

EPSAA - construction A3

Guillaume NICOLAS - 2018-2019 - indA

S2-C01 / Thermique du bâtiment

OBSERVATIONS DE LA SEMAINE

> telegram...

I. Introduction à la thermodynamique ... et au confort thermique

I. Introduction à la thermodynamique

I.a/ classification des disciplines

rappel sur classification des sciences

> zoom sur les sciences physiques, ou sciences de la matière :

physique classique : échelle humaine $10^{-7} \text{ m} < L < 10^{13} \text{ m}$
mécanique, calorique (ou thermodynamique), acoustique, optique,
électromagnétique, chimie

physique quantique : échelle microscopique $L < 10^{-7} \text{ m}$
> ex. technologie laser

physique relativiste (relativité générale) : monde macroscopique $10^{13} \text{ m} < L$
(planètes, trous noirs)
> ex. technologie GPS

I. Introduction à la thermodynamique

I.a/ classification des disciplines

dans le monde du bâtiment, distinction entre :

- **la physique de la matière** : mécanique (+ chimie)
> BET structure (+ matériaux de construction)

- **la physique des ambiances** : thermodynamique, acoustique, optique (lumière), électromagnétique (électricité)
> BET thermique et Pb-CVC (plomberie, Chauffage, Ventilation, climatisation),
BET acoustique, BET éclairagisme, BET électricité (courants forts et faibles)

I. Introduction à la thermodynamique

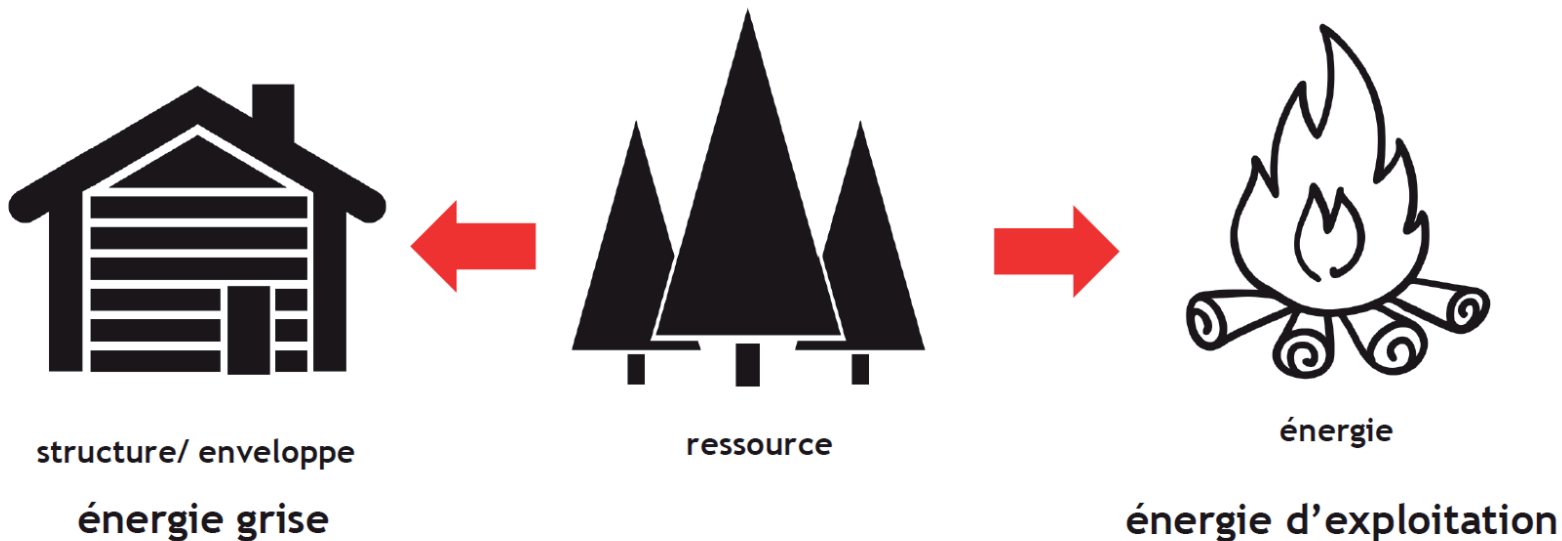
I.b/ Les enjeux de la thermique du bâtiment

1. le confort hygrothermique

hygro- : l'air humide, le taux d'humidité relatif dans l'air
-thermique : la chaleur

2. la consommation d'énergie (d'exploitation)

distinction entre énergie grise
et énergie d'exploitation



I. Introduction à la thermodynamique

I.c/ Qu'est ce que le confort thermique ?

Qu'est ce que le confort thermique ?

place à Jamy...

<https://youtu.be/JdFFCj3EbWs>

I. Introduction à la thermodynamique

I.c/ Qu'est ce que le confort thermique ?

Trois façons d'échanger de la chaleur :

1. par ...

2. par ...

3. par ...

I. Introduction à la thermodynamique

I.c/ Qu'est ce que le confort thermique ?

Trois façons d'échanger de la chaleur :

1. par conduction

de solide à solide

ex. le carrelage froid

2. par convection

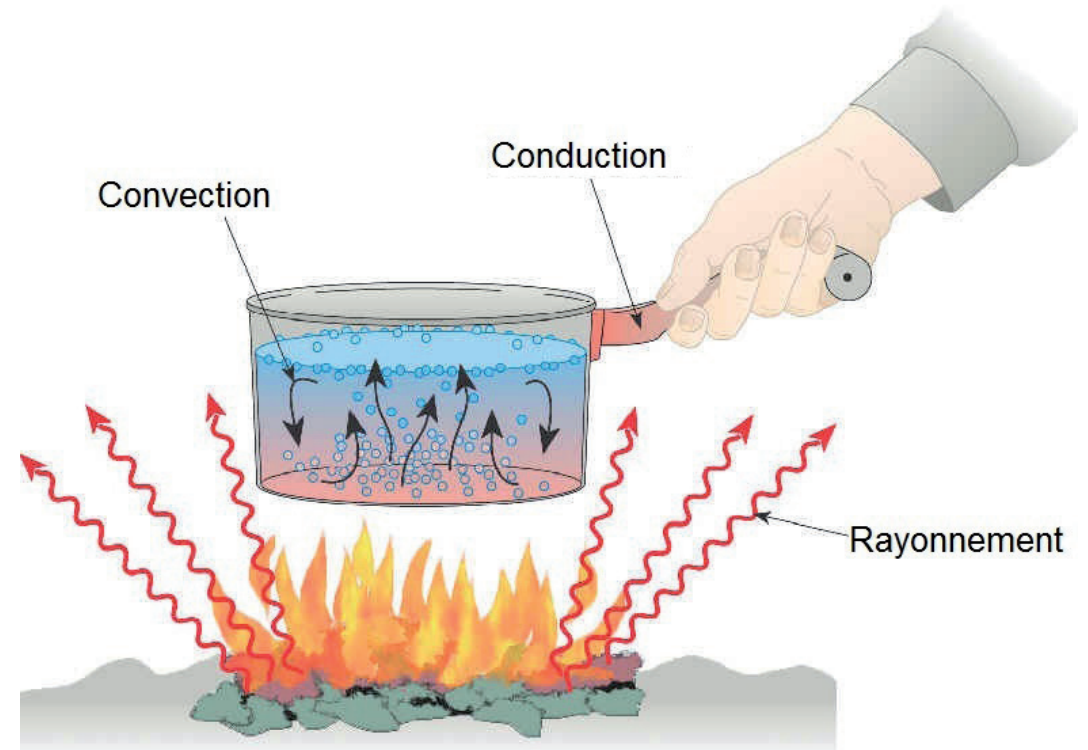
le déplacement de fluides

ex. le vent sur la peau

3. par rayonnement

de surface à surface

ex. le soleil, le feu de cheminée, la paroi froide



source dessin : <https://jjeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>

I. Introduction à la thermodynamique

I.c/ Qu'est ce que le confort thermique ?

Le confort hygrothermique

Wikipedia - *hygrothermie*

Assurer un confort hygrothermique signifie :

- 1. assurer une température constante en toute saison entre 18 et 20 °C,**
- 2. un taux d'humidité de 40 à 60 %**
- 3. et une différence max. de température entre l'air intérieur et les parois de 3 °C**
- 4. vitesse de l'air inférieure à 0,2 m/s en hiver**

Ceci doit permettre d'éviter :

- le dessèchement des muqueuses ou la sensation d'étouffement par excès d'humidité,
- la condensation sur les murs et donc les effets de moisissure,
- la dégradation de certains types d'enveloppe des bâtiments et la dégradation des isolants.

I. Introduction à la thermodynamique

I.c/ Qu'est ce que le confort thermique ?

Le confort hygrothermique

Les paramètres du confort hygrothermique sont :

- l'isolation thermique des parois,
- l'inertie thermique (capacité à stocker la chaleur)
- la protection solaire des parois vitrées,
- la ventilation,
- les systèmes de chauffage et de refroidissement

ATTENTION ! Différence rafraîchissement et climatisation :

rafraîchissement = abaissement de la température de l'air

climatisation = contrôle de la température de l'air et de son taux d'humidité

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

> chapitre II réalisé à partir de Wikipedia - thermique du bâtiment

II.a/ Définition

La thermique du bâtiment décrit les échanges thermiques qui se réalisent **entre un bâtiment et son environnement.**

1. facteurs d'ordre environnemental :

- l'emplacement géographique d'un bâtiment (longitude, latitude, altitude) et les données climatiques afférentes ;
- l'implantation générale du bâtiment : relief accidenté, rase campagne, forêt, contexte urbain ou rural
- la nature du sol ;

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.a/ Définition

2. facteurs d'ordre fonctionnel :

- différent selon habitation, école, entrepôt
- activités physiques et densité de personnes : dégagement de chaleur corporelle
- plages horaires d'occupation, à la semaine, à l'année
- besoins en renouvellement d'air, humidité à évacuer, air frais à apporter
- production de chaleur interne par éclairage et équipements

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.a/ Définition

3. facteurs liés à la nature des matériaux employés dans la construction :

- parois extérieures (murs, planchers et toitures) = surfaces d'échange thermique
 - > variation d'échange selon leur orientation, leur superficie **S**, leur épaisseur **e**, les propriétés thermiques des matériaux qui les constituent (conductivité thermique **λ**)
 - > si surface vitrée, tenir compte de la transmittance des vitres (facteur solaire)
 - > envisager les ombres portées sur le bâtiment et les protections solaires
 - > parois plus ou moins étanches à l'air (source de déperdition thermique)
- parois intérieures considérées dans leur masse et contribuent à ce qu'on appelle **l'inertie thermique** (résistance aux variations de température) et le **déphasage thermique** (confort d'été) : capacité à accumuler et d'autre part à restituer à court ou moyen terme la chaleur accumulée.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.a/ Définition

4. facteurs liés à la perception humaine du confort :

- dépend de la sensibilité, de l'habillement, du métabolisme et de l'activité physique de chaque individu,



Sommeil
40 W



Assis au bureau
65 W



Marche lente
100 W



Marche rapide
140 W



Ménage
160 W



Travail manuel intense
240 W



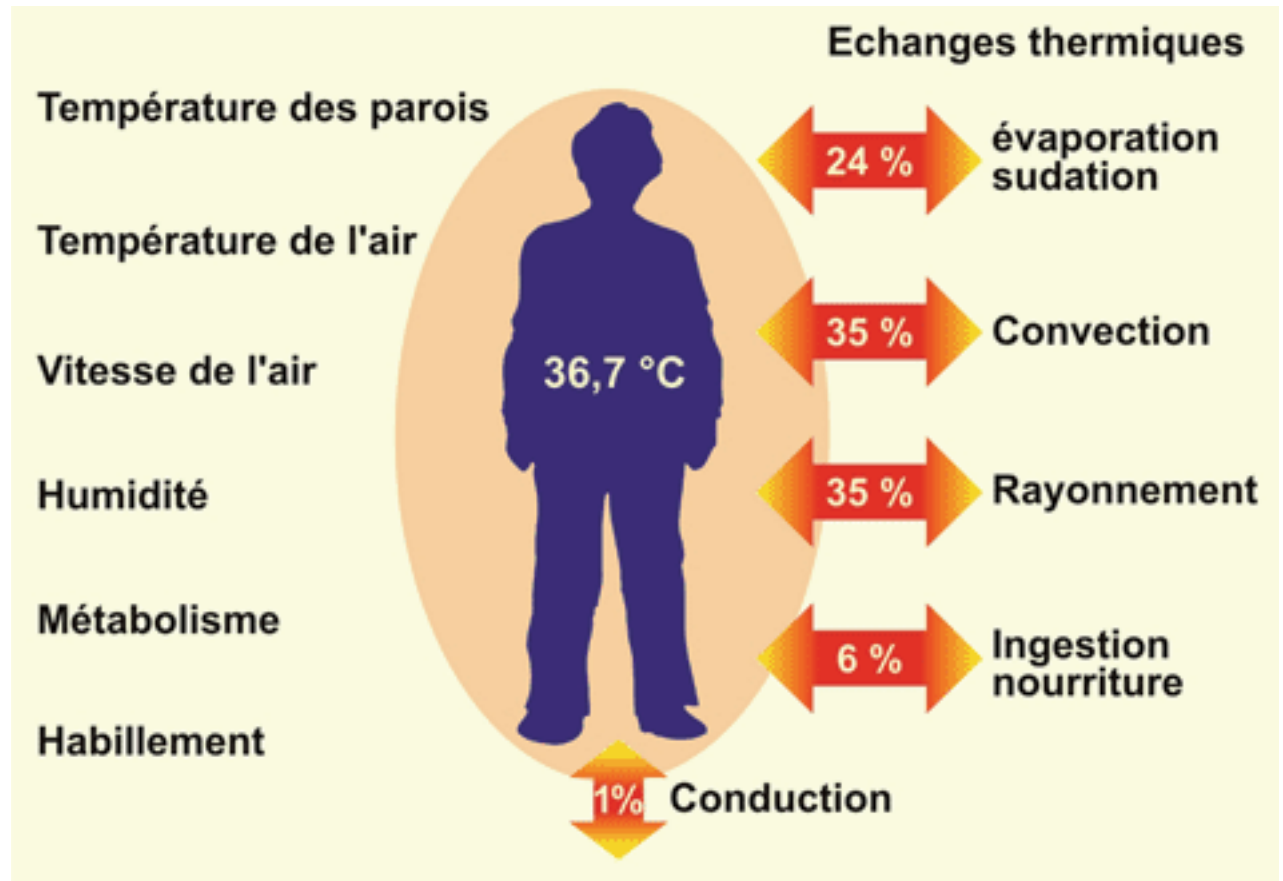
Basket-ball
400 W

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.a/ Définition

4. facteurs liés à la perception humaine du confort :

- dépend aussi de
la température de l'air
la température des parois,
les mouvements d'air,
l'humidité
et de la température du corps

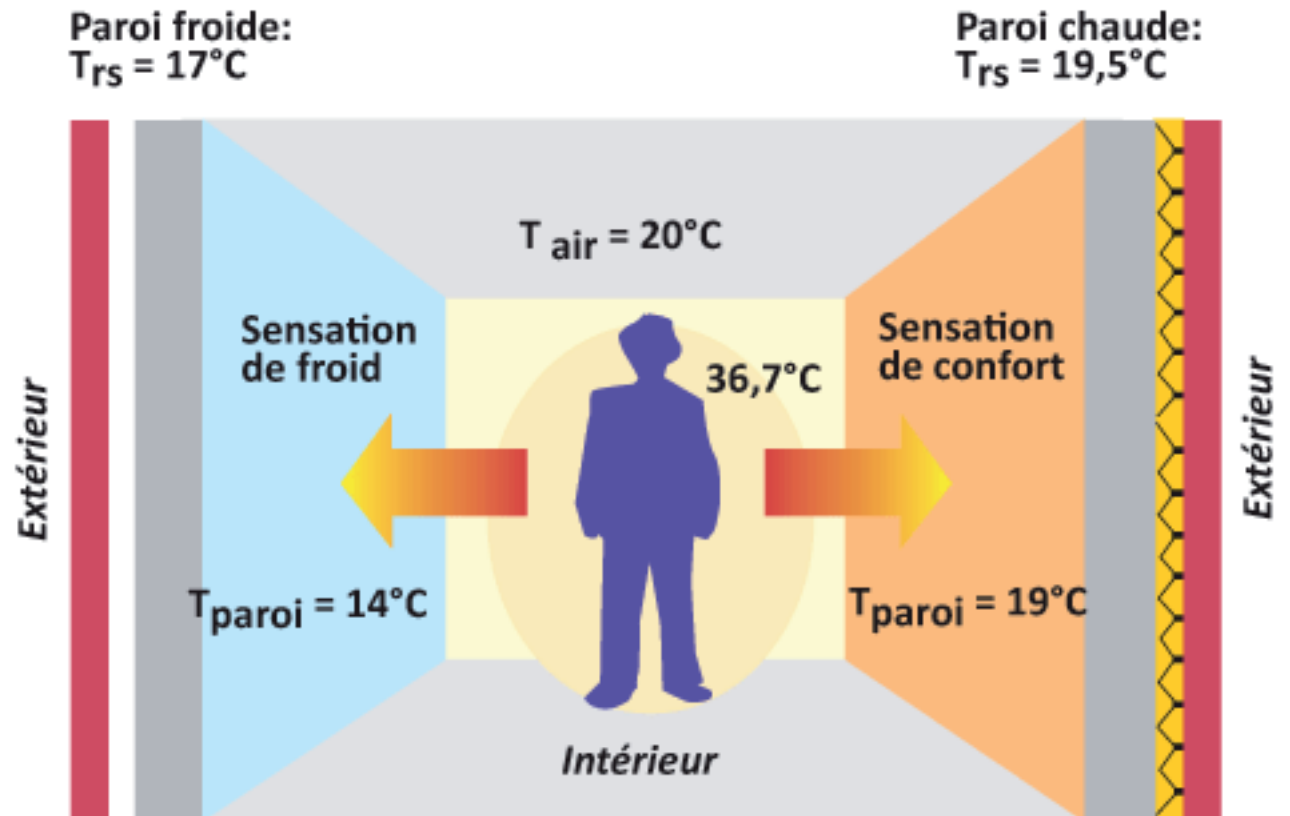


II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.a/ Définition

4. facteurs liés à la perception humaine du confort :

> la combinaison de tous ces facteurs forme la **température ressentie T_{rs}**



II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.b/ Déperdition thermique

Un échange de chaleur se produit entre deux milieux lorsqu'il existe **une différence de température entre ces deux milieux.**

La chaleur se propage **d'un milieu chaud vers le milieu froid** par conduction, rayonnement et convection.

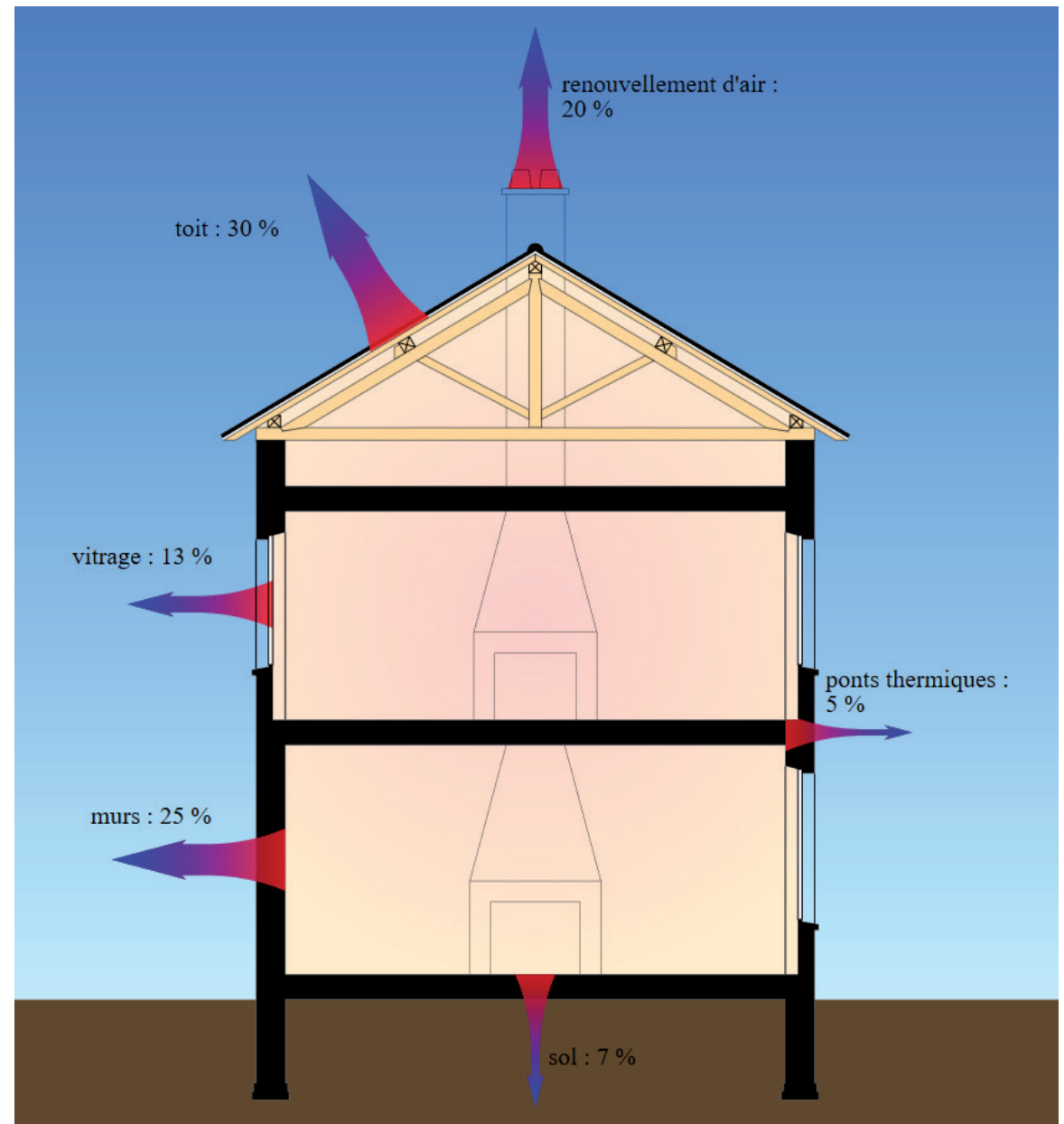
L'« **enveloppe thermique** » d'un bâtiment est la surface qui sépare le volume intérieur chauffé du bâtiment de l'environnement extérieur. Elle est définie par les parois extérieures du bâtiment. C'est autour de cette enveloppe qu'opèrent les échanges de chaleur, appelés aussi transferts thermiques, qui influenceront sur les **besoins de chauffage ou de rafraîchissement du bâtiment.**

De manière générale, depuis le milieu intérieur, les calories atteignent les parois extérieures par convection et rayonnement, passent au travers de celle-ci par conduction, et s'échappent à nouveau par convection et rayonnement.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.b/ Déperdition thermique

Déterminer les **déperditions thermiques** d'un bâtiment revient à calculer les flux thermique additionnés qui traversent ces parois.



II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.b/ Déperdition thermique

Pour les murs

Le mur transmet la chaleur par conduction dans son épaisseur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

Le vent accélère l'échange thermique à la surface extérieure du mur par convection.

Le Soleil chauffe le mur par rayonnement.

Le mur chaud rayonne aussi la nuit vers le ciel.

Pour les fenêtres

La vitre transmet la chaleur par conduction dans son épaisseur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

Le vent refroidit la vitre par convection.

Le Soleil chauffe l'intérieur de la pièce à travers la surface transparente.

L'intérieur de la pièce lui-même perd une partie de son énergie par rayonnement vers l'extérieur. Mais la vitre bloque une grande partie du rayonnement infrarouge émis (principe de l'effet de serre).

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.b/ Déperdition thermique

Pour la toiture

Le Soleil réchauffe le toit par rayonnement.

La chaleur du Soleil est transmise à travers le toit au reste du bâtiment.

Le vent refroidit le toit avec un vent frais.

Pour le plancher

La chaleur est échangée entre le bâtiment et le sol à travers l'épaisseur de la dalle par conduction.

Les échanges convectifs n'interviennent que si la dalle est située sur un vide sanitaire ventilé.

Il n'y a pas d'échange par rayonnement.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.c/ Conductivité thermique

Notée λ , la « conductivité thermique » est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction.

C'est le flux de chaleur qui traverse 1 m^2 d'une paroi de 1 m d'épaisseur lorsque la différence de température entre les deux faces de cette paroi est de 1 degré.

Dans le Système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watt par mètre-kelvin, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Plus λ est petit plus le flux de chaleur est faible et plus le matériau est isolant.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.c/ Conductivité thermique

Quelques valeurs de conductivité thermique à 20 °C :

inox : $46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

granit : $2,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

calcaire : $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

béton : $0,92 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

plâtre : $0,3 \text{ à } 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

chêne : $0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

laine de bois : $0,036 \text{ à } 0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

laine de verre ou de roche : $0,03 \text{ à } 0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

mousse de polyuréthane rigide : $0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

eau : $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

air : $0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.c/ Conductivité thermique

Quelques valeurs de conductivité thermique à 20 °C :

eau : $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

air : $0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

L'eau a une conductivité thermique 25 fois supérieure à celle de l'air : **si l'eau vient à remplacer l'air dans les pores du matériau, la performance de celui-ci s'en trouve gravement amoindrie.**

La pose d'un isolant dans les règles de l'art va donc souvent de pair avec le soin apporté à l'étanchéité et la connaissance en isolation thermique avec la connaissance des habituels problèmes d'humidité dans la construction.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.d/ Résistance thermique

Le flux de chaleur traversant une paroi dépend de son épaisseur et de sa conductivité thermique.

La résistance thermique met en relation l'épaisseur et la conductivité thermique :

$$R = e / \lambda$$

où :

e est l'épaisseur en m

λ est la conductivité thermique en W / K.m

R est la résistance thermique en m².K/W

Plus R est grand plus la paroi est isolante.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.d/ Résistance thermique

application numérique
à partir d'une documentation fabricant



Solutions d'isolation
des Maisons à Ossature Bois

ISOVER
SAINT-GOBAIN

II. Présentation générale de la thermique

II.d/ Résistance thermique

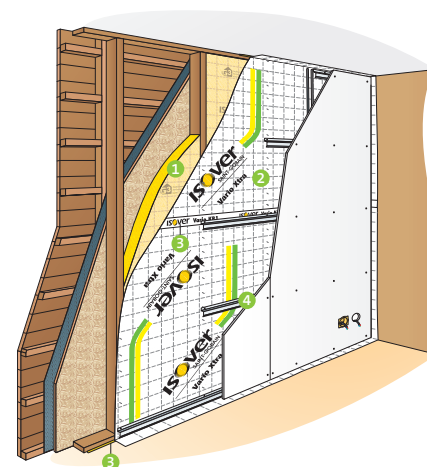
application numérique
à partir d'une documentation fabricant :

« Isomob 32 :
(ép. : 145 mm - $R = 4,50 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) »

Combient vaut λ ?

Isolation des murs ossature bois sous bardage ventilé

Isolation en 1 couche, entre montants
avec membrane positionnée côté chauffé

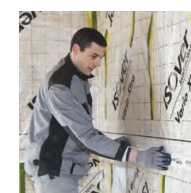


Mise en œuvre

- 1 Mettre en place l'isolant Isomob 32 entre les montants.
- 2 Agrafer la membrane Vario Xtra sur les montants.



- 3 Assurer l'étanchéité à l'air du système à l'aide des accessoires dédiés.
- 4 Fixer les profils Stii® MOB. Passer les gaines et visser le parement sur l'ossature.



Isomob 32
(ép. : 145 mm - $R = 4,50 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)
entre montants

Membrane Vario Xtra
et accessoires dédiés

Résistance thermique : $R = 4,50 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

Performance de la paroi : $U_p = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

Performance acoustique :
 $R_w (C ; C_{tr}) = 47 (-4 ; -11) \text{ dB}^*$

* Valeurs acoustiques obtenues par simulation avec le logiciel AcouS STIFF®

II. Présentation générale de la thermique

II.d/ Résistance thermique

application numérique
à partir d'une documentation fabricant :

« Isomob 32 :
(ép. : 145 mm - $R = 4,50 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$) »

$$R = e/\lambda$$

$$\text{donc } \lambda = e/R$$

$$= 0,145 / 4,50$$

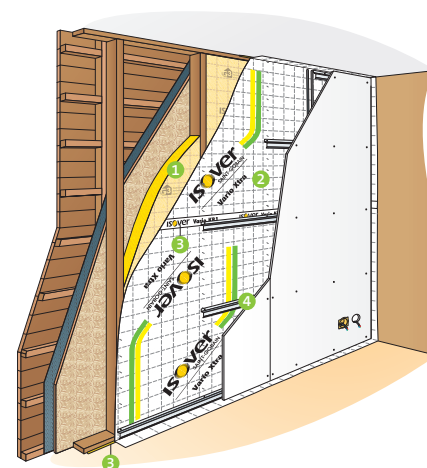
$$= 0,03222 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$$

On retrouve la valeur annoncée
par le fabricant :

Isomob 32 pour $\lambda = 0,032 \text{ m}^2.\text{K}/\text{m}$

Isolation des murs ossature bois sous bardage ventilé

Isolation en 1 couche, entre montants
avec membrane positionnée côté chauffé



Mise en œuvre

1 Mettre en place
l'isolant Isomob 32
entre les montants.



2 Agrafer la membrane
Vario Xtra sur les
montants.



3 Assurer l'étanchéité à
l'air du système à l'aide
des accessoires dédiés.



4 Fixer les profils Stii® MOB.
Passer les gaines et visser
le parement sur l'ossature.



Isomob 32
(ép. : 145 mm - $R = 4,50 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)
entre montants

Membrane Vario Xtra
et accessoires dédiés

Résistance thermique : $R = 4,50 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$

Performance de la paroi : $U_p = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$

Performance acoustique :
 $R_w (C ; C_{tr}) = 47 (-4 ; -11) \text{ dB}^*$

* Valeurs acoustiques obtenues par simulation avec le logiciel AcouS STIFF®

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.d/ Résistance thermique

application numérique

à partir d'une documentation fabricant :

« Isomob 32 :

(ép. : 145 mm - $R = 4,50 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$) »

$\lambda = 0,032 \text{ m}^2.\text{K}/\text{m}$

question subsidiaire : si la réglementation thermique demande une résistance de $R = 6 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$, quelle épaisseur d'isolant faut-il ?

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.d/ Résistance thermique

« Isomob 32 :

(ép. : 145 mm - $R = 4,50 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$) »

$\lambda = 0,032 \text{ m}^2.\text{K}/\text{m}$

question subsidiaire : si la réglementation thermique demande une résistance de $R = 6 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$, quelle épaisseur d'isolant faut-il ?

méthode 1 : $R = e/\lambda$ donc $e = \lambda * R = 0,032 * 6 = 0,192 \text{ m} = 19,2 \text{ cm}$

méthode 2 : $4,50 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ correspondent à 145 mm

donc $6 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ correspondent à $6 * 145 / 4,5 = 193 \text{ mm} = 19,3 \text{ cm}$

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.d/ Transmission calorifique

Le coefficient de transfert thermique U est l'inverse de R.

$$U = 1 / R$$

son unité est l'inverse de celle de R : W/K.m²

Plus U est faible plus la paroi est isolante.

Ce n'est que par commodité de calcul qu'il faut d'abord déterminer R, avant de connaître U.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.e/ Déperdition thermique d'une paroi

En pratique une paroi est constituée de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs et de conductivités différentes.

La résistance thermique totale d'une paroi est la **somme des résistances thermiques de chacune de ses couches**, à savoir :

- La résistance de chacune des couches
- À la surface intérieure et extérieure de la paroi, deux résistances supplémentaires qui sont dues à une mince couche d'air quasi-immobile dans lesquelles la transmission de chaleur se fait **par convection et par rayonnement**.
- La résistance thermique des couches d'air et coulisses ventilées, qui donnent lieu à diverses interprétations, selon qu'elles sont fortement ou faiblement ventilées.
- Un éventuel facteur de correction lié à la mise en œuvre des matériaux

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.e/ Déperdition thermique d'une paroi

Ainsi pour un mur constitué de n couches: $R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se} + R_{cor}$

où :

- R_T est la résistance thermique totale de l'ensemble de la construction;
- R_i est la résistance thermique de chaque couche i constituant la construction;
- R_{si} est la résistance thermique d'échange de la surface intérieure;
- R_{se} est la résistance thermique d'échange de la surface extérieure;
- R_{cor} est le facteur de correction;

Toutes exprimées en **mètre carré-kelvin par watt** ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.e/ Déperdition thermique d'une paroi

Le coefficient de transmission thermique de la paroi s'obtient par la formule

$$U = 1 / R_T$$

Le flux thermique passant à travers la paroi s'obtient par la formule :

$$\Phi = U * \Delta T * S$$

avec :

Φ flux thermique en W

U coefficient de transmission thermique de la paroi en W/K.m²

ΔT la différence de température entre les deux faces de la paroi

S surface de la paroi en m²

vérification dimensionnelle :

$$U * \Delta T * S = [W/K.m^2] * [K] * [m^2] = W$$

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.f/ Déperdition thermique d'une maison

Une maison parallélépipédique est définie par 6 parois : 4 façades, 1 toit, 1 sol.

Si on connaît la composition de chaque façade, on peut calculer la déperdition thermique de la pièce comme la somme des 6 flux thermiques

$$\Phi_{\text{total}} = \Phi_{\text{murs}} + \Phi_{\text{toit}} + \Phi_{\text{plancher}}$$

Et dimensionner ainsi la puissance de la chaudière de la maison.

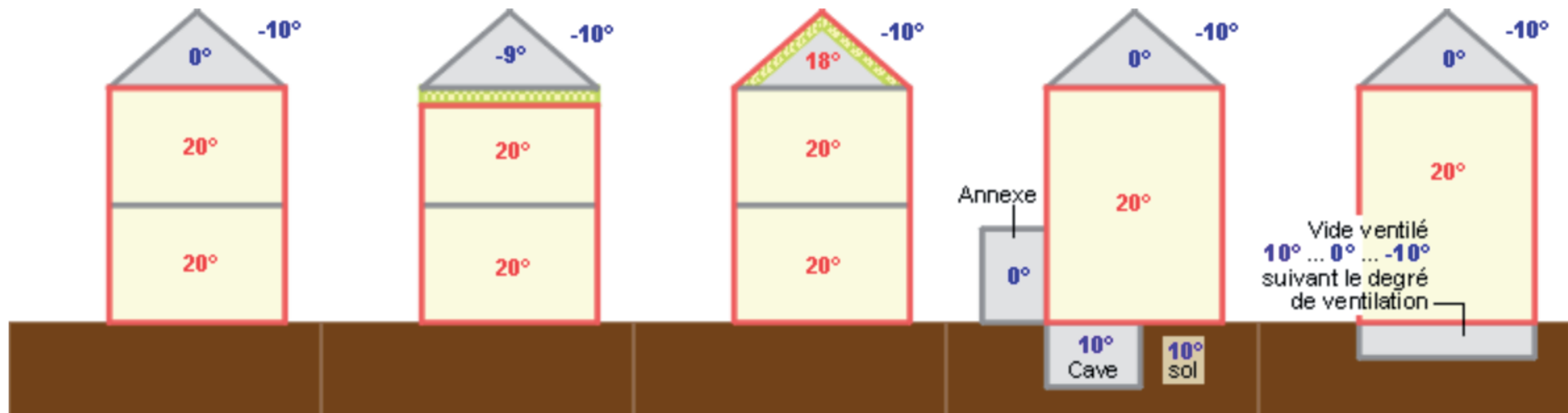
II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.f/ Déperdition thermique d'une maison

Application numérique

Soit une maison de 96 m² (6x16 m) de 3 m de haut au niveau de la future RT 2020 :
R toit = 10 m².K/W et R mur = R sol = 5 m².K/W

Quelles sont les déperditions par conduction avec les températures ci-dessous ?



Estimation des températures équivalentes dans les locaux non chauffés :

En rouge : surface de déperdition et température de consigne choisie dans le volume chauffé.

En bleu : température à considérer du côté "extérieur" de la surface déperditive.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.f/ Déperdition thermique d'une maison

Application numérique

Soit une maison de 96 m² (6x16 m) de 3 m de haut au niveau de la future RT 2020 :

R toit = 10 m².K/W et R mur = R sol = 5 m².K/W

pour mémoire : $\Phi = U \cdot \Delta T \cdot S = \Delta T \cdot S / R$

murs :

$$\Delta T = 20 - (-10) = 30 \text{ °C}$$

$$S = (16+6) \cdot 2 \cdot 3 = 132 \text{ m}^2$$

$$\Phi_{\text{murs}} = 30 \text{ °C} \cdot 132 \text{ m}^2 / 5 = 792 \text{ W}$$

sol :

$$\Delta T = 20 - (10) = 10 \text{ °C}$$

$$S = 96 \text{ m}^2$$

$$\Phi_{\text{sol}} = 10 \text{ °C} \cdot 96 \text{ m}^2 / 5 = 192 \text{ W}$$

toit :

$$\Delta T = 20 - (-10) = 30 \text{ °C}$$

$$S = 96 \text{ m}^2$$

$$\Phi_{\text{toit}} = 30 \text{ °C} \cdot 96 \text{ m}^2 / 10 = 288 \text{ W}$$

total :

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{total}} &= \Phi_{\text{murs}} + \Phi_{\text{toit}} + \Phi_{\text{plancher}} \\ &= 792 + 288 + 192 \end{aligned}$$

$$\Phi_{\text{total}} = \mathbf{1272 \text{ W}}$$

Conclusion : les déperditions sont de 1272 W.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.f/ Déperdition thermique d'une maison

Application numérique

Recommencer le calcul avec les deux maisons ci-dessous qui font toujours 96 m² :

- une maison de plan carré
- puis avec une maison de 24 m de long et 4 m de large

> utiliser un tableur (Excel, OpenOffice, LibreOffice)

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.f/ Déperdition thermique d'une maison

Application numérique

Recommencer le calcul avec les deux maisons ci-dessous qui font toujours 96 m^2 :

- une maison de plan carré
- puis avec une maison de 24 m de long et 4 m de large

comparaison des résultats de 3 maisons de 96 m^2 au sol

maison 6x16 m
1272 W

maison carrée 9,8x9,8 m
1185 W

maison allongée 4x24 m
1488 W

quelle est la grandeur qui a changé entre ces trois maisons ?

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.f/ Déperdition thermique d'une maison

Application numérique

Recommencer le calcul avec les deux maisons ci-dessous qui font toujours 96 m^2 :

- une maison de plan carré
- puis avec une maison de 24 m de long et 4 m de large

comparaison des résultats de 3 maisons de 96 m^2 au sol

maison 6x16 m
1272 W

maison carrée 9,8x9,8 m
1185 W

maison allongée 4x24 m
1488 W

quelle est la grandeur qui a changé entre ces trois maisons ?

> leur compacité : le rapport entre la surface des parois et le volume chauffé

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.g/ Compacité

La compacité géométrique C d'un solide (ou d'un fluide) est le rapport de la totalité de la surface de ses parois S_p par son volume V : **$C = S_p/V$**

Son unité est [1/m]

Dans les trois cas précédents (même surface au sol de 96 m^2 et hauteur 3 m) :

	<u>basique 6x16 m</u>	<u>carrée 9,8x9,8 m</u>	<u>allongée 4x24 m</u>
flux	1272 W	1185 W	1488 W
périmètre faç	$(6+16) \times 2 = 44 \text{ m}$	$9,8 \times 4 = 39,2 \text{ m}^2$	$(24+4) \times 2 = 56 \text{ m}^2$
surface faç	$44 \times 3 = 132 \text{ m}^2$	$39,2 \times 3 = 118 \text{ m}^2$	$56 \times 3 = 168 \text{ m}^2$
surf. toit&sol	96 m^2	96 m^2	96 m^2
surf. tot (S_p)	$96 \times 2 + 132 = 324 \text{ m}^2$	$96 \times 2 + 118 = 310 \text{ m}^2$	$96 \times 2 + 168 = 360 \text{ m}^2$
volume (V)	$96 \times 3 = 288 \text{ m}^3$	$96 \times 3 = 288 \text{ m}^3$	$96 \times 3 = 288 \text{ m}^3$
compacité (C)	$324/288 = 1,13$	$310/288 = 1,08$	$360/288 = 1,25$

> quelle serait la forme de maison la plus compacte ?

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.g/ Compacité

La forme la plus compacte est la sphère.

Si R est son rayon,

sa superficie vaut $S_p = 4\pi R^2$

son volume vaut $V = \frac{4\pi}{3} R^3$

sa compacité vaut : $C = S_p/V = 3/R$

Mais une sphère est bien sûr inhabitable.

On touche là aux limites entre le dimensionnement par le calcul et la conception architecturale.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.g/ Compacité

Pour aller plus loin sur la question de la compacité :

L'exemple de la sphère et le tableau ci-contre montrent que :

- la compacité Sp/V varie en fonction de la forme
- quelle que soit la forme, la compacité diminue d'autant plus que la taille augmente.

Conclusion : ce critère de compacité n'est pas pertinent en architecture.

source :
<https://passivact.fr/Concepts/files/CompaciteBatiment-Consequences.html>

Facteur de compacité Sp/V				
R	Cube	Hémisphère	Cylindre	Sphère
1,00	6,00	4,50	4,00	3,00
2,00	3,00	2,25	2,00	1,50
3,00	2,00	1,50	1,33	1,00
4,00	1,50	1,13	1,00	0,75
5,00	1,20	0,90	0,80	0,60
6,00	1,00	0,75	0,67	0,50
7,00	0,86	0,64	0,57	0,43
8,00	0,75	0,56	0,50	0,38
9,00	0,67	0,50	0,44	0,33
10,00	0,60	0,45	0,40	0,30
11,00	0,55	0,41	0,36	0,27
12,00	0,50	0,38	0,33	0,25
13,00	0,46	0,35	0,31	0,23
14,00	0,43	0,32	0,29	0,21
15,00	0,40	0,30	0,27	0,20
16,00	0,38	0,28	0,25	0,19
17,00	0,35	0,26	0,24	0,18
18,00	0,33	0,25	0,22	0,17
19,00	0,32	0,24	0,21	0,16
20,00	0,30	0,23	0,20	0,15

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.g/ Compacité

Vers un nouveau facteur de compacité adapté à l'architecture : **Sp/SHab**

avec S_p = surfaces des parois en contact avec l'extérieur (mais pas en mitoyen)
et S_{Hab} = la surface habitable

Plus S_p/S_{Hab} est faible, moins il y a de déperditions thermiques.

Il est à noter que, dans les constructions à très hautes performances énergétiques, toutes les parois doivent être traitées avec la même efficacité thermique et, qu'il n'y a, en conséquence, de ce point de vue, aucune raison de faire de distinction entre le sol, les murs ou le toit.

Le facteur de compacité S_p / S_{Hab} permet de comparer la compacité des formes indépendamment de leur taille.

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

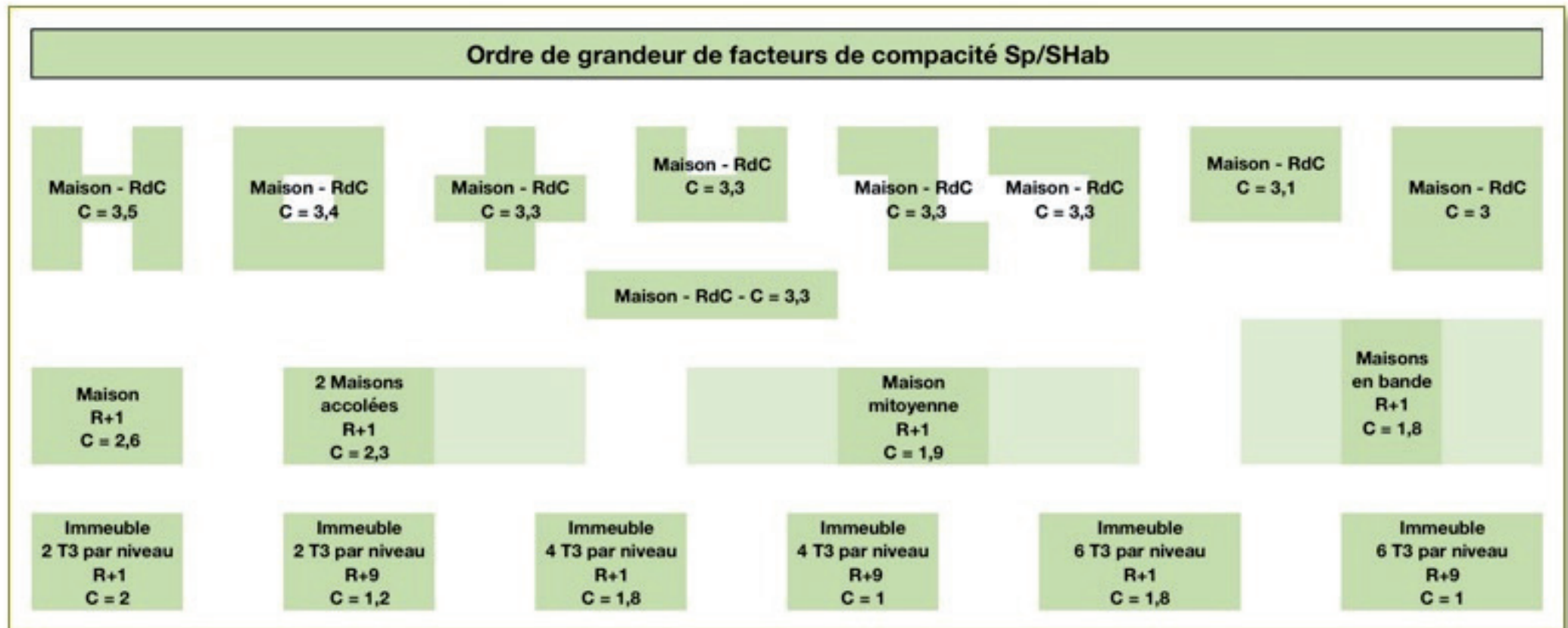
II.g/ Compacité

Evolution du facteur de compacité S_p / S_{Hab} en fonction de la forme et de la taille							
Forme	Dimensions	R	Surface habitable S_{Hab}	Surface des parois S_p	Compacité S_p/S_{Hab}	Volume	Compacité S_p/V
Cube	Cotés : R	1,00 m	1,00 m ²	6,00 m ²	6,00	1,00 m ³	6,00
		3,16 m	10,00 m ²	60,00 m ²		31,62 m ³	1,90
		10,00 m	100,00 m ²	600,00 m ²		1 000,00 m ³	0,60
		31,62 m	1 000,00 m ²	6 000,00 m ²		31 622,78 m ³	0,19
Cylindre vertical	Rayon : R/2 Hauteur : R	1,13 m	1,00 m ²	6,00 m ²	6,00	1,13 m ³	5,32
		3,57 m	10,00 m ²	60,00 m ²		35,68 m ³	1,68
		11,28 m	100,00 m ²	600,00 m ²		1 128,38 m ³	0,53
		35,68 m	1 000,00 m ²	6 000,00 m ²		35 682,48 m ³	0,17
Parallélépipède	Largeur : R Longueur : 2R Hauteur : R	,71 m	1,00 m ²	5,00 m ²	5,00	,71 m ³	7,07
		2,24 m	10,00 m ²	50,00 m ²		22,36 m ³	2,24
		7,07 m	100,00 m ²	500,00 m ²		707,12 m ³	0,71
		22,36 m	1 000,00 m ²	5 000,00 m ²		22 360,65 m ³	0,22
Cylindre vertical	Rayon : R Hauteur : R	,56 m	1,00 m ²	4,00 m ²	4,00	,56 m ³	7,09
		1,78 m	10,00 m ²	40,00 m ²		17,84 m ³	2,24
		5,64 m	100,00 m ²	400,00 m ²		564,19 m ³	0,71
		17,84 m	1 000,00 m ²	4 000,00 m ²		17 841,27 m ³	0,22
Hémisphère	Rayon : R	,56 m	1,00 m ²	3,00 m ²	3,00	,38 m ³	7,98
		1,78 m	10,00 m ²	30,00 m ²		11,89 m ³	2,52
		5,64 m	100,00 m ²	300,00 m ²		376,13 m ³	0,80
		17,84 m	1 000,00 m ²	3 000,00 m ²		11 894,18 m ³	0,25

II. Présentation générale de la thermique du bâtiment

II.g/ Compacité

Pour pouvoir comparer tout projet, des ordres de grandeur ont été calculés à partir de dimensions architecturalement réalistes et en se limitant à des formes de logements traversants pour améliorer le confort d'été.



III. Phénomènes et unités

III. Phénomènes et unités

III.a/ la température

Qu'est-ce que la température ?

III. Phénomènes et unités

III.a/ la température

Qu'est-ce que la température ?

Wikipedia - *température*

«La température est une grandeur physique mesurée à l'aide d'un thermomètre.

Dans la vie courante, elle est reliée aux sensations de froid et de chaud, provenant du transfert thermique entre le corps humain et son environnement.

En physique, elle se définit de plusieurs manières :

- comme fonction croissante du degré d'agitation thermique des particules (en théorie cinétique des gaz),
- par l'équilibre des transferts thermiques entre plusieurs systèmes,
- ou à partir de l'entropie (en thermodynamique et en physique statistique).»

III. Phénomènes et unités

III.a/ la température

Les unités de la température

le degré Celsius °C

> déterminé par les transformations d'état de l'eau

0 °C = passage de l'état liquide à l'état solide (la glace) = la solidification
ou à l'inverse de l'état solide à l'état liquide = la fusion

100 °C = passage de l'état liquide à l'état gazeux (la vapeur d'eau) = l'évaporation
ou à l'inverse de l'état gazeux à l'état liquide = la condensation

dans les conditions standards de pression

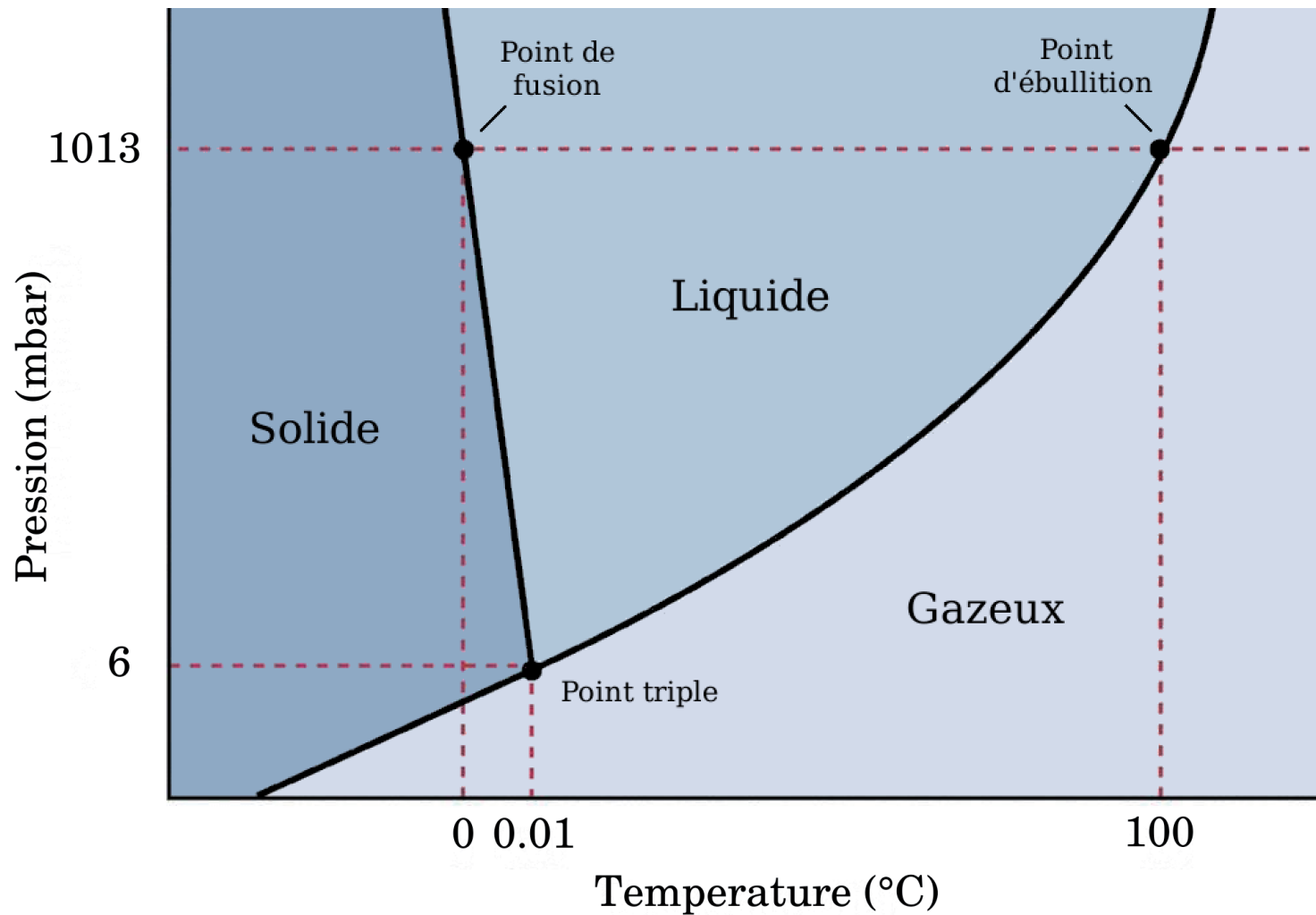
au sommet de l'Everest, l'eau bout à 72 °C car la pression atmosphérique est moindre

à l'inverse dans une cocotte minute, l'eau bout à plus de 100 °C car la pression est plus grande

III. Phénomènes et unités

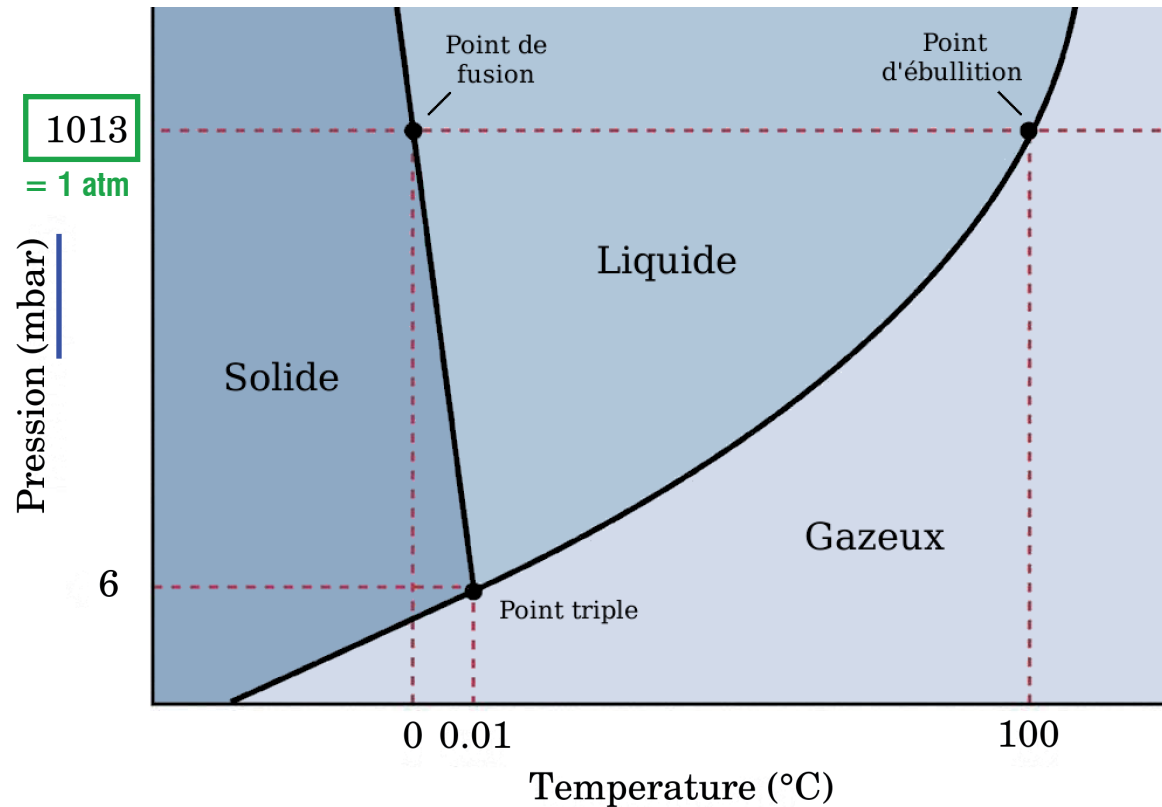
III.a/ la température

diagramme des phases de l'eau



III. Phénomènes et unités

III.a/ la température



> **deux nouvelles unités de pression :**

1 bar = 100 000 Pa = 10^5 Pa (= 10^5 N/m²)

1 atm (atmosphère) = 1013 mbar

= pression atmosphérique au niveau de la mer

III. Phénomènes et unités

III.a/ la température

autres unités de la température

Kelvin, noté K (unité SI) : comme °C avec «translation d'unité» : $0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$
 $0 \text{ K} =$ Le zéro absolu, correspondrait à la limite à une absence totale d'agitation microscopique et

à une température de $-273,15 \text{ °C}$; mais on ne peut jamais l'atteindre (penser que l'entité physique est plutôt $1/T$, et on ne peut jamais atteindre l'infini)

degrés Fahrenheit, noté °F : seulement aux Etats-Unis

cf. roman *Fahrenheit 451* de Ray Bradbury, 1953

$451 \text{ °F} = 232,8 \text{ °C} =$ point d'auto-inflammation du papier

III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

Comment définiriez-vous le phénomène de l'humidité ?

III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

l'humidité, et en particulier l'humidité de l'air

Wikipedia : *humidité*

L'humidité est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance (linge, pain, produit chimique, etc.).

Dans l'air elle peut se mesurer grâce à un **hygromètre** à cheveu ou numérique et **s'exprime en pourcentage le plus souvent.**

Le terme humidité utilisé **dans le langage de la construction** correspond à une présence anormale d'eau dans un bâtiment. Celle-ci peut être sous forme de liquide, de vapeur d'eau ou de remontée capillaire.

III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

sensation d'humidité de l'air

> lorsque l'air est « lourd » en été
(par ex. dans pays tropicaux) :
phénomène de sudation (syn. transpiration)
au moindre effort

pourquoi ?

- > parce que le corps, pour se rafraîchir, produit de la sueur et l'évacue par les pores de la peau (la sudation),
- > mais que l'air ambiant est tellement chargé de vapeur d'eau qu'il ne peut pas absorber en plus la vapeur d'eau produite par la sudation
- > l'eau se condense donc (passage de gaz à liquide) sur la peau



III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

mesure de l'humidité

l'humidité relative de l'air ou degré d'hygrométrie est la proportion d'eau sous forme de vapeur dans l'air dans l'air
notée HR ou φ (phi) se mesure en %

0% d'humidité relative de l'air = air totalement sec (n'existe jamais)

100% d'humidité relative de l'air = air saturé en eau (un hamam)

III. Phénomènes et unités

III.c/ l'énergie

Comment définiriez-vous le phénomène ?

III. Phénomènes et unités

III.c/ l'énergie

définition générale de l'énergie

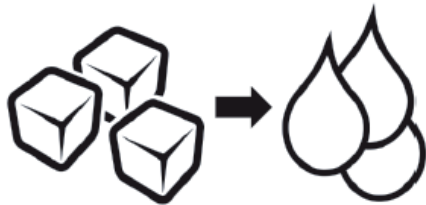
énergie = la mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur

> unité joules [J] et ses dérivés [kJ] ou aujourd'hui kilowatts-heures [kWh]

Transformations possibles



changement de température



changement d'état de la matière



changement de vitesse



changement de composition chimique



changement de rayonnement



changement d'altitude sous gravité



changement de forme



changement de composition du noyau des atomes

III. Phénomènes et unités

III.c/ l'énergie

deux approches :

1. énergie en mécanique = le travail (d'une force)

Le travail d'une force est l'énergie fournie par cette force lorsque son point d'application se déplace (l'objet subissant la force se déplace ou se déforme). Il est responsable de la **variation de l'énergie cinétique** du système qui subit cette force. Si par exemple on pousse une bicyclette, le travail de la poussée est l'énergie produite par cette poussée.

Une force constante \vec{F} qui s'applique sur un objet parcourant un trajet rectiligne \vec{u} fournit un travail W (comme *work* en anglais) :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{u} \quad (\text{produit scalaire de deux vecteurs})$$

analyse dimensionnelle :

$$[J] = [N] \cdot [m] = [N \cdot m]$$

III. Phénomènes et unités

III.c/ l'énergie

deux approches :

2. énergie en thermodynamique = la chaleur

L'énergie thermique est l'énergie que possède une substance en raison de l'agitation de ses particules (atomes ou molécules).

Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés **transferts thermiques**, ou plus communément **chaleur** (à ne pas confondre avec la température !)

On distingue trois types de transfert thermique ou échanges de chaleur, qui peuvent coexister : **la conduction, la convection, le rayonnement.**

La **quantité de chaleur notée Q** , est la quantité d'énergie échangée par ces trois types de transferts, elle s'exprime en joule [J].

III. Phénomènes et unités

III.c/ l'énergie

deux approches :

2. énergie en thermodynamique = la chaleur

Par convention, $Q > 0$ si le système reçoit de l'énergie.

Les échanges de chaleur entre deux corps ou systèmes atteignent un équilibre lorsque la température des corps est égale.

La dissipation d'énergie thermique se fait toujours du corps le plus chaud (celui dont la température est la plus élevée) vers le corps le plus froid.

> Le deuxième principe de la thermodynamique établit l'irréversibilité des phénomènes physiques, en particulier lors des échanges thermiques.

III. Phénomènes et unités

III.d/ la puissance

Comment définiriez-vous le phénomène ?

III. Phénomènes et unités

III.d/ la puissance

Puissance = énergie par unité de temps = unité Watt [W]

**attention au piège : le travail se note W (comme *work*), son unité est le joule [J]
la puissance se note P, son unité est le Watt [W]**

> puissance = énergie / temps : $P = W / t$

> énergie = puissance x temps : $W = P * t$

La puissance reflète la vitesse à laquelle un travail est fourni.

La puissance correspond donc à un débit d'énergie : si deux systèmes de puissances différentes fournissent le même travail, **le plus puissant des deux est celui qui est le plus rapide.**

Pour comprendre, image de l'eau qui coule

> quantité d'eau = débit x temps

III. Phénomènes et unités

III.d/ la puissance

analyse dimensionnelle

$$\text{si } W = P * t$$

$$\text{alors } [W]*[s] = [J]$$

$$\text{et donc } \mathbf{1 J = 1 W.s}$$

$$\text{donc } 3600 J = 3600 W.s$$

or 1 heure fait 60 minutes de 60 secondes chacune, soit 3600 secondes

$$\text{donc } 3600 J = 1W*3600s$$

$$\text{donc } \mathbf{3600 J = 1W.h \text{ noté } 1Wh}$$

la clef pour se souvenir des unités est de repartir de l'expression des phénomènes

relation poids (force en N) et masse (en kg) : $P = m * g$
donc $10 \text{ N} = 1 \text{ kg}$

relation travail (énergie en J), force (en N) et déplacement (en m) :
 $W = F * u$
donc $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$

relation travail (énergie en J) et puissance (en W): $W = P * t$
donc $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$

III. Phénomènes et unités

III.d/ la puissance

analyse dimensionnelle

$$\text{si } W = P * t$$

$$\text{alors } [W]*[s] = [J]$$

$$\text{et donc } \mathbf{1 J = 1 W.s}$$

$$\text{donc } 3600 J = 3600 W.s$$

or 1 heure fait 60 minutes de 60 secondes chacune, soit 3600 secondes

$$\text{donc } 3600 J = 1W*3600s$$

$$\text{donc } \mathbf{3600 J = 1W.h \text{ noté } 1Wh}$$

Pour aller plus loin concernant l'humidité

III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

variables d'état d'un fluide

L'air est un mélange gazeux principalement composé de O_2 (21%) et N_2 (78%).

Tout fluide (liquide ou gazeux) dans une situation donnée (par ex. l'air de la classe) peut être décrit par ces quatre grandeurs physiques (ou « variables d'état ») :

1. sa température T , exprimée en K (kelvin)
2. son volume V , exprimé en m^3
3. sa pression P , exprimée en Pa ou en bar (force répartie sur surface)
> cf. le tympan des oreilles qui perçoit la pression de l'air et de l'eau
4. sa quantité de matière N , exprimée en mol

III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

la loi des gaz parfaits

La loi des gaz parfaits (XIXème siècle) : **$P \cdot V = N \cdot R \cdot T$**
avec R = constante universelle des gaz parfaits

analyse de la loi :

si N et T constants : $P \cdot V = \text{constante}$ > **P et V sont inversement proportionnels**

si V et N constants : $P = T \cdot \text{constante}$ > **P et T sont proportionnels**

si P et N constants : $V = T \cdot \text{constante}$ > **V et T sont proportionnels**

évaporation verre d'eau => présence de vapeur d'eau dans l'air

III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

la loi des gaz parfaits

analyse dimensionnelle de la constante R

$$P \cdot V = N \cdot R \cdot T \quad \text{donc } R = P \cdot V / (N \cdot T)$$

$$\text{soit } R = [\text{Pa}] \cdot [\text{m}^3] / ([\text{mol}] \cdot [\text{K}])$$

$$\text{or } [\text{Pa}] = [\text{N}/\text{m}^2]$$

$$\text{donc } R = [\text{N}/\text{m}^2] \cdot [\text{m}^3] / ([\text{mol}] \cdot [\text{K}]) = [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

or $R = 8,314\,462\,1 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ avec J l'énergie du gaz en joule (Wikipedia - *gaz parfait*)

$$\text{donc } [\text{J}] = [\text{N} \cdot \text{m}]$$

III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

une question de pressions

évaporation verre d'eau => présence de vapeur d'eau dans l'air

attention, comme tout gaz, la vapeur d'eau est invisible !

les nuages dans le ciel ne sont pas de la vapeur d'eau, mais de la condensation en gouttelettes, de même que la buée quand on respire

tant que la pression partielle de l'eau (P_{pe}) dans l'air < pression de vapeur saturante (P_{vs}), il y a possibilité d'évaporation du verre d'eau

si $P_{pe} = P_{vs}$, il n'y a plus d'évaporation, il y a équilibre

humidité relative = P_{pe} / P_{vs}
exprimé en %

III. Phénomènes et unités

III.b/ l'humidité de l'air

principe physique du point de rosée

Wikipedia : *point de rosée*

L'air contient toujours une certaine proportion de vapeur d'eau.

La pression partielle exercée par cette vapeur est inférieure ou égale à une valeur maximale qui dépend de la température ambiante : **la pression de vapeur saturante**

Si l'air humide est progressivement refroidi à pression constante, la pression de vapeur d'eau ne change pas mais la valeur maximale diminue jusqu'à ce que les deux deviennent égales.

La température de rosée correspond à la saturation de l'air et tout refroidissement subséquent conduit à l'apparition d'eau sous phase liquide.

C'est le phénomène de condensation, qui crée les nuages, la brume et la rosée en météorologie. La condensation atteint de la même manière les parois des bâtiments.