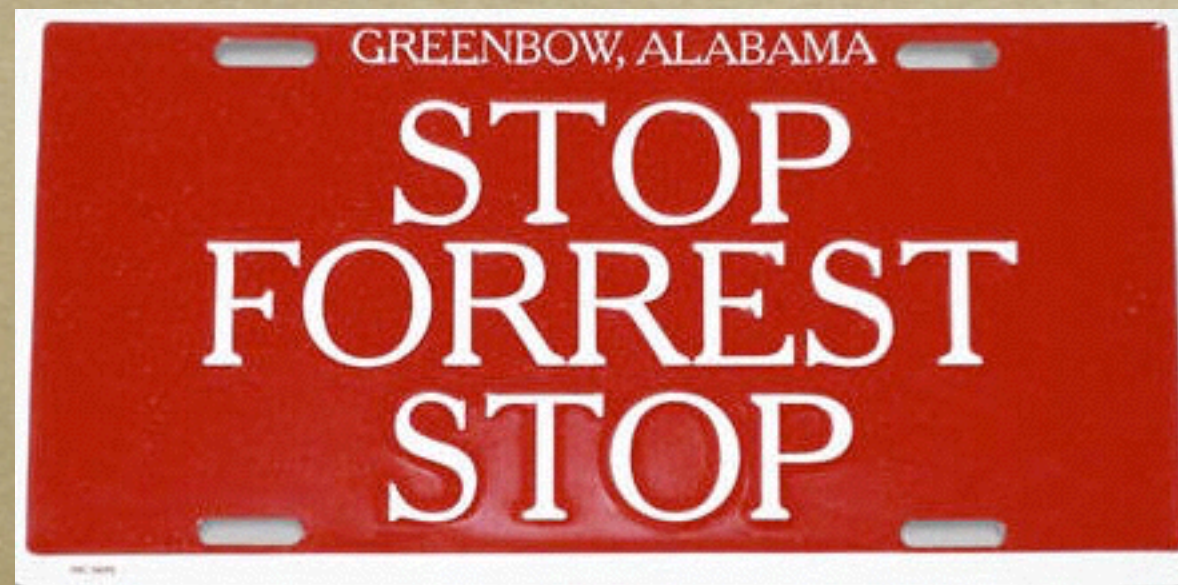


Figure 2 - Diagramme de Glaser pour une paroi de béton cellulaire de 25 cm

Modélisation en dynamique



C'est pour l'an prochain...