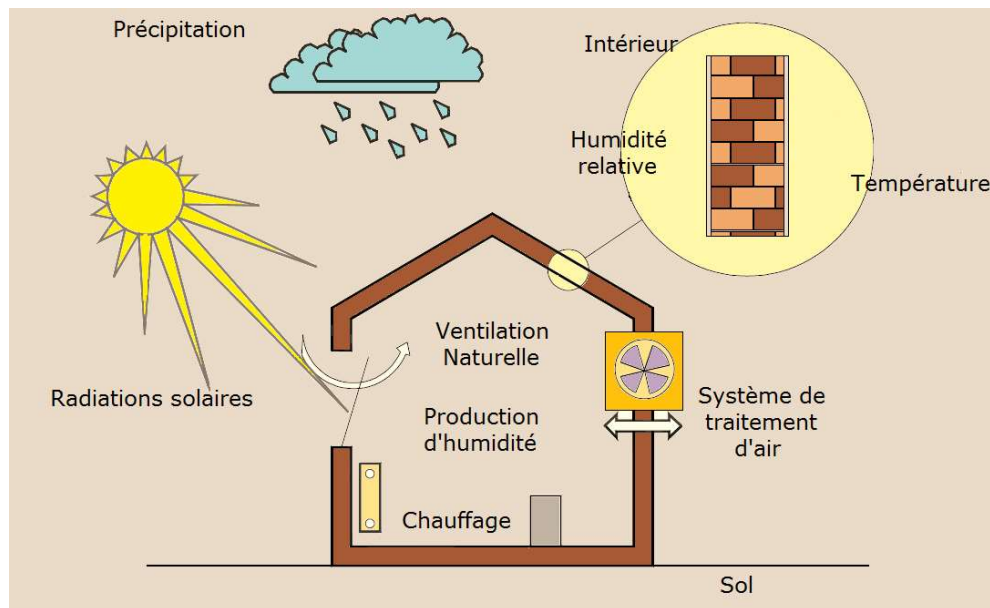




Transferts dans les milieux poreux



Contact: kamilia.abahri@lmt.ens-cachan.fr

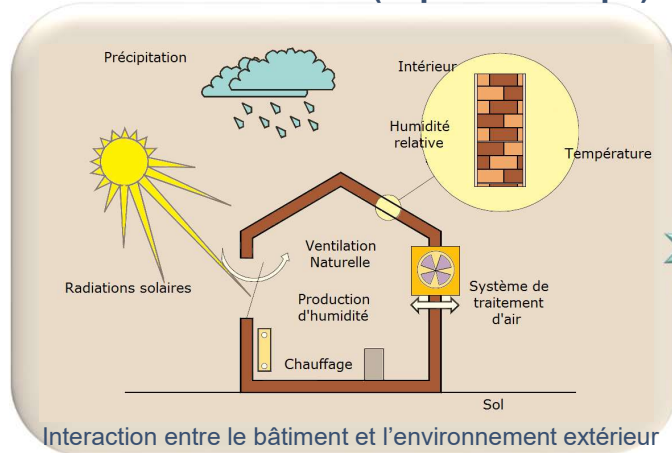


Plan

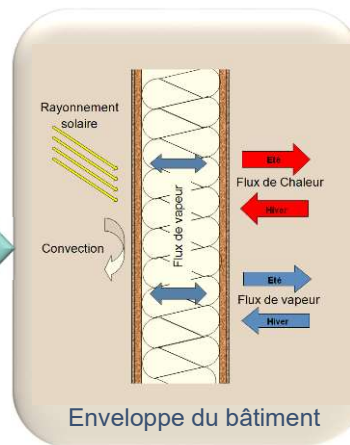
- **Contexte législatif et rappels réglementaires**
- **Paramètres caractérisant milieux poreux**
- **Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'humidité et d'air**
- **Propriétés hygrothermiques macroscopiques**

Verrous scientifiques

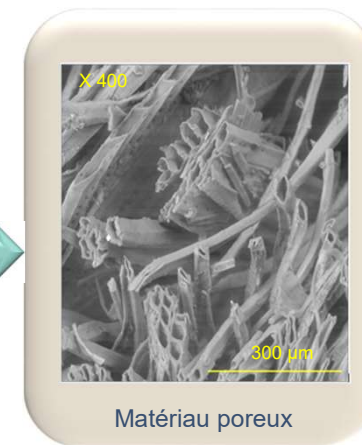
Multi-échelles (espace & temps)



Bâtiment : 43 % de la consommation énergétique
23 % de production de CO₂



Interactions complexes
Divers mécanismes de transferts



Forte hétérogénéité,
anisotropie...

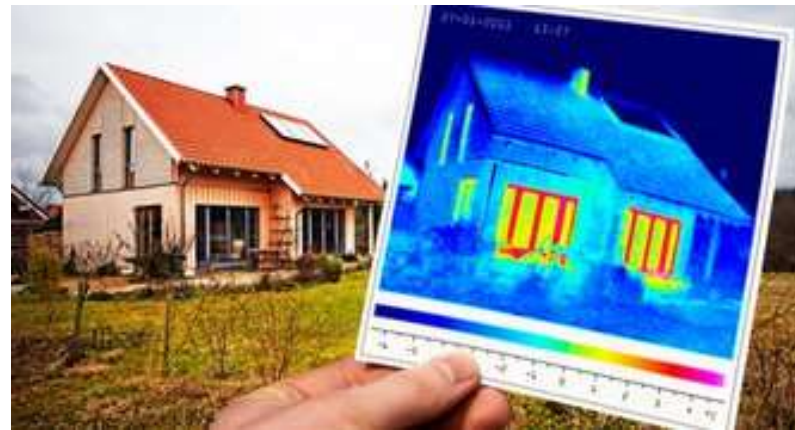


Problématique



Performance énergétique et humidité

- Prise en compte des **transferts hydriques** peut **réduire la demande énergétique** des bâtiments jusqu'à 30 % (Mendes et al., 2003; Künzle et al., 2005 ; Qin et al., 2009)C



Améliorer les propriétés hydriques des matériaux...

Humidité dans les logements

L'air contenu dans les logements contient toujours de la vapeur d'eau. A l'intérieur ceci est dû en partie par l'activité humaine et au nombre d'occupants :

- Cuisine : 1,4 à 6 l/jour
- Salle de bains : 1,2 à 2,4 l/jour
- personne : 1,7 à 4,4 l/jour

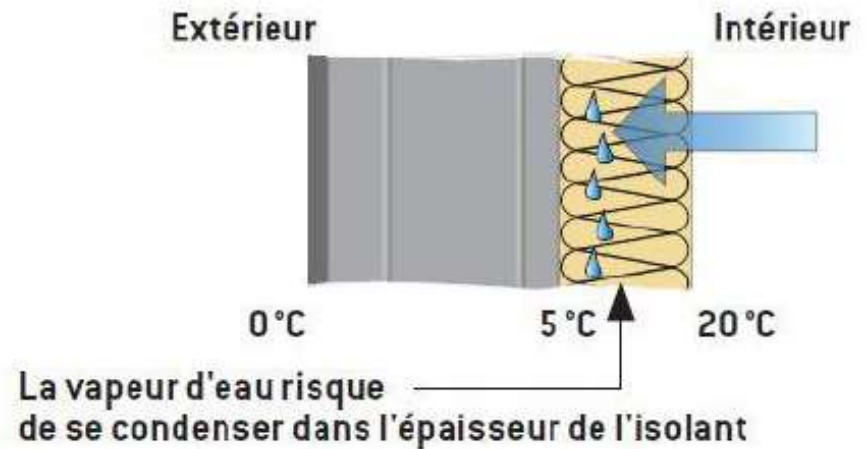
=> La vapeur d'eau se déplace du milieu où elle est en forte concentration vers les milieux où elle est en faible concentration.



La **condensation** de cette vapeur d'eau à l'intérieur des parois au travers de celles-ci peut provoquer des **pathologies** chez certaines personnes. Un des rôles de la ventilation est d'évacuer cette vapeur d'eau excédentaire.

Saturation de l'air en vapeur d'eau et condensation

Lorsque de la vapeur d'eau traverse une paroi, en hiver, sa température baisse progressivement de l'intérieur vers l'extérieur. À une certaine température, cette vapeur peut se condenser en eau liquide. C'est cette eau qui génère des pathologies



Problématique & enjeux

=> l'humidité a une action directe sur l'enveloppe du bâtiment



Durabilité des matériaux et transferts hydriques

- ✓ Dégradation des structures : corrosion, cycles de gel-dégel, réduction de la durée de vie des ouvrages

Qualité des ambiances et humidité

- ✓ Allergies, maladies respiratoires (COV + HR élevée), croissance fongique

Exigences réglementaires

- ✓ Les transferts de masse auraient de plus en plus d'influence sur les transferts de chaleur



Nécessité de la maîtrise du comportement hygrothermique des matériaux de construction

Contexte législatif du bâtiment depuis 1850

Les lois et réglementations sur le bâtiment ont beaucoup évolué dans le dernier siècle, une chronologie semble intéressante afin de comprendre l'évolution de la structure des bâtiments.

1850 : première loi de salubrité publique concernant le logement ouvrier, droit aux municipalités de définir les travaux à effectuer pour assainir les logements.

1859 : les immeubles peuvent avoir cinq étages (20m) en étant surmontés de combles brisés.

1889 : la société française des Habitations à Bon Marché (HBM) voit le jour.

1902 : renforcement des obligations sanitaires ; plafonnement des hauteurs à 31m ; augmentation de profondeur des saillies et balcons et augmentation de la surface minimale des cours intérieures.

.....

Contexte législatif du bâtiment depuis 1850

- **1918** : exonération des loyers pour les locataires dont le chef de famille est mobilisé par la guerre, création d'un manque d'entretien et d'insalubrité.
- **1928** : programme de construction pour faire face à la crise du logement, 260 000 logements collectifs de 1928 à 1933.
- **1937** : règlement sanitaire de la ville de Paris, entrée d'air dans toutes les pièces disposant d'un appareil à combustion (1dm^2), conduit de fumée dans chaque pièce principale, aération directe et permanente sur l'extérieur dans les cabinets d'aisance.
- **1939** : crise économique, le bâtiment est frappé de plein fouet.
- **1944** : création du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme (MRU), outil de planification et de gestion pour intervenir dans la reconstruction du pays de manière dirigiste.
- **1948** : priorité au logement ; création du CSTB pour la mise au point de procédés industriels innovants ; loi assurant une hausse régulière des loyers ce qui perpétue l'état d'insalubrité.

Contexte législatif du bâtiment depuis 1850

- **1957** : création des Zones à Urbaniser en Priorité (ZUP).
- **1958** : augmentation du plan de construction à 300 000 logements par an, forte industrialisation, normalisation et productivité.
=> L'aération des logements est intégrée au Code de la Construction et de l'Habitation.
- **1969** : Principe de la ventilation générale et permanente par balayage, apparition de la Ventilation Naturelle (VN) et de la Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC).
- **1970** : création de villes nouvelles en réaction aux ZUP.

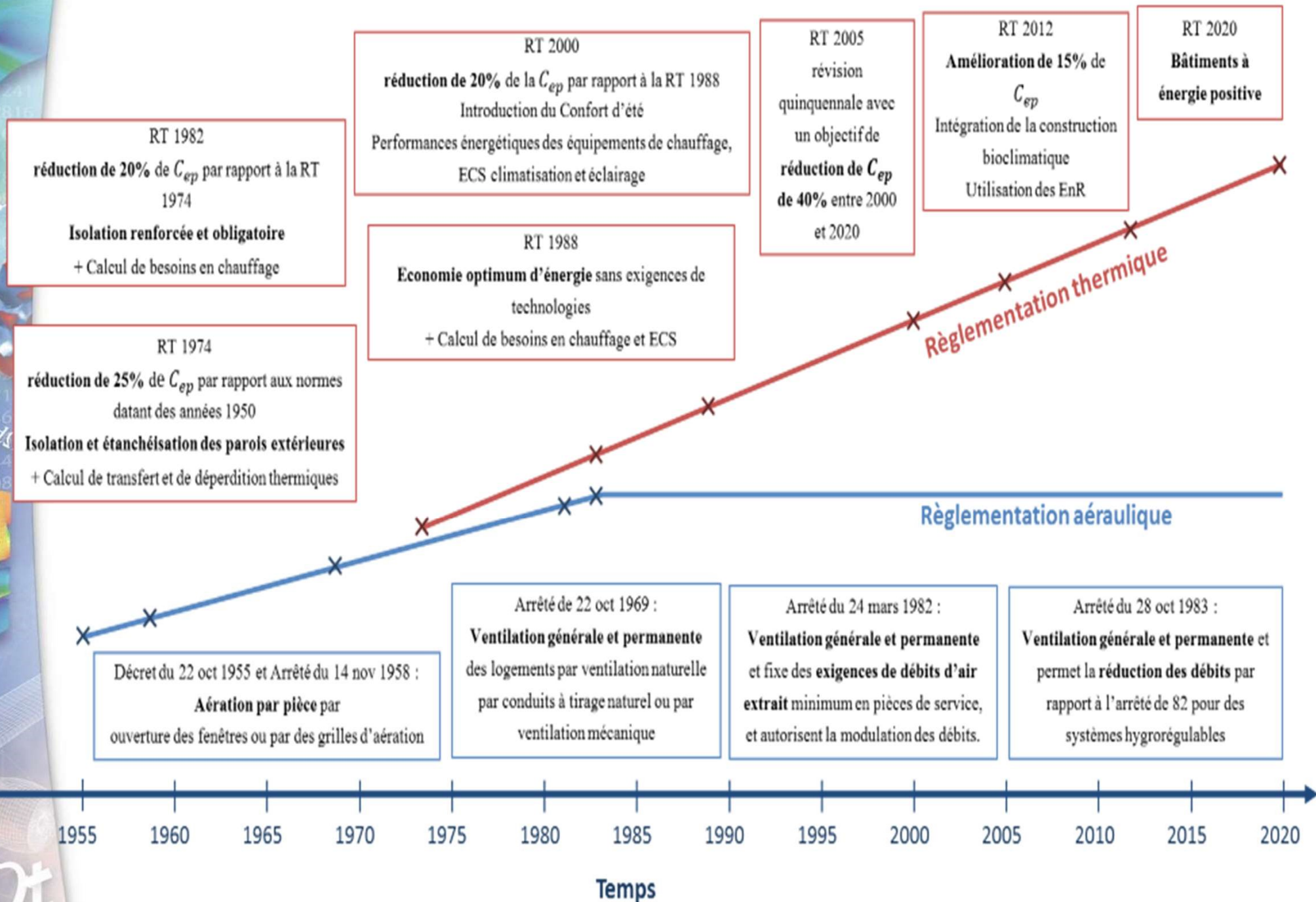
Règlementation bâtiments neufs

- **1974** : premier choc pétrolier et chute de la production. Installation des premières VMC gaz.
- **1988** : RT1988, la deuxième réglementation thermique, s'applique aux bâtiments neufs résidentiels et non résidentiels.
- **2000** : RT2000, réduction de la consommation maximale de 20% des bâtiments résidentiels comparé à la RT 1988 et de 40% pour le tertiaire.
- **2005** : RT2005, amélioration de 15% de la performance thermique du neuf, après différents arrêtés la réglementation s'étend aussi à la rénovation.

Règlementation bâtiments neufs

- **2006** : test d'infiltrométrie des bâtiments selon la norme NF EN 13829.
- **2010** : RT2012, la consommation maximale d'une habitation neuve doit être de $50 \text{ kWh}_{ep}/\text{m.an}$ (modulée selon la région et altitude),
- perméabilité à l'air de $0.6 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ en maison individuelle et $1 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ en bâtiment collectif et valeurs minimales de renouvellement d'air.

Règlementation bâtiments existants



Problématiques et enjeux

❑ Exigences réglementaires

Les transferts de masse auraient de plus en plus d'influence sur les transferts de chaleur

❑ Performance énergétique et humidité

Prise en compte des transferts hydriques peut réduire la demande énergétique des bâtiments jusqu'à 30 %

❑ Qualité des ambiances et humidité

Allergies, maladies respiratoires (COV+HR élevée), croissance fongique

❑ Durabilité des matériaux et transferts hydriques

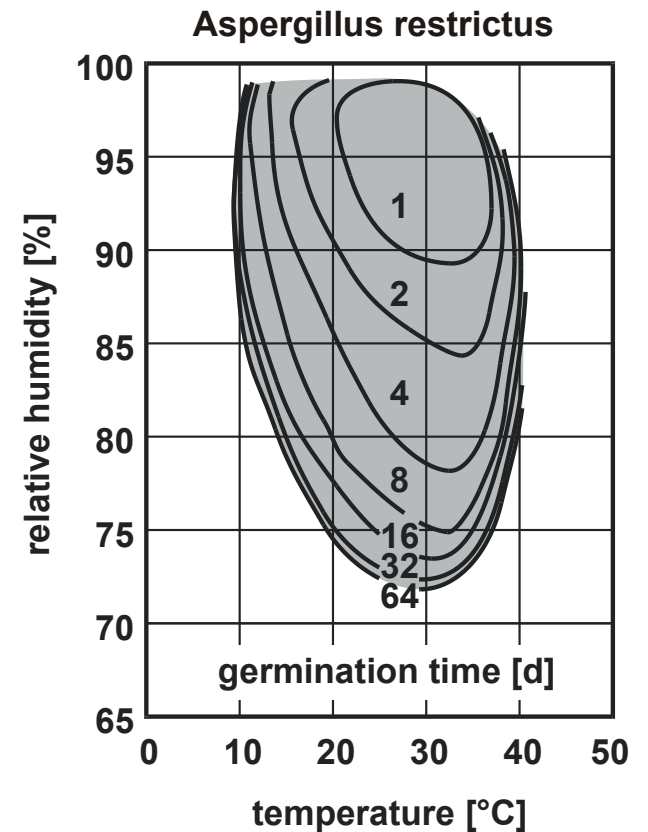
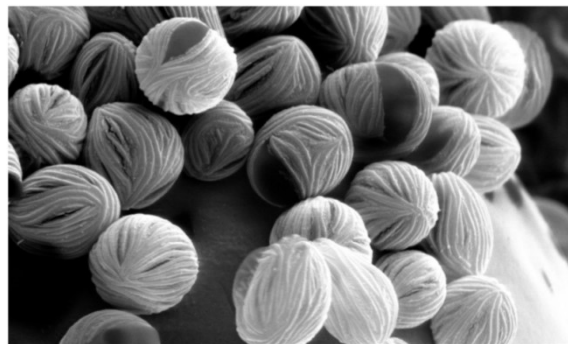
Dégradation des structures : corrosion, réduction de la durée de vie des ouvrages

Nécessité de maîtriser les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les ambiances et dans les matériaux



Humidité et qualité d'air intérieur

- Développement de moisissures, de microorganismes et de bactéries :
 - Allergies
 - maladies respiratoires
- Inconfort hygrothermique



Une aspergillose est une infection fongique, causée par certaines formes de champignons *Aspergillus*.

Humidité et qualité d'air intérieur



Durabilité

- Problème de gonflement ...
- Une teneur en eau élevée augmente la condensation dans l'enveloppe du bâtiment
- Réduction de la durée de vie (Arliguie et al., 2003; Aït-Mokhtar et al., 2004)



Qualité de l'air

- Allergies, problèmes de respiration...
- Moisissure (Radulescu 2006, Olaleakan et al., 2006)

Humidité et durabilité des matériaux

Dommages dus au :

- Cycles Gel-dégel
- Diffusion d'agents agressifs : CO_2 ; Cl^-



Humidité et durabilité des matériaux

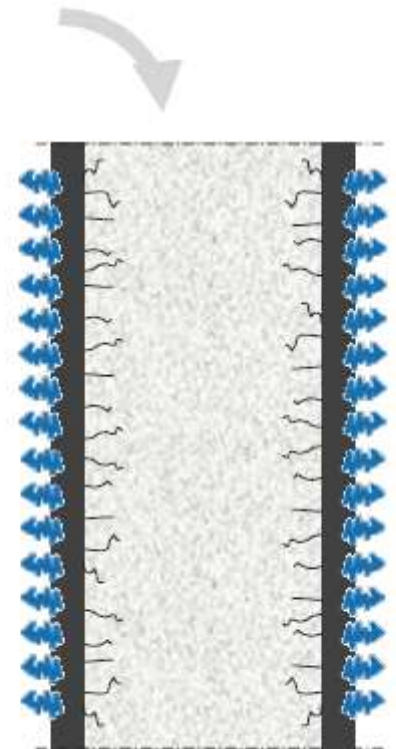
Séchage: phénomène physique

Séchage (dessiccation) des structures en béton lors du décoffrage :

t_0 : Béton quasi-saturé – Humidité Relative = 95%

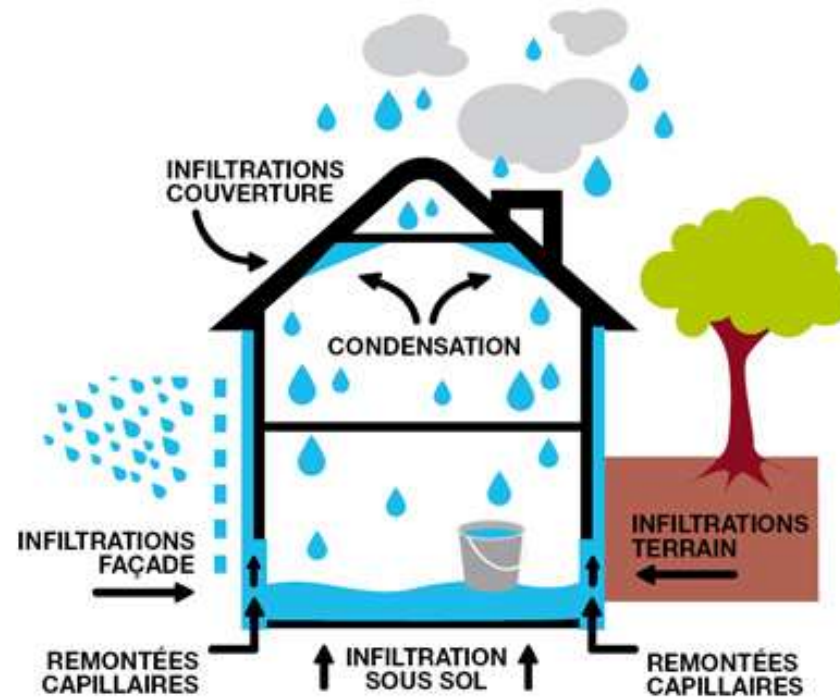
$t > t_0$: Déséquilibre avec l'environnement (20-100%)

} Transferts de masse induits → fissuration



Humidité et performances énergétiques

- ✓ Dégradation de l'isolation (perte de performances thermique due à la présence d'eau sous forme condensée)
- ✓ Sur-ventilation mécanique (pour évacuer l'excès d'humidité)



Verrous scientifiques

❑ Transferts de masse complexes & mal maîtrisés

Topologie des matériaux poreux (solide, liquide, vapeur)

Phénomènes physiques complexes : transferts diphasiques

Couplage fort et modèle mathématique complexe (forte non linéarité)

Propriétés variables

❑ Cinétiques de transferts lentes

Peu de données quant aux propriétés des matériaux

❑ Métrologie non maîtrisée

Mesure de l'hygrométrie, réponses des capteurs

❑ Ecart sensible entre modèles et expériences

Hypothèses et approches de modélisation

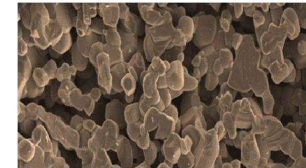
Requiert des compétences pluridisciplinaires

Démarche

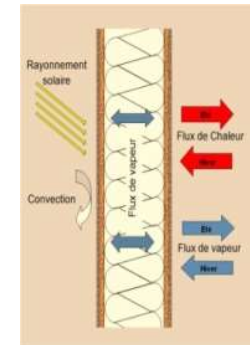
□ Transfert de chaleur et de masse (hydrique) à l'échelle :



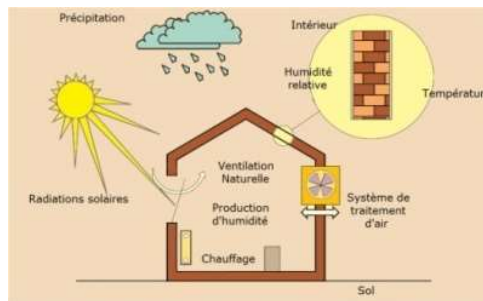
du matériau poreux



de l'enveloppe du Bâtiment



couplage enveloppe bâtiment – ambiance



Etude de l'interaction bâtiment – Microclimat urbain

**Modélisation, Caractérisation,
Validation expérimentale**

Facteurs d'apparition de pathologie

	Paramètres d'entrée	Caract. du matériau	Facteurs	Critères
Variations dimensionnelles	HR	coefficient de dilatation $f(HR)$	coefficient de dilatation	Variation de 10%
Propriétés thermiques	λ_0, w, b	Courbe $\lambda = f(w)$	Modification du U_{paroi}	$U_{\text{paroi}}(w) < 0.05$ $U_{\text{paroi}}(\lambda_0)$
Propriétés mécaniques	R_{meca} sèche, w	courbe $R_{\text{meca}} = f(w)$	R_{meca}	$R_{\text{meca}} < R_{\text{seuil}}$
Gel	profil de T dans la paroi	R_{gel}	nombre de cycle de gel/dégel effectif	nombre de cycles $> R_{\text{gel}}$
Corrosion des métaux	profil de T dans la paroi	-	$T = T_{\text{Trosée}}$	nombre de cycle où $T = T_{\text{Trosée}}$
Prolifération biologique	T, HR	sensibilité aux proliférations biologiques	index de moisissures M	$M > 3$, moisissures observables visuellement
Polluants	HRint	-	HRint	HRint $> 60\%$ ou HRint $< 40\%$
Confort hygrothermique	T, HR, Met, Clo, vitesse de l'air	-	PMV/PPD	$1 < PMV$ ou $PMV < -1$

Humidité dans les matériaux

Milieu poreux, Mécanismes de transfert et Équations de bilan

Propriétés de stockage et de transfert

La condensation dans les parois

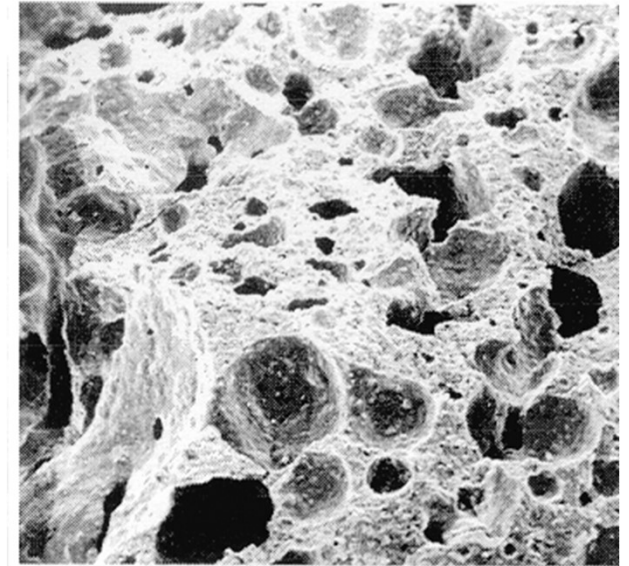
Matériau poreux

Et si on modélisait l'eau dans les matériaux de manière détaillée...

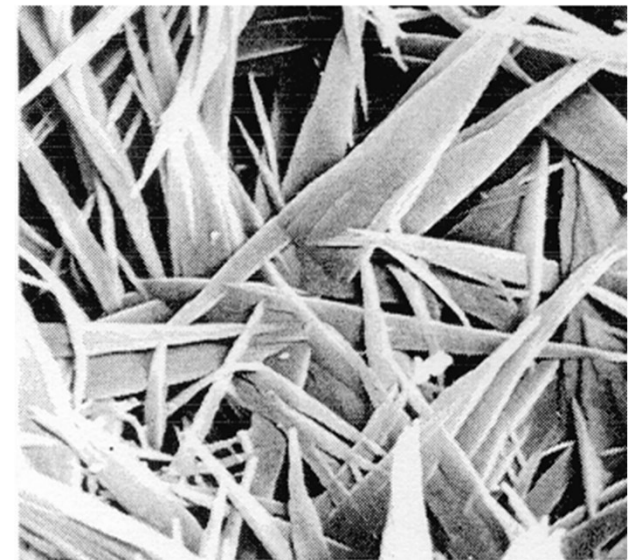


Structure des pores
du béton cellulaire

Agrandie 22
fois



Agrandie 11000
fois



Au vu de ces images, que peut-on dire au sujet des matériaux poreux ?

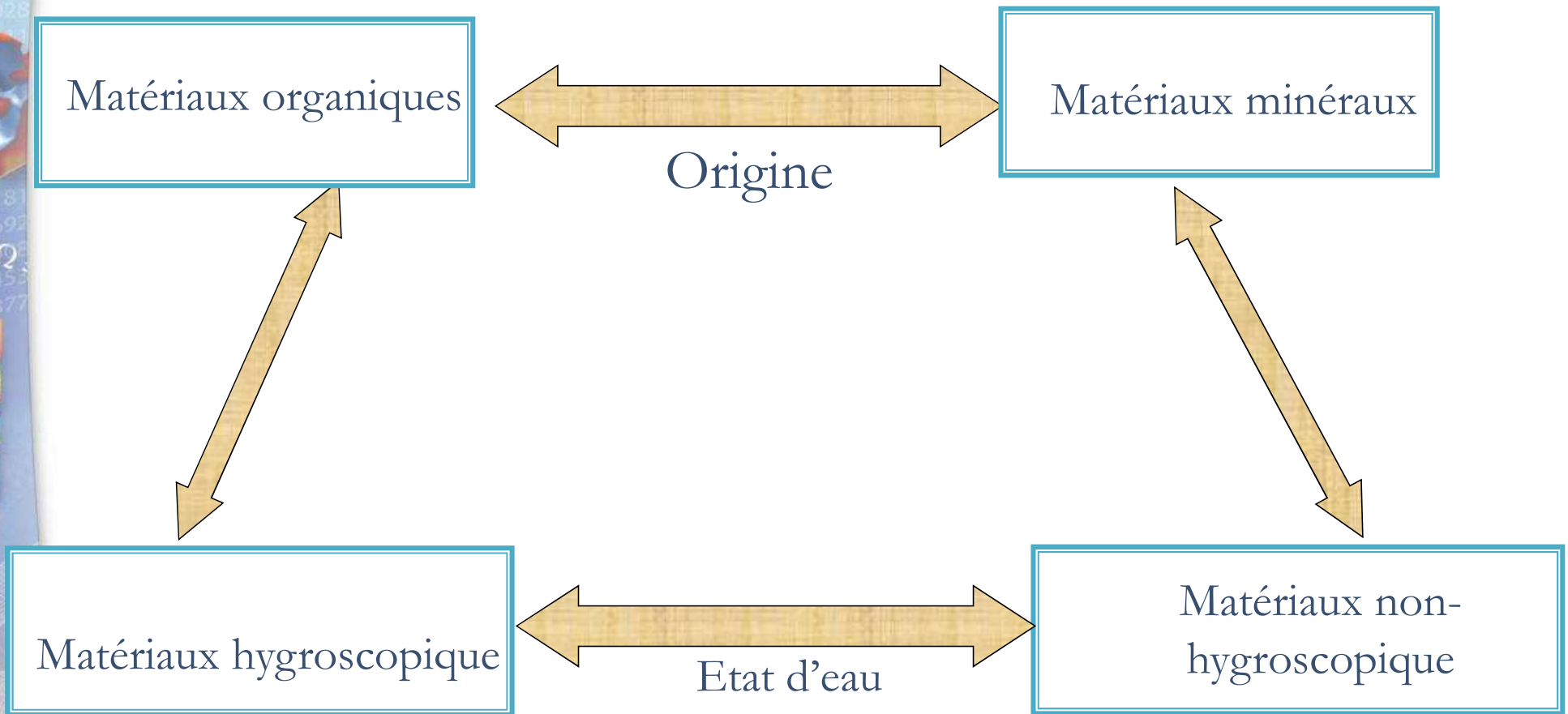
Caractéristiques des milieux poreux

- Complexes (multi-phases : solide – liquide – gazeuse ; différentes structures)
- Multi-échelles (plusieurs tailles de pores)
- Souvent considérés comme **homogènes** à l'échelle macroscopique

Matériau poreux

Un milieu poreux est un solide rigide de forme complexe à l'intérieur duquel se trouve des cavités ou des pores, reliés entre eux par des canaux.

Ces pores peuvent contenir une ou plusieurs phases fluides (liquide, vapeur, gaz) susceptibles de s'écouler et d'échanger entre elles et (ou) avec la matrice solide de la matière et de l'énergie.

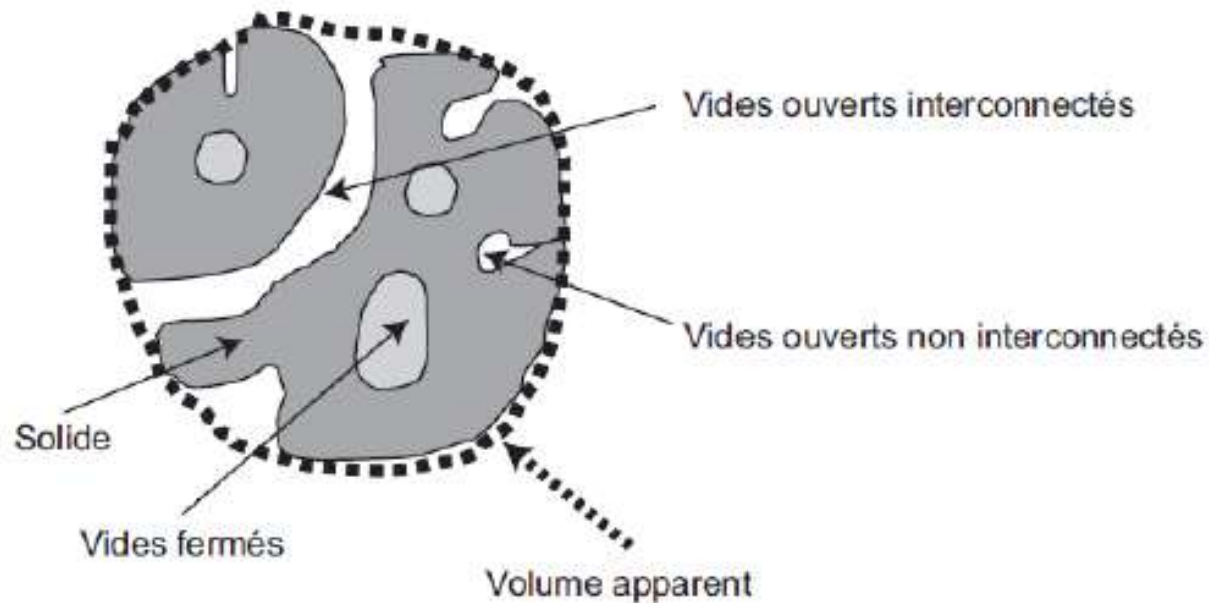


Porosité

La porosité est une propriété statistique...

Porosité ouverte :
$$\varepsilon = \frac{V_l + V_g}{V_t}$$

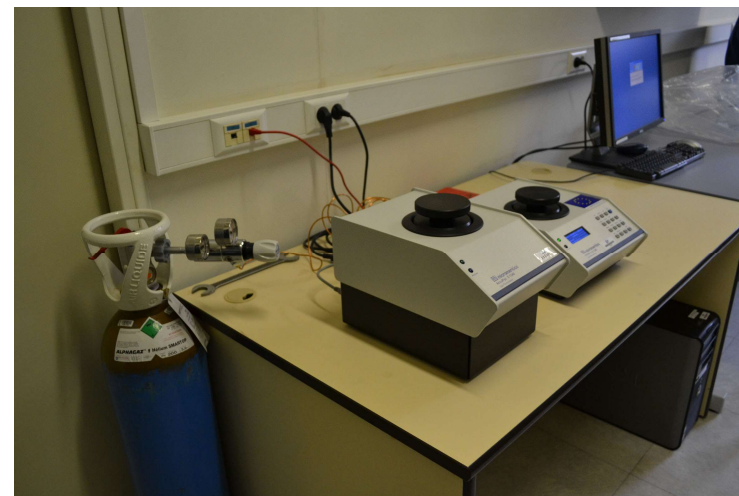
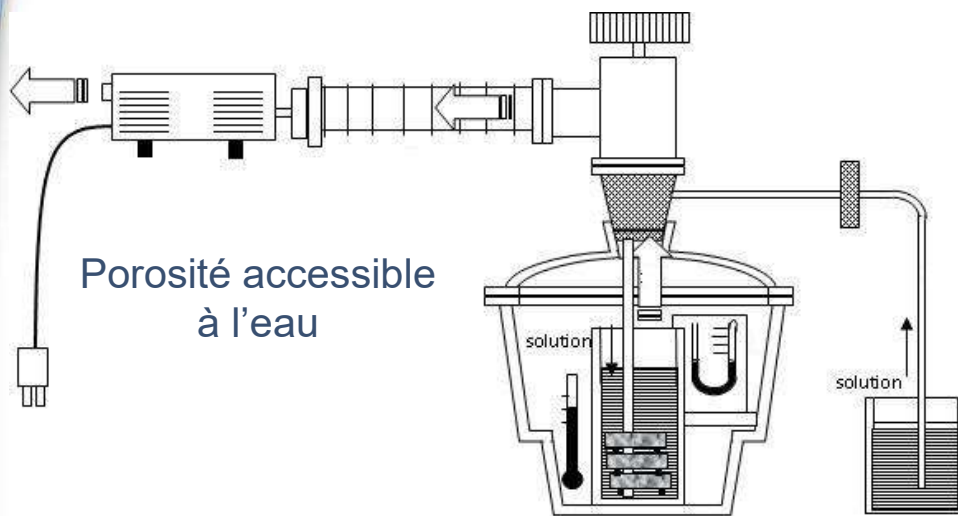
↳ impacte le plus la valeur de la diffusivité



Il peut exister dans le matériau des pores inaccessibles qui n'ont pas une influence sur les phénomènes de transport

Porosité

Techniques de mesure expérimentales



Pycnométrie à **Hélium**



La porosimétrie au **mercure**
(Micromeritics-Autopore III 9420)



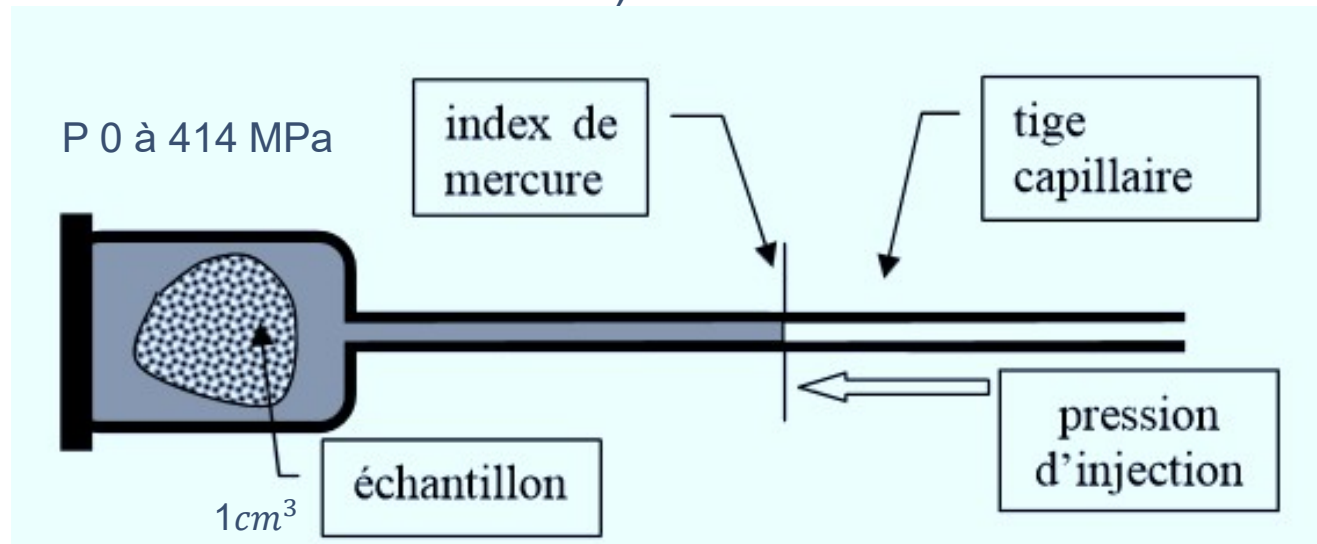
Porosimétrie à l'**Ethanol**

Porosité



Porosimétrie au mercure

La porosimétrie au mercure est basée sur la mesure de la quantité de mercure qui peut être insérée dans les pores d'un solide à différentes pressions (intrusion de mercure).



diamètres
équivalents entre \leq
360 et $0,006\ \mu\text{m}$

Principe injecter sous pression un **liquide non mouillant**, le mercure, dans le réseau poreux de l'échantillon **sous vide**, séché au préalable à 45°C (15j)

Le mercure pénètre dans des pores de diamètre d'entrée d'autant plus petits que la **pression exercée** est élevée

Porosité

Porosimétrie au mercure

=> pour chaque palier de **pression** correspond un **volume** injecté



Equation de Washburn

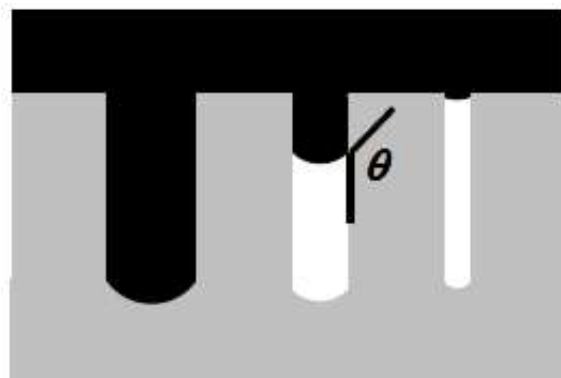
$$D = \frac{4\gamma}{P_c} \cos \theta$$

$D[m]$ est le diamètre de pore

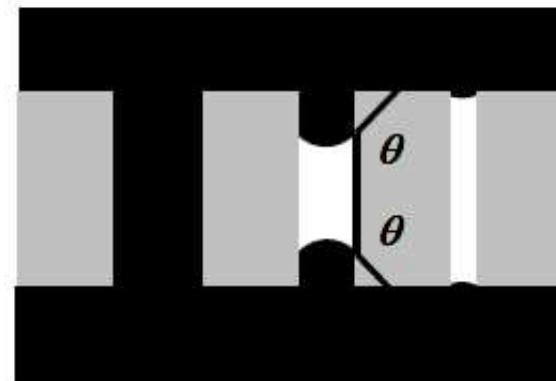
$\gamma[N/m]$ est la tension superficielle du mercure. La valeur couramment utilisée est de 0,485 [N/cm]

θ est l'angle de contact entre le mercure et la paroi solide.

$P_c[Pa]$ est la pression exercée sur le mercure (Micromeritics, 1995)



Pores en cul de sac

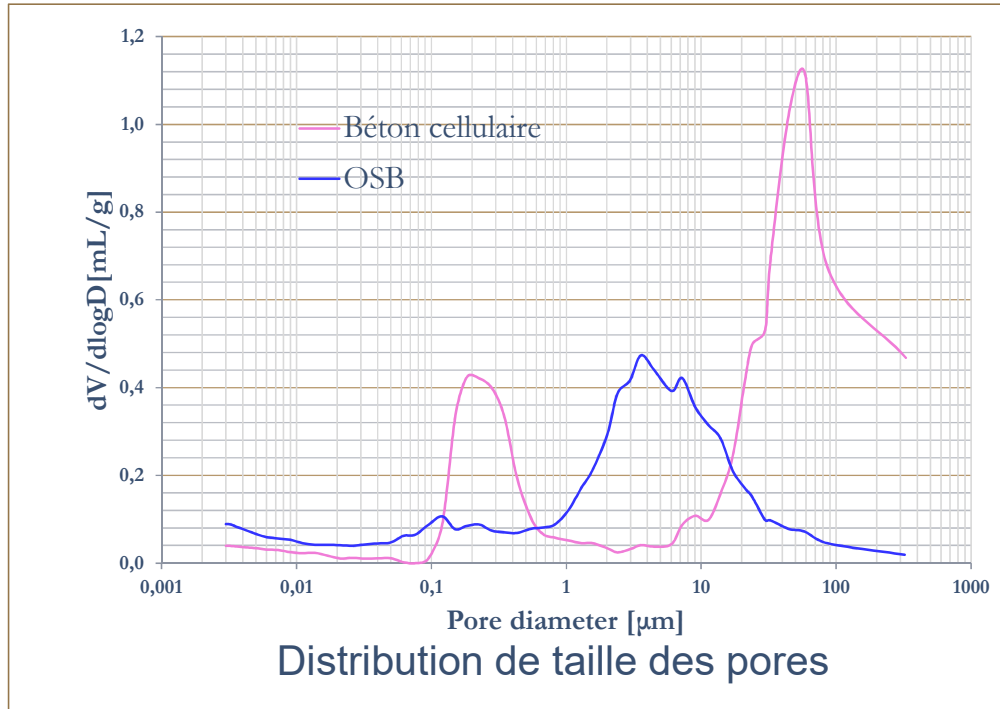


Pores débouchants

A la pression P , les pores de diamètre supérieur à D seront totalement remplis de mercure, les pores de diamètre inférieur resteront vides

Porosité

Porosimétrie au mercure



Mercury penetrometer

Porosité de quelques matériaux



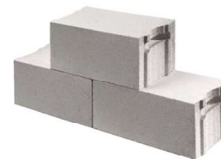
$\approx 50\%$

Oriented Strand Board



$\approx 90\%$

Wood fibrous insulation



$> 80\%$

Aerated concrete

Porosité



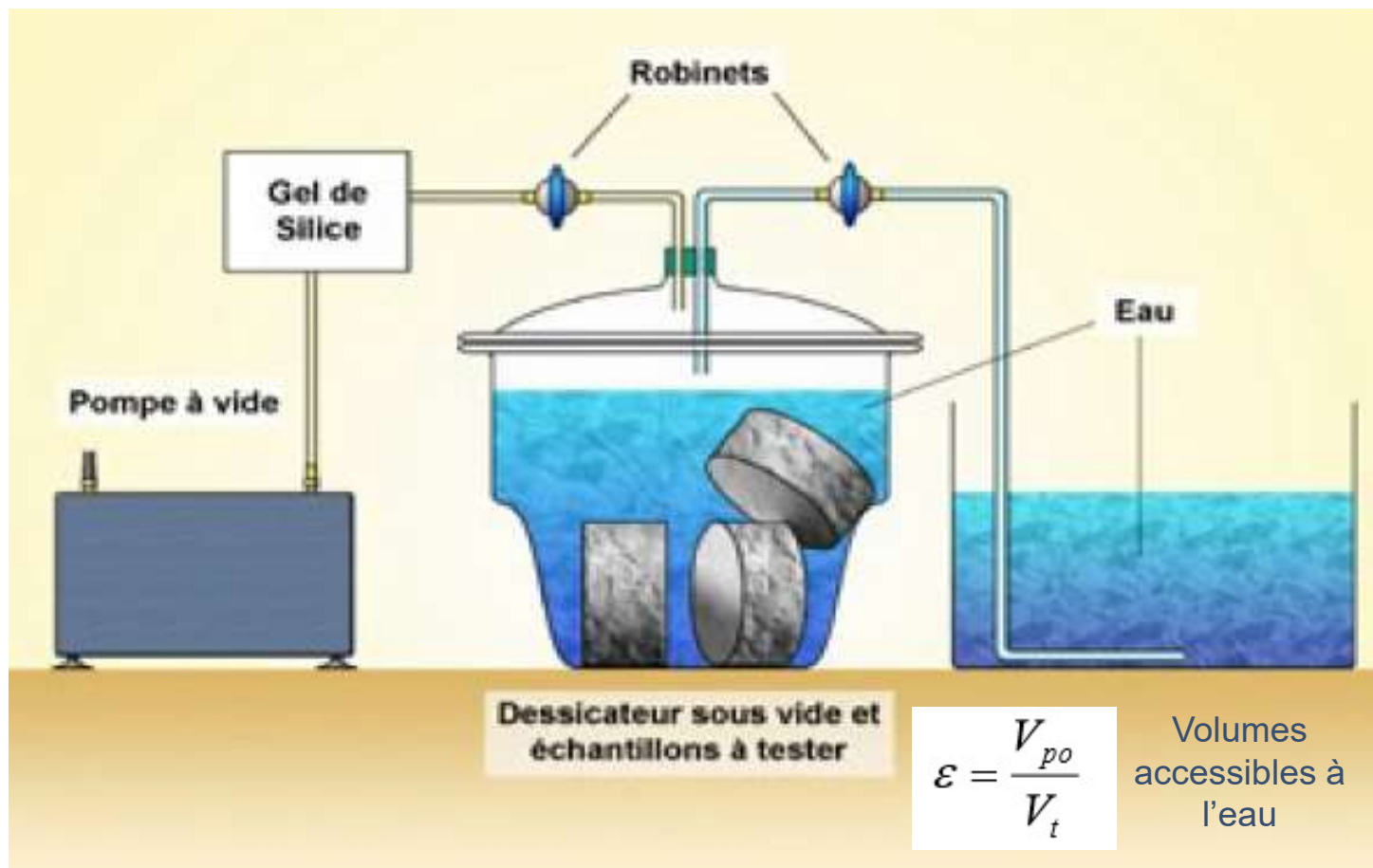
Porosité accessible à l'eau

NF EN 18-459 Essai de porosité et de masse volumique

Principe

Mesurer le pourcentage des vides connectés avec la surface, à l'intérieur de la masse du bois

Préparation des corps d'épreuve



Porosité



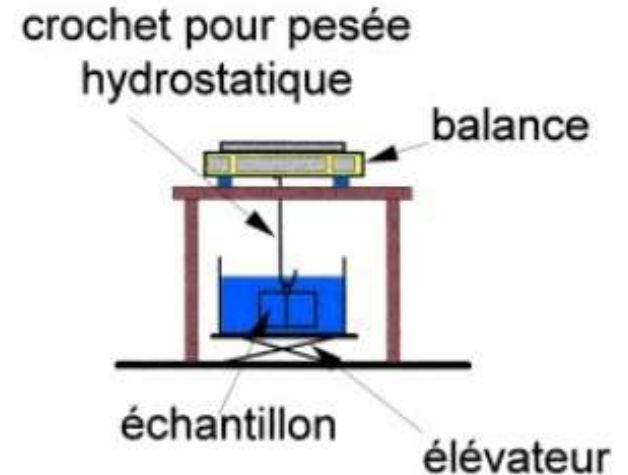
Porosité accessible à l'eau

Pesée hydrostatique M_{eau} est la masse en grammes pesée sous l'eau

Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau, M_{air}

Séchage à $T = 105^\circ$ jusqu'à masse constante
(2 pesées espacées de 24 h ne s'écartent pas plus de 0,05%)

Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche M_{sec}

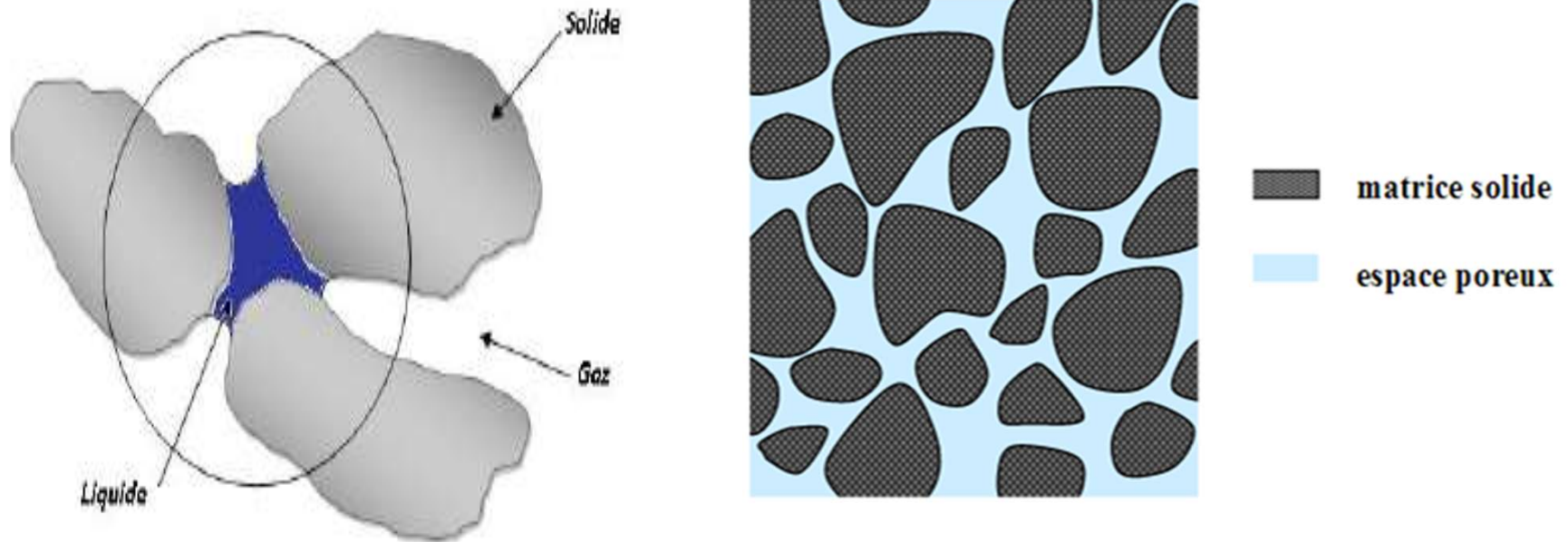


$$\text{Peau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

$$\text{(AFPC-AFREM [1]) } \epsilon_{eau} = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{\rho_{eau} V_0}$$

Caractéristiques des milieux poreux

Les matériaux de construction sont considérés comme des milieux poreux où se produisent les différents phénomènes de transferts et d'échanges de masse et de chaleur.



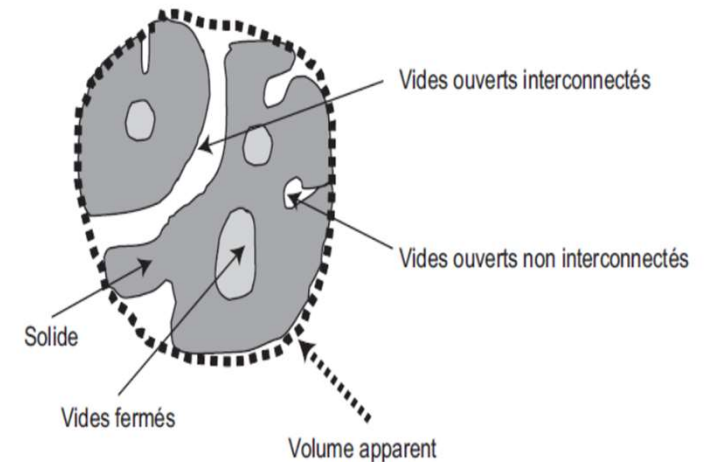
Représentation schématique d'un milieu poreux

Matériau hygroscopique	Matériau non-hygroscopique
Rayon des pores < 1000 Å	Rayon des pores > 1000 Å
Diffusion de KNUDSEN	Diffusion moléculaire libre
Adsorption et condensation capillaire importante	Adsorption et condensation capillaire faible
0 < humidité relative < 98,9%	humidité relative > 98,9%

Caractéristiques des milieux poreux

$$\varepsilon_T = \frac{V_p}{V_o} = \frac{V_p}{V_p + V_s}$$

Rayon des pores	Classe	État de l'eau
< 0,0001 mm	Microporosité	eau de rétention exclusivement
0,0001 à 2,5 mm	Porosité capillaire	eau capillaire et eau gravitaire
>2,5 mm	Macroporosité	eau gravitaire dominante

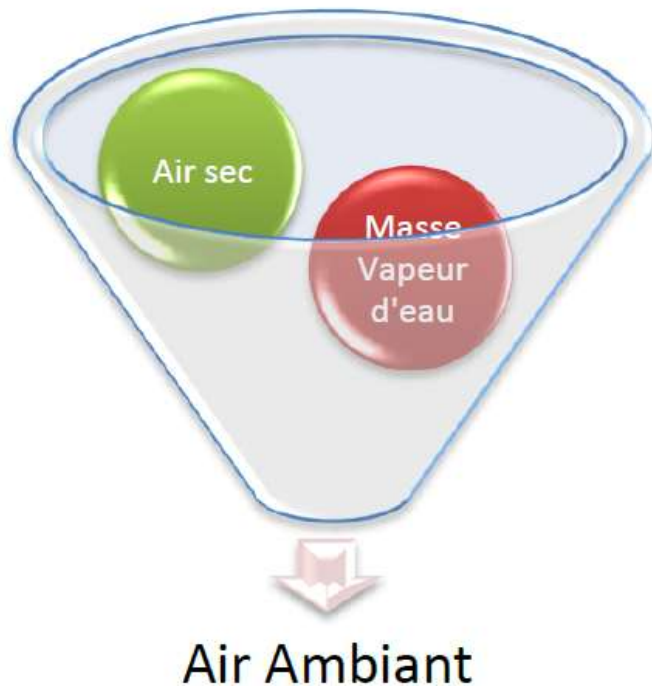


- Pores interconnectés** : espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de matière dans le matériau,
- Pores aveugles ou bras morts** connectés uniquement par une voie. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.
- Pores isolés** qui ne communiquent pas avec le milieu extérieur

- la porosité formée par les seuls vides inter communicants : **porosité ouverte**
- la porosité formée par les vides non interconnectés : **porosité close** ou porosité vacuolaire

Interaction de l'humidité entre le matériau et l'air

- L'air ambiant contient une part plus ou moins importante de vapeur d'eau.
- L'air humide est défini comme l'assemblage d'une masse d'air sec et d'une masse de vapeur d'eau



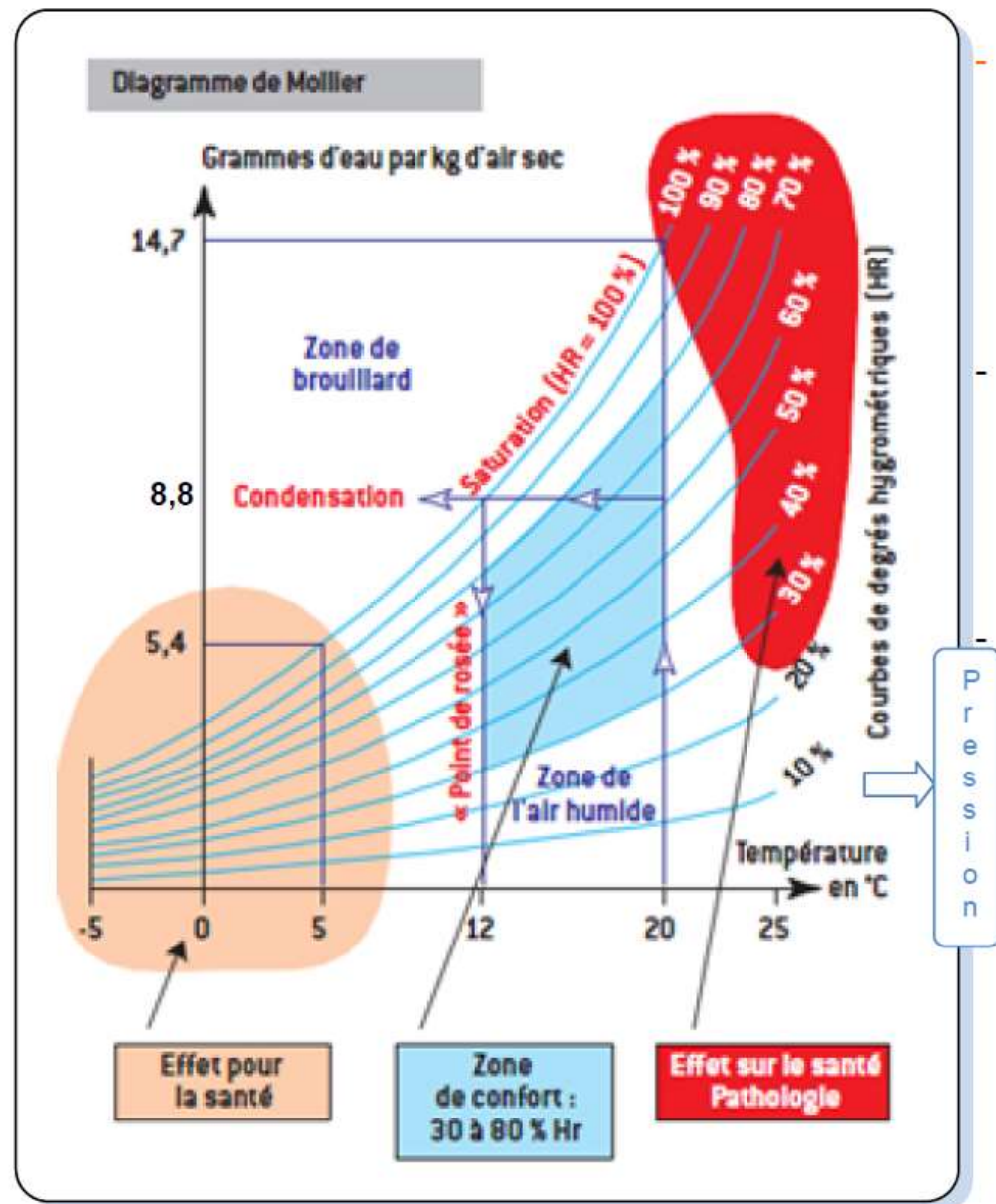
A une pression et à une température donnée, l'air peut contenir une quantité limitée de vapeur d'eau. (ex : salle de bain avant une douche)

Une quantité d'eau supplémentaire, à la même température et à la même pression se traduira par la présence d'eau liquide en suspension dans l'air (brouillard, dépôt sur glace ou/et vitre).

Interaction de l'humidité entre le matériau et l'air

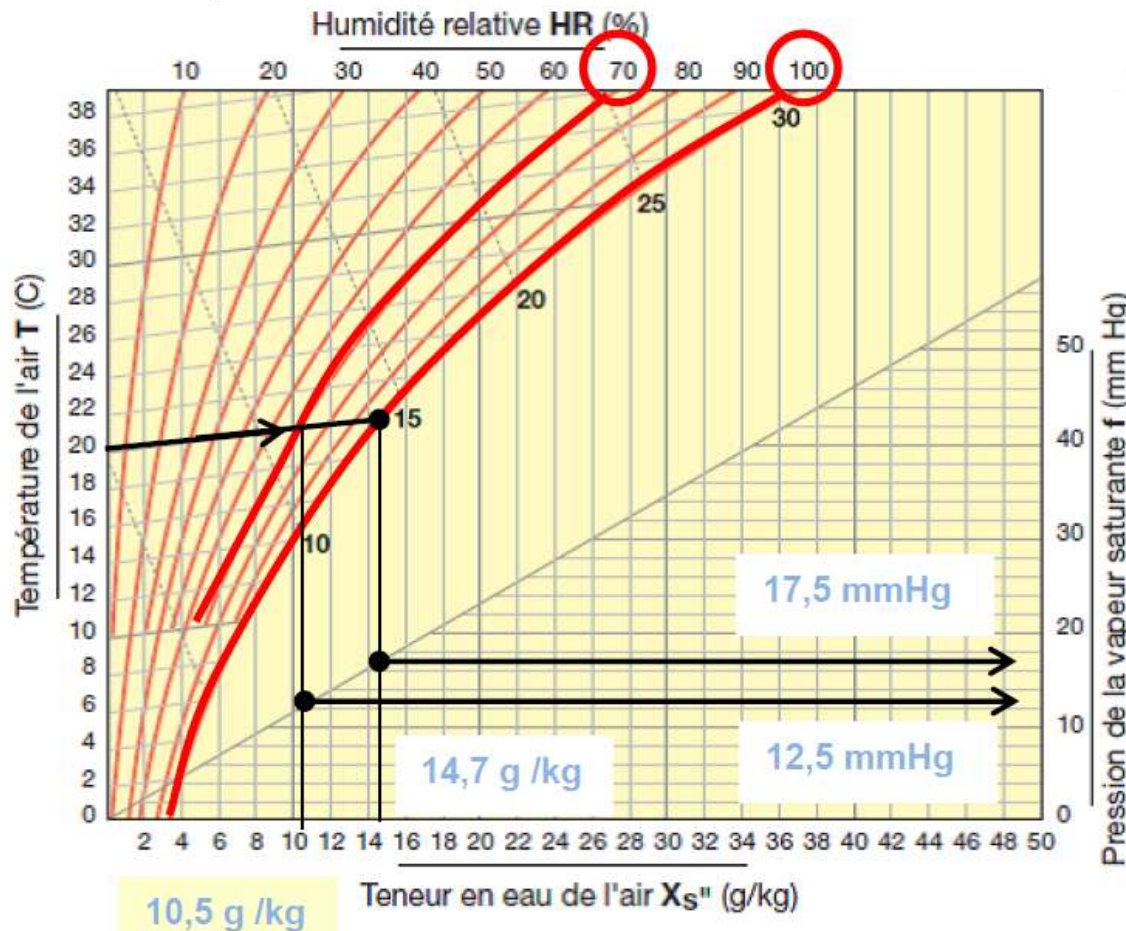
Diagramme de Mollier

- Lorsque la **température baisse**, la teneur en **vapeur d'eau diminue** rapidement.
- L'air a la capacité d'emmagasiner de l'eau sous forme de vapeur, plus l'air est **chaud**, plus **cette capacité est grande**.



Interaction de l'humidité entre le matériau et l'air

Diagramme de Mollier



Notion de température de rosée

La température de rosée correspond à la température en dessous de laquelle de l'air humide refroidi atteint la saturation. Une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide va être condensée, c'est-à-dire va se liquéfier.

Pression de vapeur saturante

La pression de vapeur saturante p_{sat} est la pression de vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane d'eau liquide ou de glace à la même température et à la même pression. En d'autres termes, c'est la valeur maximale que peut atteindre la pression partielle de la vapeur à cette température.

$$P_{sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot T - 4717,03}{T - 35,85}\right) \text{ pour } T \geq 273,15 \text{ K}$$

$$P_{sat} = 610,5 \cdot \exp\left(\frac{21,875 \cdot T - 5975,16}{T - 7,65}\right) \text{ pour } T < 273,15 \text{ K}$$

Grandeurs caractéristiques des milieu poreux

La teneur en eau

- Elle permet de quantifier la quantité d'eau dans un milieu donné.
- En pratique, on définit une teneur en eau massique ou volumique ou encore une teneur en humidité.

$$U = \frac{m_l}{m_s} \cdot 100$$

$$\theta_l = \frac{V_l}{V_0} \cdot 100$$

$$\rho^m = \frac{m_l + m_v}{V_0}$$

Degré de saturation

$$S_l = \frac{V_e}{V_t - V_0}$$

Humidité relative

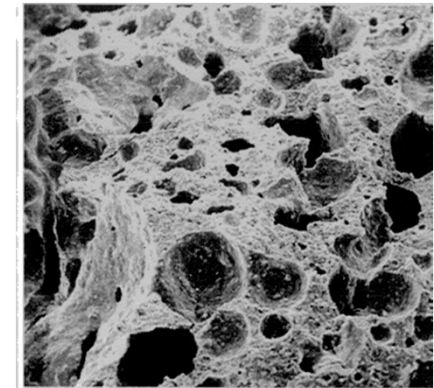
$$\varepsilon S_l = \theta_l = \frac{\rho_s}{\rho_l} u_l$$

$$HR = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \cdot 100$$

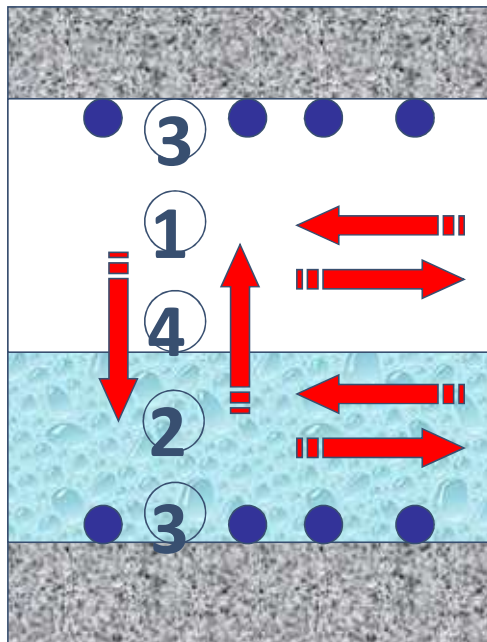
$$p_{v,sat} = \exp \left(23,5771 - \frac{4042,9}{T - 37,58} \right)$$

Pression totale

$$p = p_v + p_a$$



Mécanismes de transferts d'humidité



Solide

Mélange gazeux :
Air + vapeur d'eau

Eau liquide

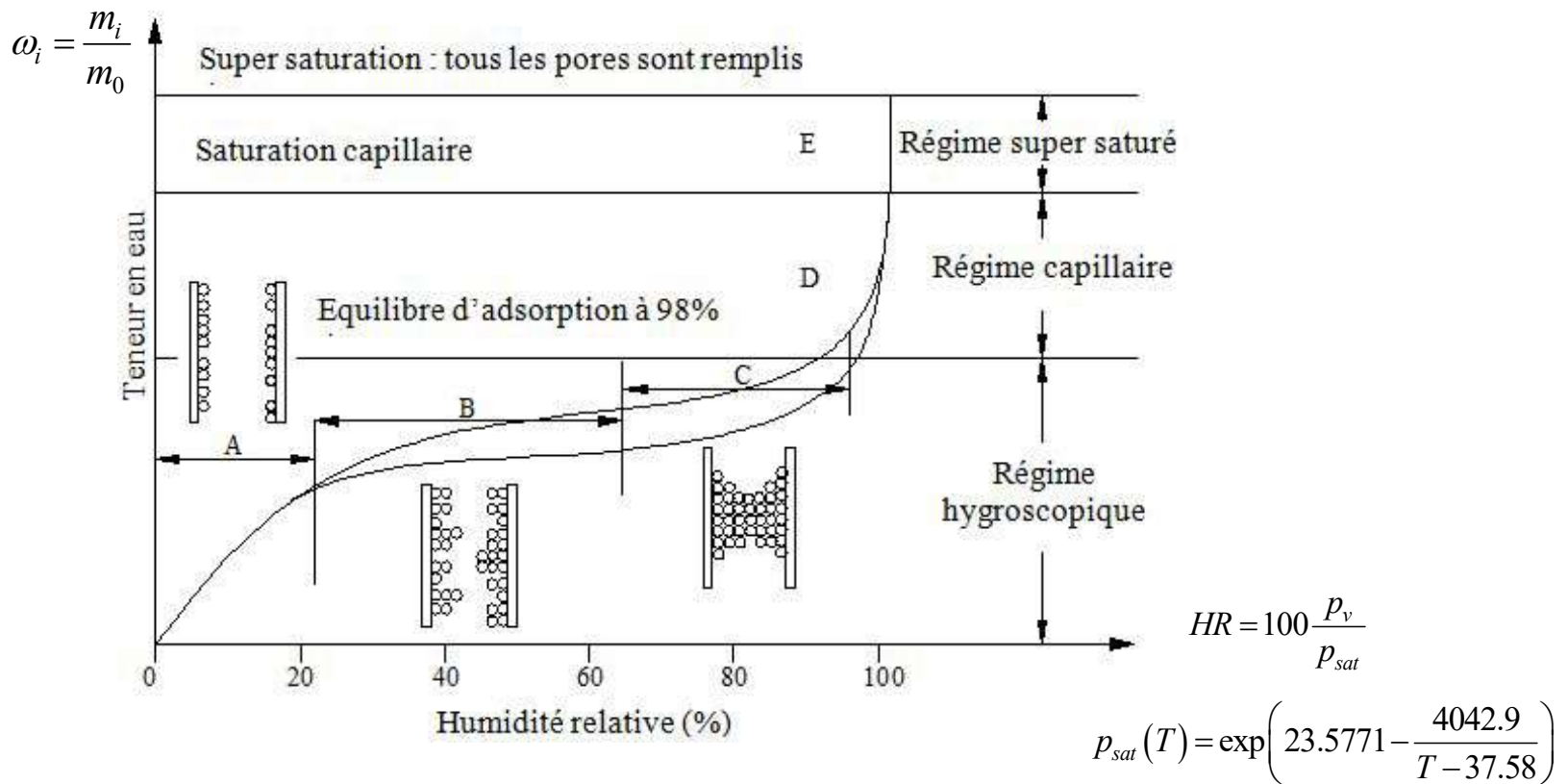
Solide

1. Diffusion vapeur d'eau
2. Mouvement d'eau liquide
3. Évaporation / Condensation
4. Sorption / désorption

- Le transfert en **phase vapeur** qui s'opère par diffusion sous gradient de concentration
- Le transfert par **capillarité** se produit quant à lui en **phase liquide** par l'intermédiaire des forces capillaires d'interactions entre les phases fluides et d'interaction entre phases fluides et matrice solide.
 - L'**adsorption** physique ou autrement dit la condensation évaporation de molécules d'eau sur la surface du matériau solide. Les molécules adsorbées sont faiblement liées au solide par des forces intermoléculaires d'attraction

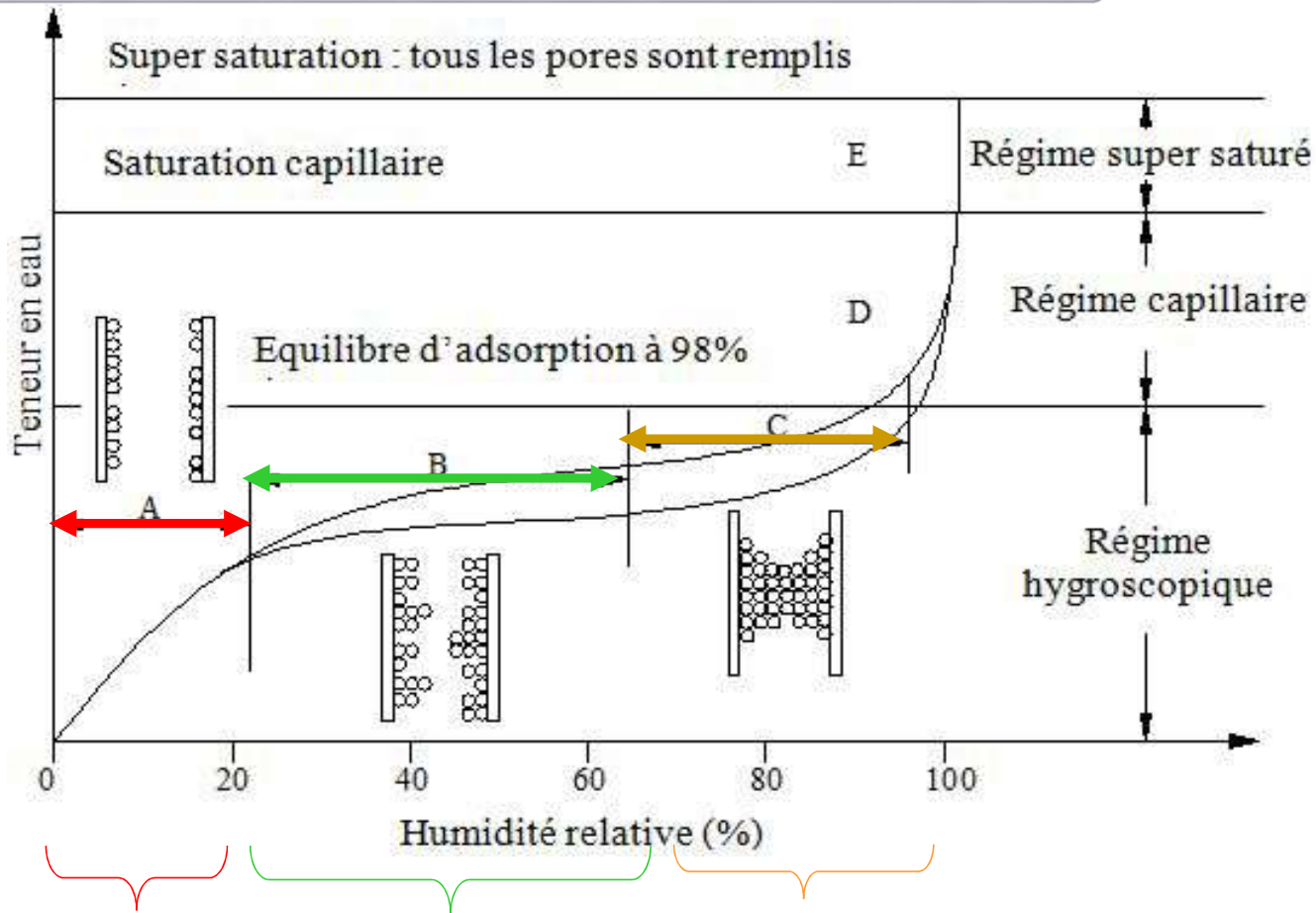
Courbes isothermes de sorption désorption

- Le passage de l'état d'équilibre initial à l'état d'équilibre final s'accompagne par un transfert de masse avec rétention ou encore restitution d'humidité.
=> mécanisme de rétention de l'humidité dans un milieu poreux du bâtiment



Ces courbes sont caractéristiques d'un matériau donné et d'une température donnée.

Isotherme de sorption désorption



une seule couche d'eau recouvre la surface des pores, \Rightarrow d'adsorption monomoléculaire \Rightarrow Le seul mode de transfert possible est la diffusion gazeuse

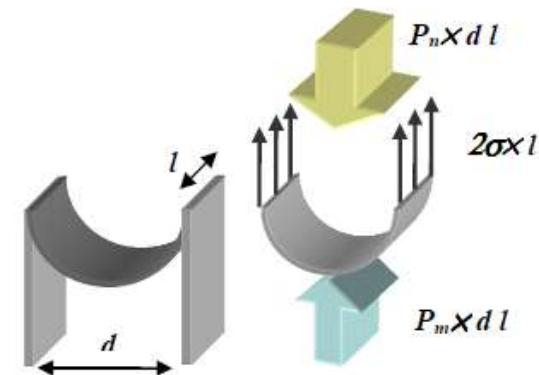
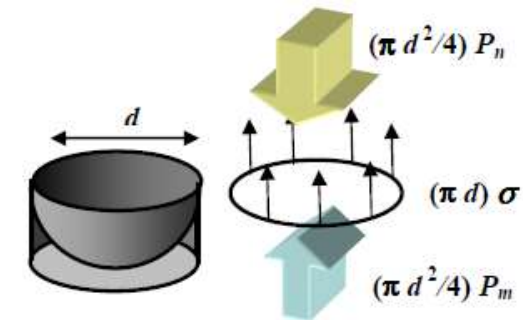
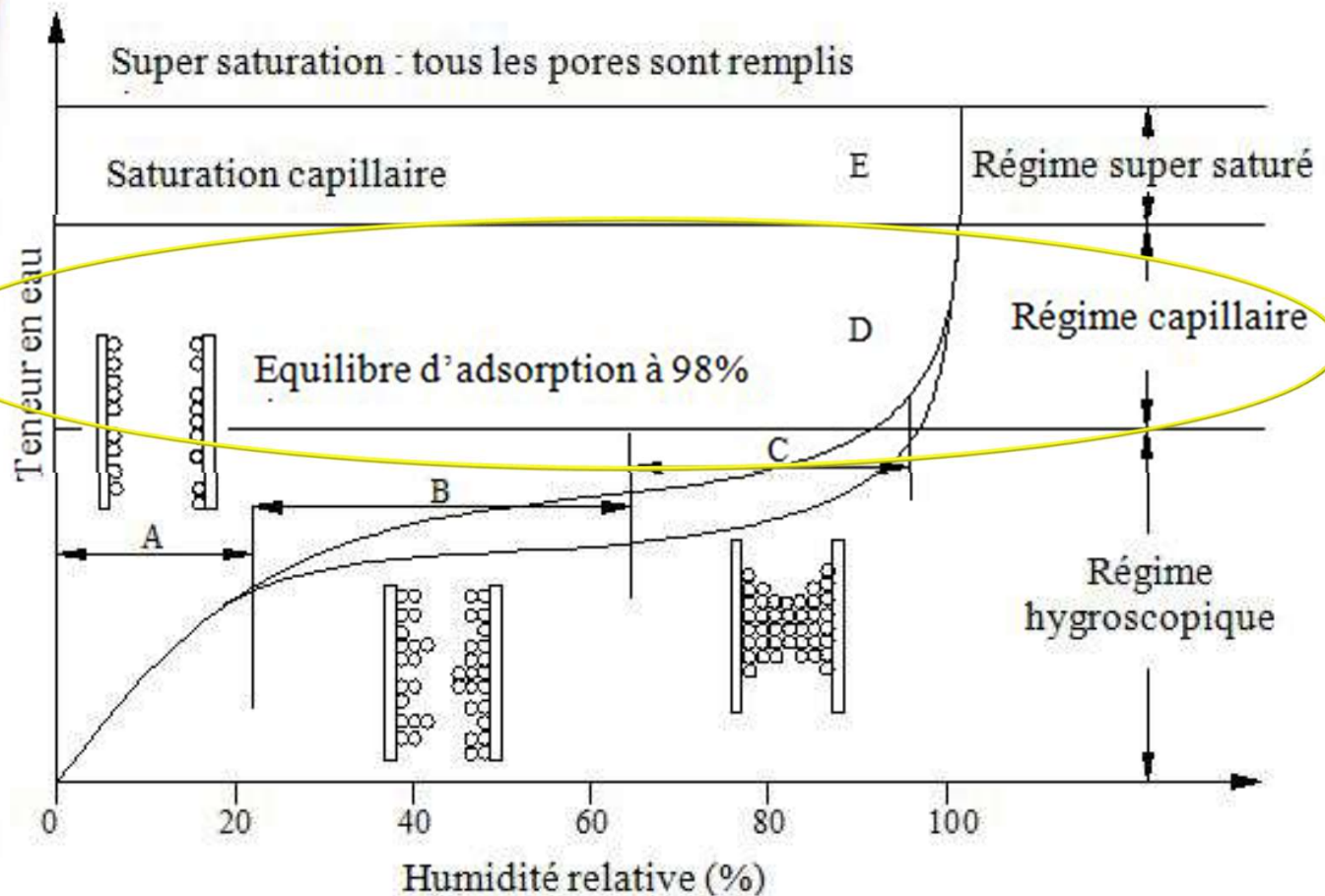
le transfert en phase gazeuse reste dominant. La surface des pores est recouverte de couches moléculaires superposées

augmentation de l'épaisseur de la couche d'eau avec l'augmentation de HR \Rightarrow l'apparition de ponts liquides entre les parois des pores

condensation capillaire remplissage pores de petits diamètres

Région Hygroscopique (A-B-C)

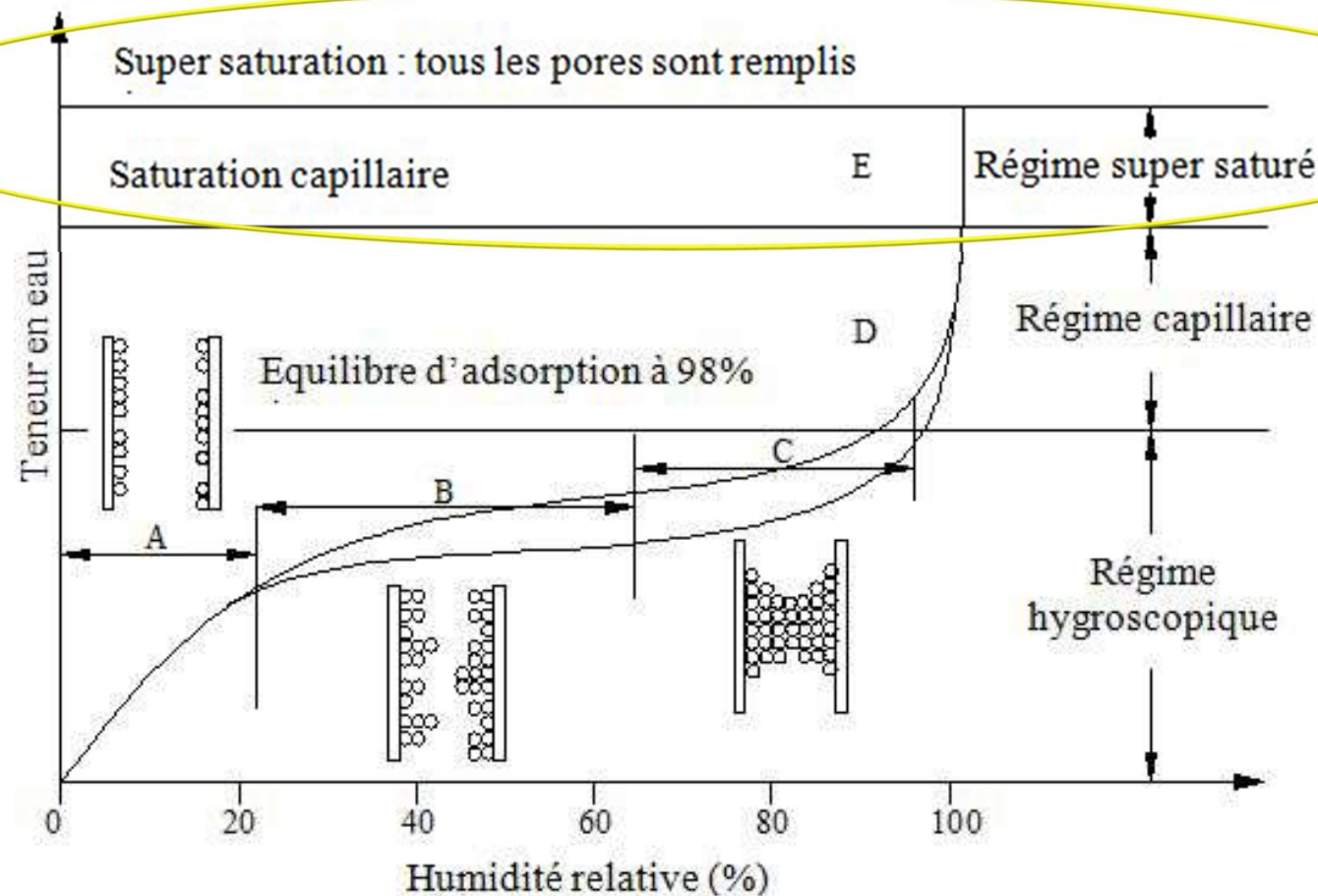
Isotherme de sorption désorption



$$P_c = -\Psi = P_n - P_m = \frac{\sigma}{R_c} = \frac{4\sigma}{d}$$

Région D : caractérisé par une **phase capillaire continue**
 ⇒ le transfert se fait principalement en phase liquide
 C'est la pression capillaire qui gouverne le mouvement.

Isotherme de sorption désorption



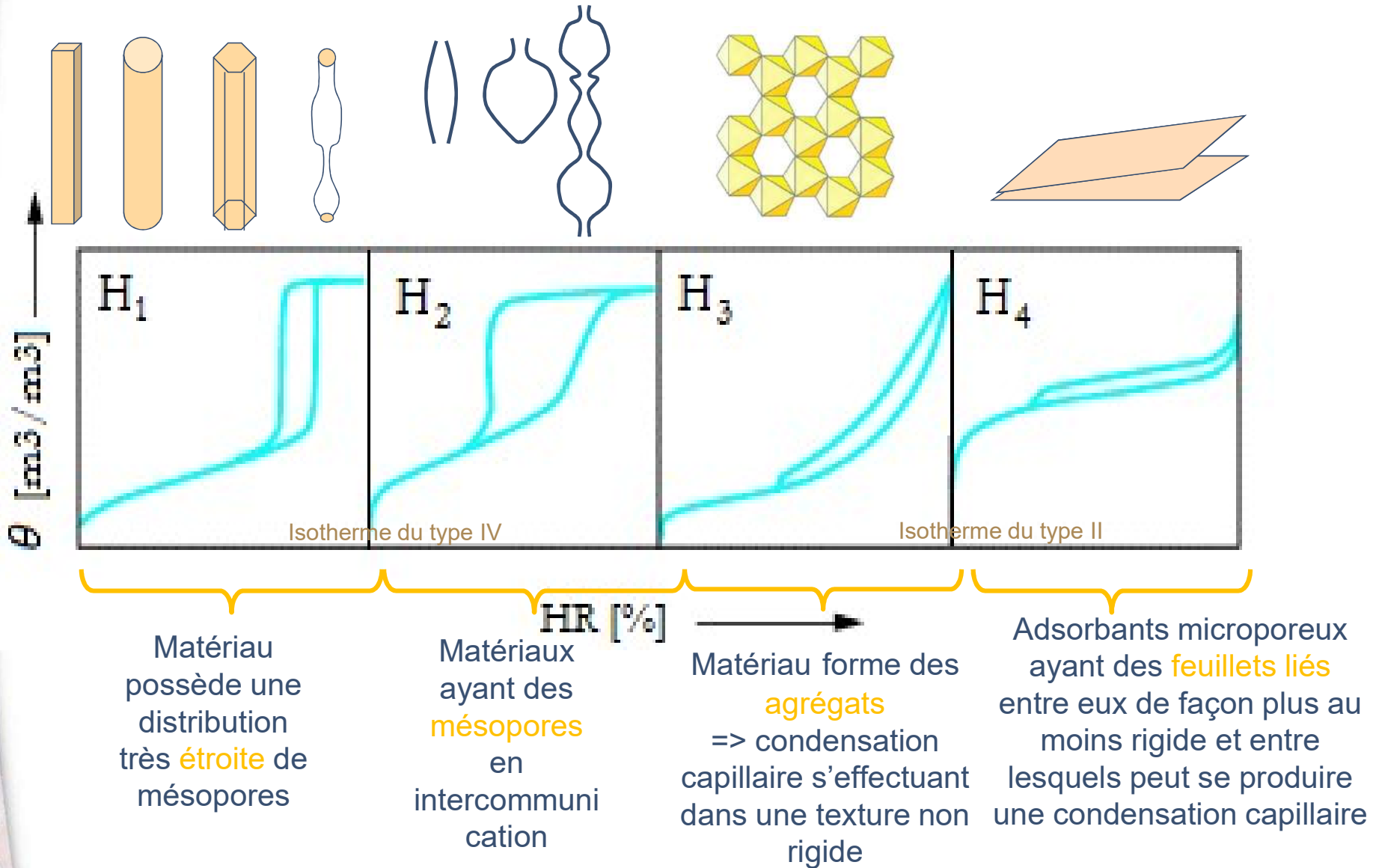
Région E : Cet état peut être atteint par **succion** après une longue durée d'immersion dans l'eau, durée nécessaire pour la dissolution de l'air dans l'eau. En laboratoire cet état peut être atteint par succion sous pression.

A partir de ce régime il n'y a plus d'autres états d'équilibre, l'humidité relative est toujours égale à 100%.

Isotherme de sorption désorption

Phénomène d'hystérésis

la teneur en eau mesurée en désorption pour une humidité relative donnée est supérieure à celle observée en adsorption

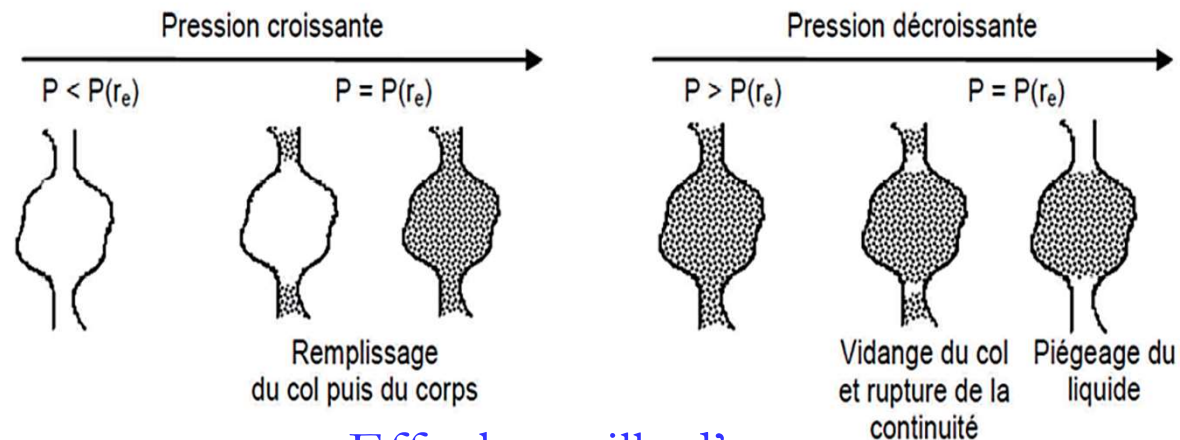


Isotherme de sorption désorption

Raison du phénomène d'hystérésis

=> la courbure d'une interface empêche davantage l'évaporation d'un liquide qu'une surface plane

Le remplissage de la totalité du pore ne se fait que lorsque la pression (P_e) atteint la valeur nécessaire pour remplir le col du rayon d'entrée. Durant le séchage, aucune humidité ne peut être transportée à l'extérieur du pore jusqu'à ce que la pression atteint de nouveau cette valeur (P_e), le ménisque qui remplit le col d'accès, et qui bloque l'humidité à l'intérieur du pore subit soudainement des pertes et une certaine quantité d'eau reste piégée dans le pore



Effet bouteille d'encre

Isotherme de sorption désorption

Méthodes gravimétriques



Dynamic Vapor Sorption
DVS



Masse ~ 30mg
Précision de la balance 0.1 μ g

2 semaines



Vapor Sorption Analyzer
VSA



Masse ~ 500-5000mg
Précision de la balance 0.1 mg

2 semaines



Chambre climatique
EN ISO 12571 (2000)



Masse min. 10000mg
Précision de la balance 1 mg

2 ans

Isotherme de sorption désorption

Méthodes gravimétriques



Chambres climatiques



Préparation échantillons bois (IFB)

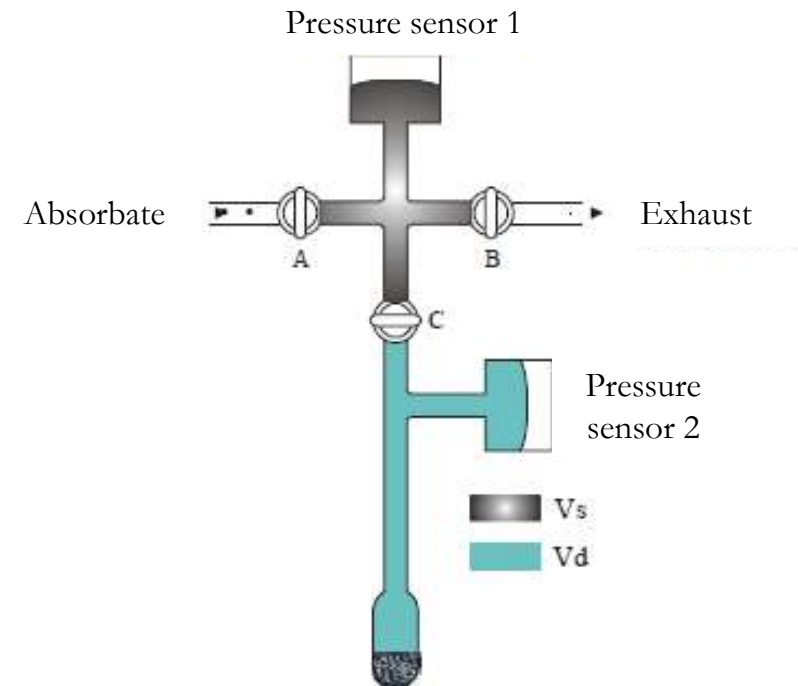
Isotherme de sorption désorption

Méthodes volumétriques

Belsorp Aqua 3



Définir une quantité de gaz adsorbée par l'échantillon en passant par le principe de conservation du nombre de mole

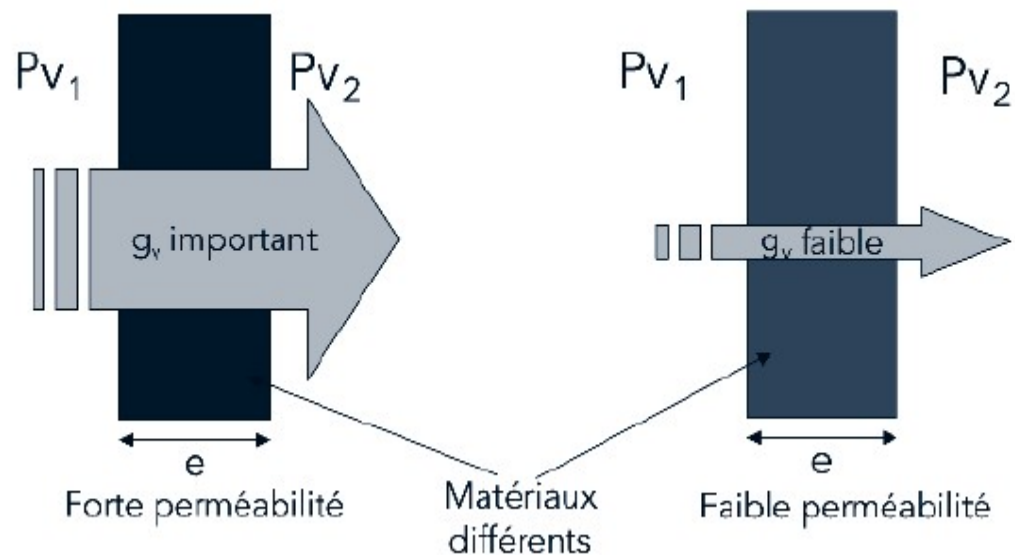


La perméabilité à la vapeur

La perméabilité d'un matériau δ_p définit sa capacité à se laisser traverser par un gaz sous l'action d'une pression entre ses deux faces opposées. Dans le cas où le gaz est la vapeur d'eau, il s'agit du rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité d'épaisseur, de temps et par unité de différence de pression de vapeur régnant de part et d'autre du matériau.

La perméabilité δ_p (ou π) s'exprime en $\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$ ou en $\text{g}/(\text{m.h.mmHg})$.
 $1 \text{ g}/(\text{m.h.mmHg}) = 20,8 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m.s.Pa})$.

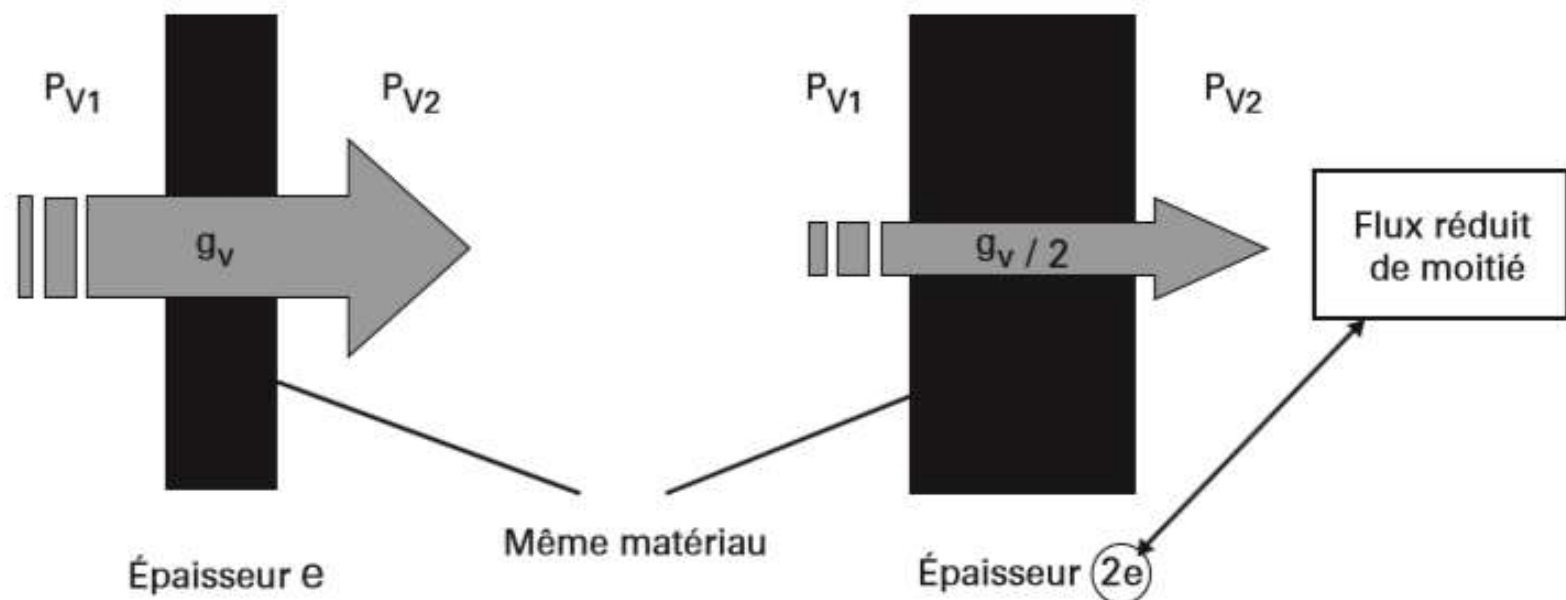
g_v : flux de vapeur
 p_{v1} : pression intérieure
 p_{v2} : pression extérieure



La perméabilité à la vapeur

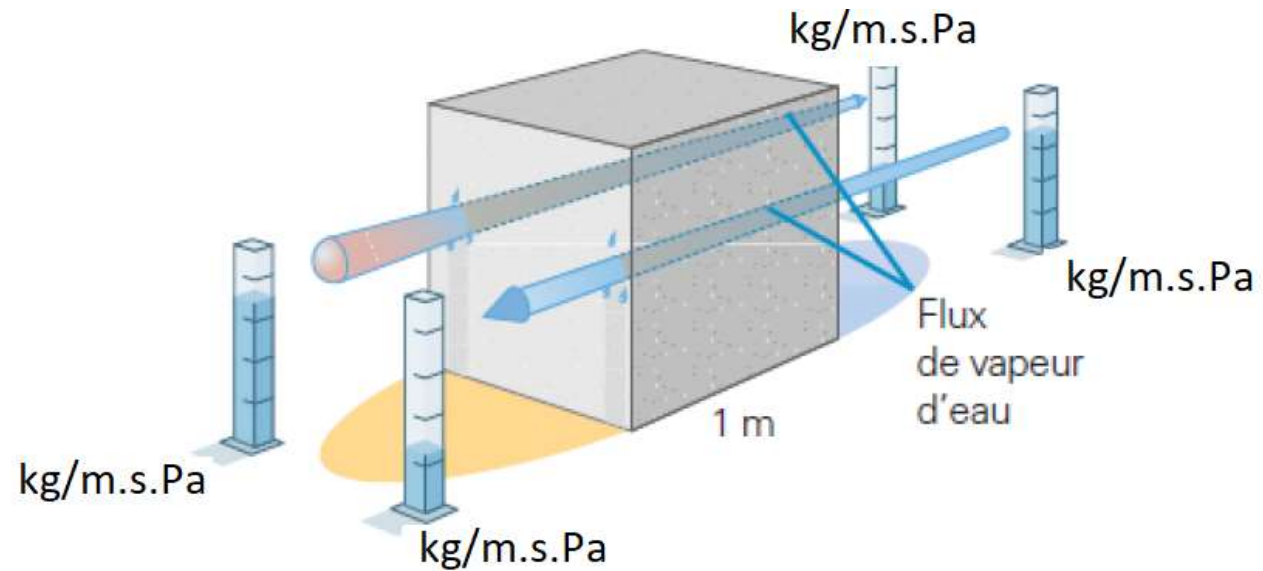
La perméance d'un matériau homogène est le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau sur son épaisseur. Soit :

$(W_p = \frac{\delta_p}{e})$ exprimée en $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$



La perméabilité à la vapeur

- Elle traduit la capacité d'un matériau à être traversé par la vapeur d'eau, exprimée en **kg/m.s.Pa**



- La perméabilité à la vapeur d'eau de l'air peut être calculée selon l'équation :

$$\delta_{air} = 2.10^{-7} \frac{T^{0,81}}{p_0}$$

T : Température en (K)

p_0 : Pression de l'air ambiante en (Pa)

Diapositive 77

K3

Kamilia; 12/03/2019

Coefficient (facteur) de résistance à la diffusion vapeur d'eau : μ

La résistance à la diffusion de la vapeur d'eau est la capacité à freiner la migration de la vapeur d'eau.

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta p} \quad (\text{sans unité})$$

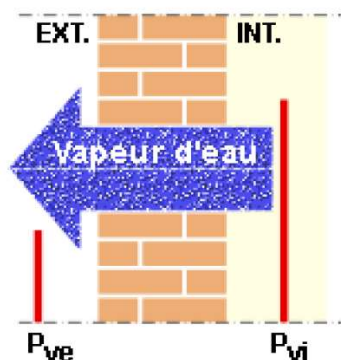
Plus le coefficient est faible et plus la vapeur d'eau peut s'évacuer rapidement à travers le matériau.

=> le **coefficient** de résistance à la diffusion de vapeur d'eau : μ (sans unité)

Il indique dans quelle mesure la vapeur d'eau traverse plus difficilement ce matériau que l'air.

Coefficient de résistance à la vapeur d'eau

Plus μ est élevé, plus la résistance est grande. Une valeur inférieure à 10 correspond à une bonne diffusion de la vapeur d'eau



1



25 à 75



10 000 à 100 000

		<i>Résistance diffusion vapeur d'eau</i>
<i>Isolants écologiques</i>	<i>Chanvre</i>	1
	<i>Paille</i>	1
	<i>Bois</i>	5
	<i>Lin</i>	1
<i>Isolants non écologiques</i>	<i>polystyrène</i>	60(<i>expansé</i>) et 150(<i>extrudé</i>)
	<i>Polyuréthane</i>	150 (<i>mousse</i>)
	<i>Laine de verre</i>	1
	<i>Laine de roche</i>	1

Résistance à la diffusion de vapeur d'eau

$$R_d = \frac{e}{\delta} = \frac{e \cdot \mu}{\delta_{air}} \quad \text{en } (m^2 \cdot s \cdot Pa/kg)$$

Les pare-vapeur sont caractérisés par leur aptitude à résister plus ou moins à la diffusion de vapeur d'eau. Le coefficient S_d , représente la résistance d'un pare-vapeur par rapport à celle qui correspondrait à une épaisseur équivalente d'une couche d'air. S_d est donc défini comme l'épaisseur de la couche d'air ayant une diffusion équivalente en mètre.

Résistance à la diffusion de vapeur d'eau « S_d »

$$S_d = \mu \times e \text{ (épaisseur en m)}$$

Un matériau ayant un S_d de 5 m exerce la même résistance à la vapeur d'eau qu'une lame d'air immobile de 5 m de largeur. Plus le μ et le S_d d'un matériau sont grands, plus ce matériau s'oppose à la migration de la vapeur d'eau.

=> Plus la valeur de S_d est grande, moins le produit laisse passer la vapeur d'eau

Perméance

La perméance est la quantité de vapeur d'eau qui peut traverser une surface de paroi par unité de temps sous une différence de pression donnée.

$$W = \frac{\delta}{e} = \frac{1}{R_d} \quad \text{en (kg/m}^2\text{.s.Pa)}$$

Remarque : La perméance est parfois notée « P » c'est le cas des valeurs présentées dans le tableaux ci-dessous

L'ACERMI détermine 5 catégories de perméance par ordre croissant :

- E1 : $P > 2.25$
- E2 : $0,045 > P > 2,25$
- E3 : $0,113 > P > 0,045$
- E4 : $0,113 > P > 0,0075$
- E5 : $0,0075 > P$

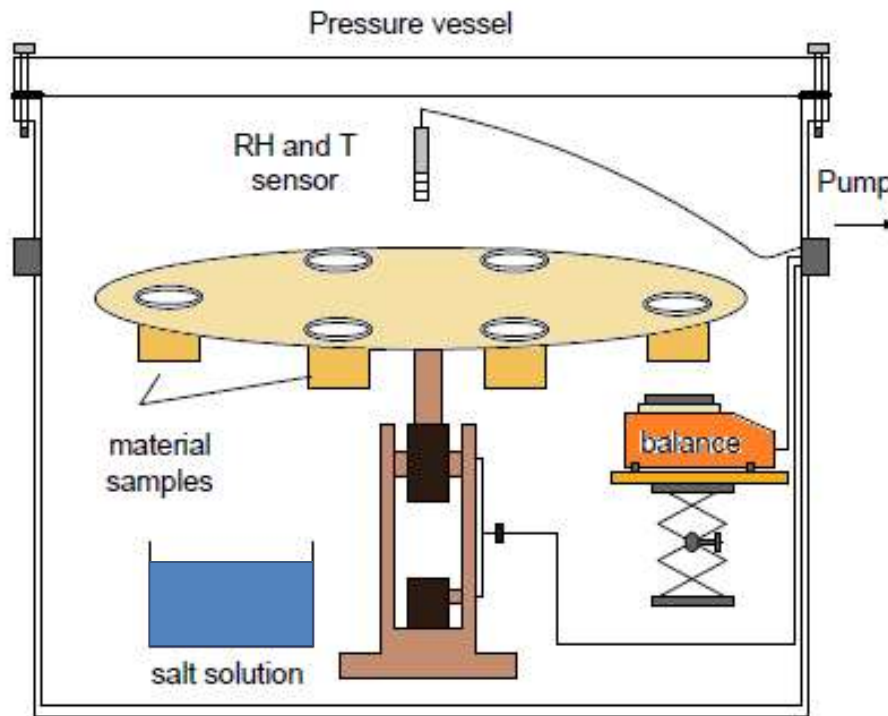
Ce classement indique si l'isolant utilisé nécessite un frein vapeur selon l'endroit où il est placé.

Code	$\mu.d\text{-eq}^*$ (sd)	Matériaux
E1	2 à 5 m	Feuille PE < 0,1 mm, feuille PVC < 1 mm
E2	5 à 25 m	Feuille PE > 0,1 mm, feuille PVC > 1 mm, alu laminé, voile de verre bitumé
E3	25 à 200 m	Bitume armé ou polymère, feuille PIB
E4	> 200 m	Bitume armé d'une feuille métallique, systèmes bitumineux multicouches

* $\mu.d\text{-eq}$: valeur d'équivalente ou coefficient de résistance à la vapeur du produit x l'épaisseur de la couche.

Pérmeabilité à la vapeur

Méthode expérimentale : on impose un statut de HR et on mesure le flux qui en résulte en régime permanent,



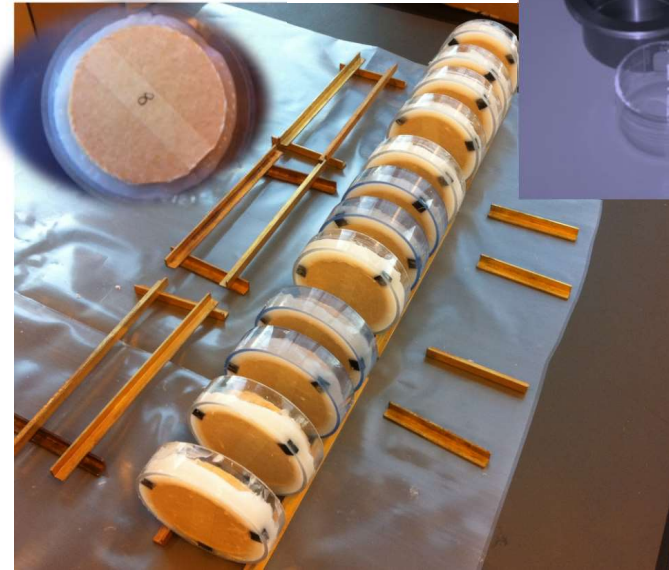
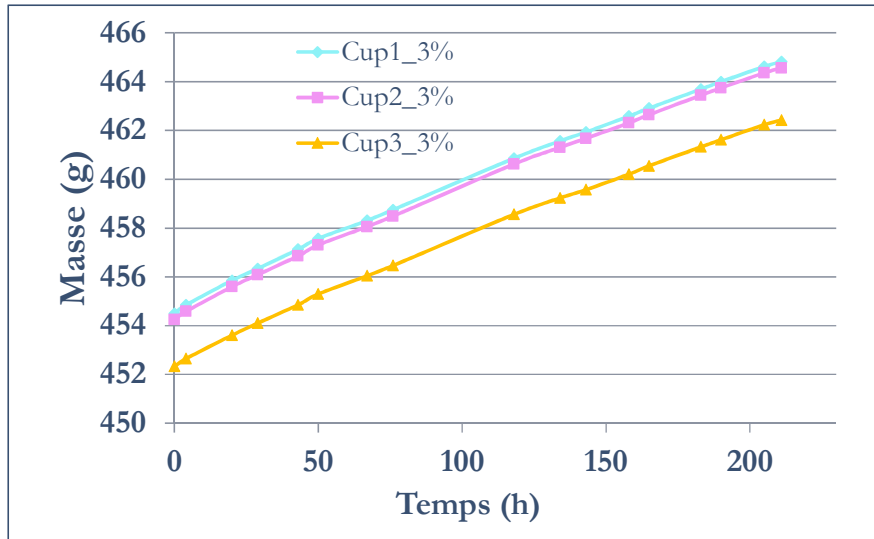
↳ Méthode Coupelle (ISO 12572, 2001)

$$W_p = \frac{j}{S \cdot \Delta P} \text{ (kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)}$$

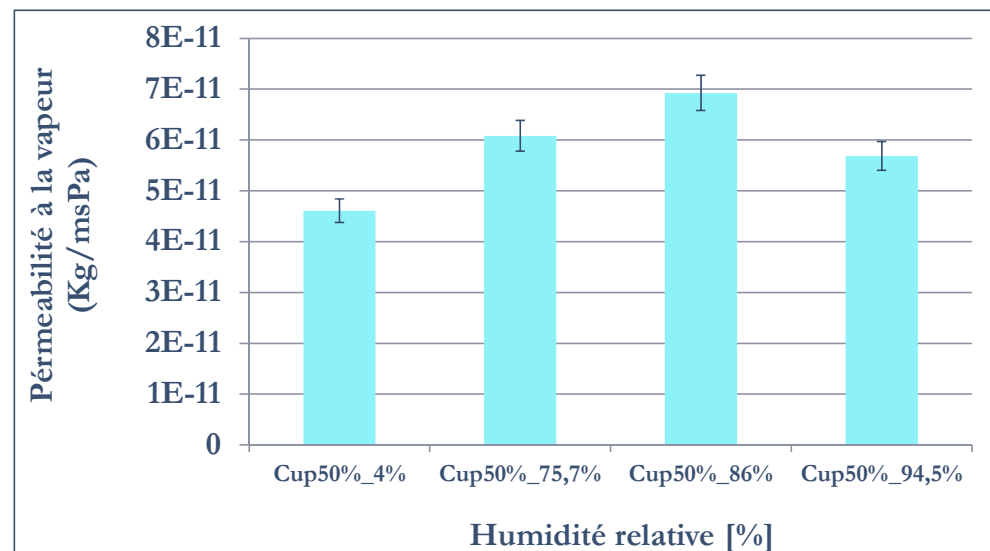
J : Flux de masse (Kg/.s), S surface du matériau (m2)

Chambre de mesure de perméabilité à la vapeur

Pérmeabilité à la vapeur



Variation relative de la masse des 3 coupelles au cours du temps pour HR=3% à l'intérieur



Pouvoir tampon à l'humidité (MBV)

Exemple de caractérisation du MBV

- La valeur tampon hydrique (Moisture Buffer Value) caractérise la capacité d'un matériau, ou d'un composant multicouches, à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant
- Le principe du protocole d'essai associé est de soumettre les échantillons à des cycles d'humidités relatives journaliers, afin d'être représentatifs des cycles rencontrés dans les bâtiments.

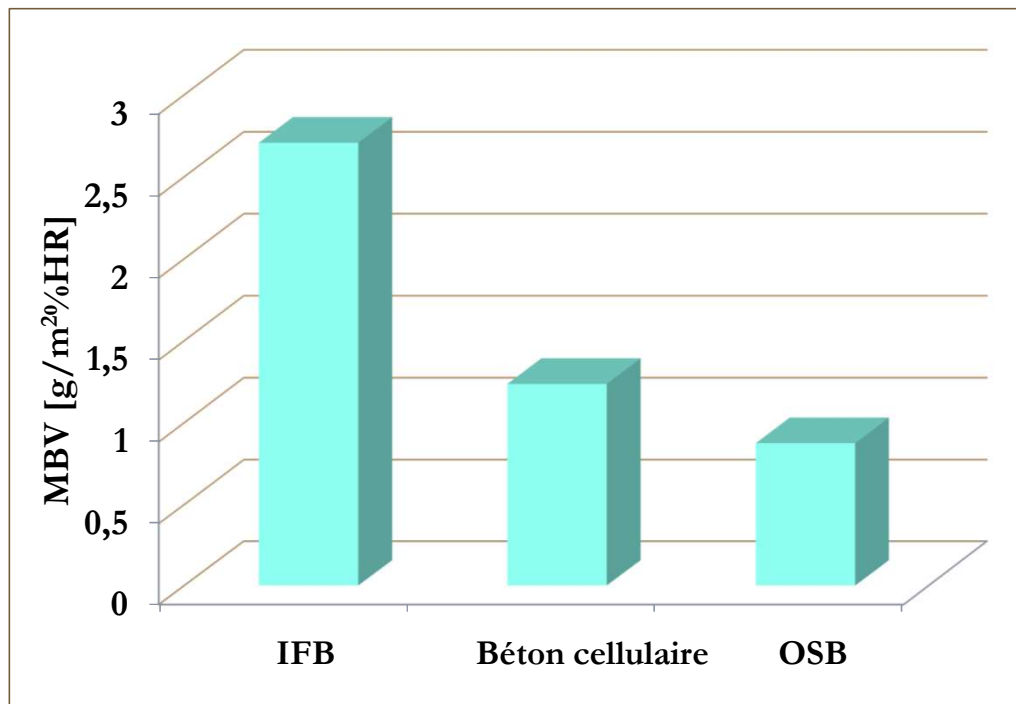


Cette grandeur est utile lors de la conception et de la régulation d'un climat intérieur passif ou lors de l'étude de la résistance d'une construction à la condensation interstitielle

Pouvoir tampon à l'humidité (MBV)

MBV mesuré suivant le protocole Nordetest (Rode *et al.*, 2007)

$$MBV_{8h} = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{A \cdot (HR_{\text{humidification}} - HR_{\text{séchage}})}$$



Les performances de stockage dépendent du MBV de chaque matériau

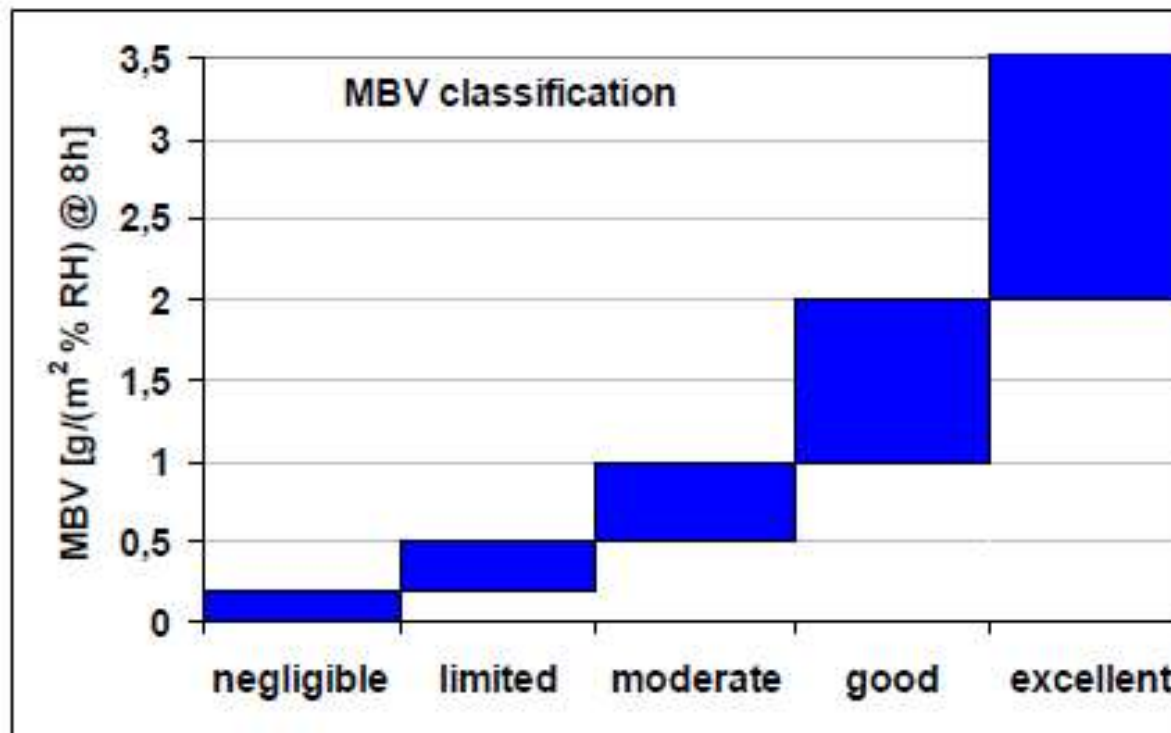


Les échantillons sont exposés à des cycles d'humidification séchage pour 8 et 16 heures respectivement

Pouvoir tampon à l'humidité (MBV)

Classification

MBV _{practical} class	Minimum MBV level	Maximum MBV level
	[g/(m ² % RH) @ 8/16h]	
Negligible	0	0.2
Limited	0.2	0.5
Moderate	0.5	1.0
Good	1.0	2.0
Excellent	2.0	...



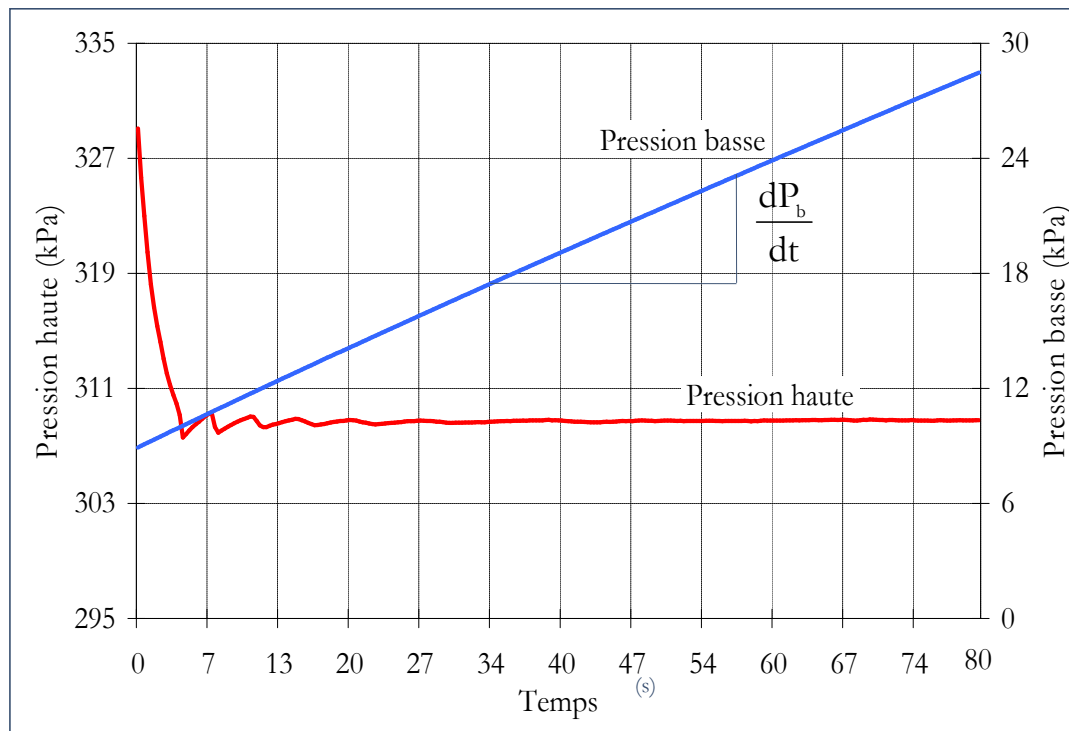
La valeur tampon hydrique mesurée sur l'IBS, montre que ce matériau est un excellent régulateur hydrique

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

$$c \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

↳ Perméabilité au gaz



$$K = \frac{2 \mu L}{[P_H^2 - P_b^2] S} V_b \frac{dP_b}{dt}$$

V_b : volume chambre basse

Perméabilité au gaz

- Approche de Klinkenberg (régime laminaire) (**LGPM**)

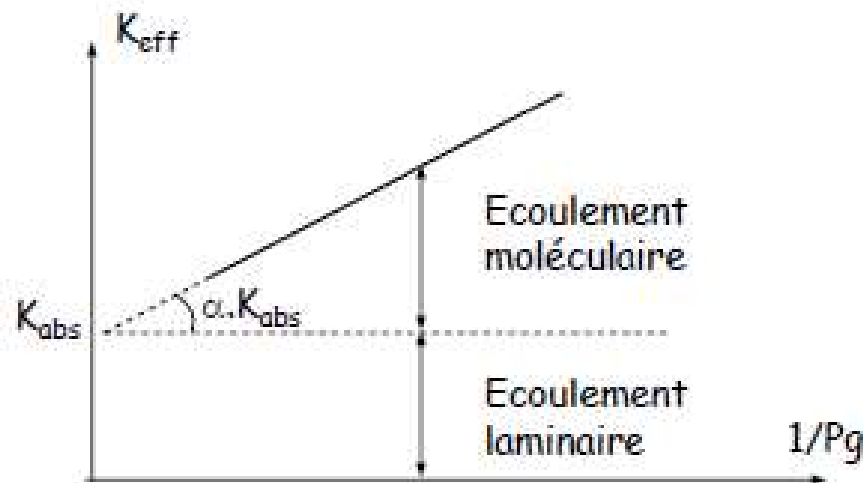
K_{eff} est dépend de la pression appliquée car celle-ci agit sur le libre parcours moyen et donc sur les interactions entre les particules et les parois.

Pour prendre en compte cet effet de pression, Klinkenberg a introduit le facteur β dit facteur de Klinkenberg, tel que

$$K_{eff} = K_{abs} \cdot K_{rel} \cdot \beta(P_g S_r)$$

=> cette dépendance à la pression étant en général linéaire

$$\beta = \left(1 + \frac{\alpha}{P_g} \right)$$



Détermination de la perméabilité absolue



GÉNÉRALITÉS SUR LA MODÉLISATION DES BÂTIMENTS