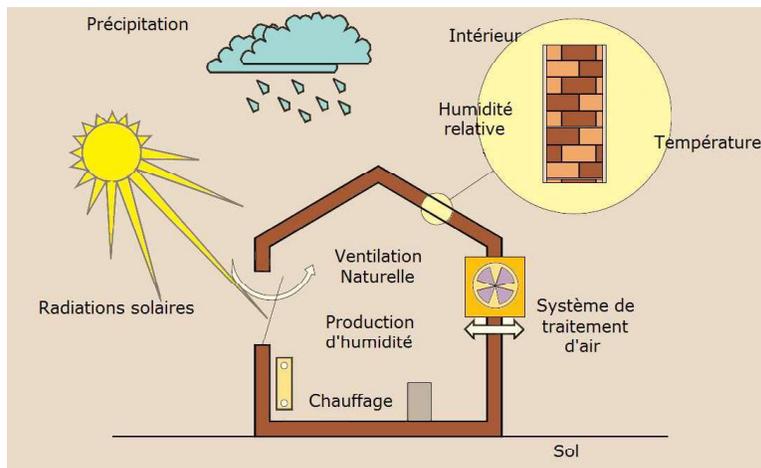




## Transferts dans les milieux poreux



Contact: [kamilia.abahri@imt.ens-cachan.fr](mailto:kamilia.abahri@imt.ens-cachan.fr)



# Analyse quantitative des phénomènes de transferts d'humidité

- Mécanismes de fixation
- Transfert de la vapeur d'eau
- Transfert de la phase liquide

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Adsorption & condensation capillaire

- Il existe deux phénomènes de fixation de l'humidité : l'**adsorption** de surface et la **condensation capillaire**.
- Pour un état hygroscopique donné, la phase adsorbée et la phase capillaire cohabitent dans le milieu poreux.
- Pour expliquer ce phénomène, il est important de différencier les pores de petite taille des plus gros : les pores de faible taille (inférieurs à 100 nm) définissent le domaine hygroscopique du matériau. Dans celui-ci la quantité d'humidité fixée par adsorption et condensation capillaire n'est pas négligeable. Les pores de taille plus importante sont très peu sensibles à ce phénomène. Il existe au sein des matériaux deux domaines aux propriétés différentes.

Domaine hygroscopique	Domaine non hygroscopique
Rayon des pores < 100 nm	Rayon des pores > 100 nm
Adsorption et condensation capillaire importantes	Adsorption et condensation capillaire faibles

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Adsorption

Si l'humidité relative du milieu dans lequel est placé un échantillon de matériau poreux est modifiée et ce à température constante, on constate que le poids de l'échantillon augmente avec l'humidité relative.

Ce phénomène est dû aux forces intermoléculaires de **Van der Waals** agissant sur les molécules de vapeur.

Les molécules d'eau sont adsorbées physiquement. Elles se fixent sur la surface totale offertes par les pores contenus dans le matériau en formant une, puis plusieurs couches successives de molécules d'eau. La surface disponible est la surface spécifique définie précédemment.

Leur objectif commun est de déterminer la teneur en eau adsorbée en fonction de l'humidité relative.

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Adsorption

Un solide est considéré comme poreux si les irrégularités de sa surface sont plus profondes que larges. Nous rappelons que ces substrats sont classés suivants la taille des pores en trois catégories qui sont selon l'IUPAC :

Les micropores :  $d < 2 \text{ nm}$

Les mésopores :  $2 \text{ nm} < d < 50 \text{ nm}$

Les macropores :  $d > 50 \text{ nm}$

La dimension des pores n'est pas le seul paramètre dont dépendent les propriétés d'adsorption dans les solides poreux. Leurs formes, et la façon dont ils sont imbriqués jouent également un rôle très important.

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Adsorption

Il existe deux étapes distinctes au phénomène d'adsorption :

- **l'adsorption monomoléculaire** : fixation d'une seule couche de molécule d'eau à la surface des pores. L'humidité relative est dans ce cas très faible ( $< 20\%$ ). Langmuir (1916) a développé une théorie rendant compte correctement de ces phénomènes ;
- **l'adsorption plurimoléculaire** : fixation de plusieurs couches sur la première. Brunauer, Emmett et Teller (BET, 1938) ont développé un modèle pour exprimer la teneur en eau au cours de ce phénomène.

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

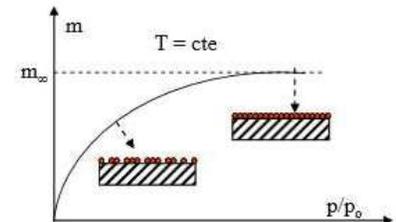
### Théorie de LANGMUIR : adsorption mono-moléculaire

- Les molécules sont adsorbées sur des sites bien définis à la surface de l'adsorbant
- Tous les sites sont identiques
- Chaque site ne peut fixer qu'une molécule => adsorption s'effectue suivant une **couche monomoléculaire**
- L'énergie de chaque molécule adsorbée est indépendante de sa position sur la surface

$$\frac{m}{m_{\infty}} = \frac{k_L P}{1 + k_L P}$$



Existence d'un **équilibre dynamique** entre les molécules qui se fixent sur la surface et celles qui quittent la surface



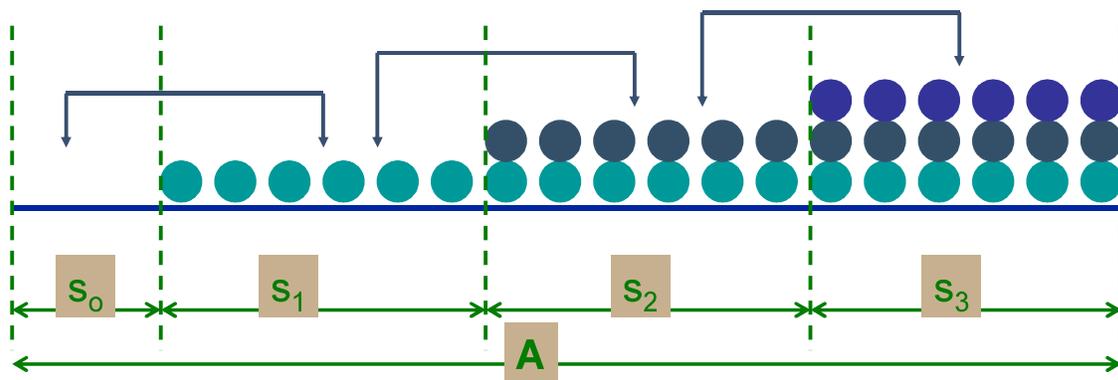
$k_L$  est une fonction de la température et de l'enthalpie d'adsorption d'une molécule de soluté  
 $m$  est la masse de soluté adsorbé à la pression partielle  $P$  par l'unité de masse d'adsorbant frais  
 $m_{\infty}$  est la masse qui serait adsorbée si toute la surface était complètement recouverte par une couche monomoléculaire de soluté



L'équation de Langmuir représentent assez convenablement les **isothermes de type I**

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

l'adsorption plurimoléculaire BET ...



surface  $s_0$  covered with 0 adsorbed layers

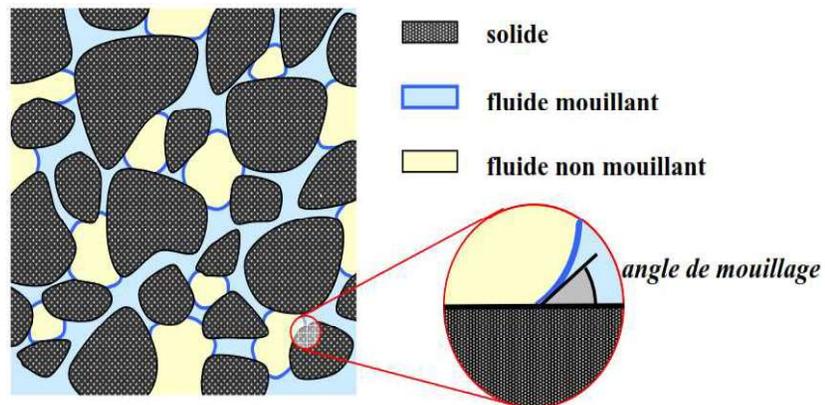
...	$s_1$	...	1
...		...	...
...	$s_i$	...	i

$$\theta = \frac{C \cdot e_m \cdot S_0 \varphi}{(1 - \varphi)(1 + (C - 1)\varphi)}$$

Accessible surface  $A = s_0 + s_1 + \dots + s_i + \dots$

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Condensation capillaire



Au sein d'un pore, les couches plurimoléculaires qui s'accumulent peuvent se rejoindre si le diamètre des pores est suffisamment petit et généralement si l'humidité relative est supérieure à 50 %. Un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque est alors formé. Ainsi, on trouve au sein du matériau une phase liquide et une phase vapeur en équilibre pour une humidité relative inférieure à 100 %.



La loi de **Kelvin Laplace** décrit en réalité cet équilibre

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Eau capillaire : Loi de Kelvin Laplace

- Mouillage d'un matériau poreux => l'existence de part et d'autre d'une différence de pression positive entre l'air humide et l'eau

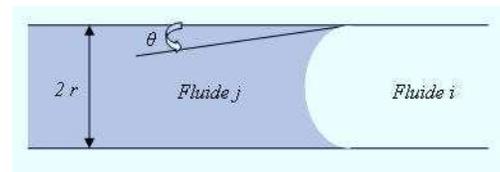
$$P_c = P_g - P_l$$

- La succion totale dans le domaine hygroscopique est souvent exprimé par la Loi de Kelvin

$$P_c = -\frac{RT\rho_l}{M_l} \ln(HR)$$

#### Loi de Laplace :

$$P_c = \sigma \cdot \cos \theta \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



Distribution de fluide dans un capillaire de rayon "r"

=> En hauteur d'eau : **suction**

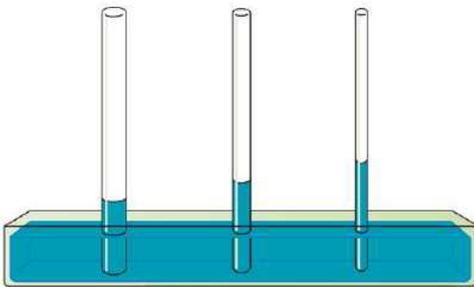
$$\psi = -\frac{P_c}{\rho_l g} = \psi(T, u)$$

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

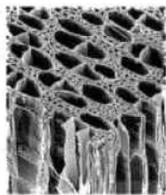
### Capillarité : transfert eau liquide

=> En hauteur d'eau : succion

$$\psi = -\frac{P_c}{\rho_l g} = \psi(T, u)$$

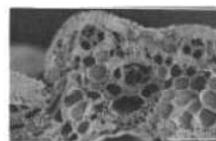


Dépend de la porosité des matériaux (dimension et répartition des pores)



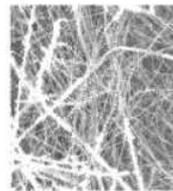
**Bois**

Porosité :  
47 % à 73 %



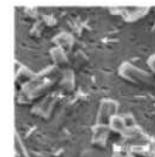
**Polystyrène**

Porosité : 95 %



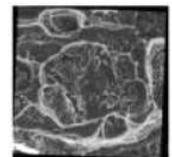
**Laine minérale**

Porosité : 95 %



**Ciment**

Porosité : 25 %



**Aluminium**

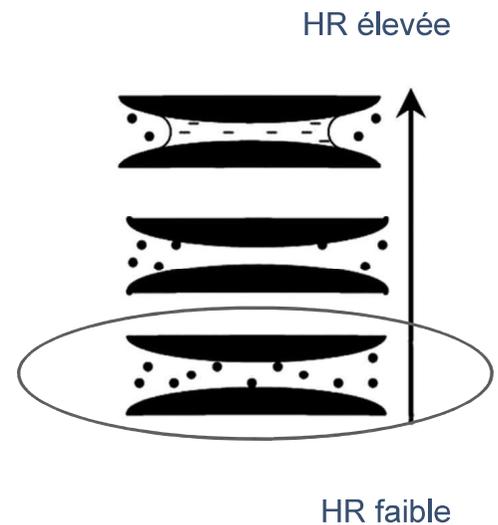
Porosité : 0 %

## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Condensation capillaire

Kelvin a développé une théorie pour décrire cet équilibre en égalisant les potentiels chimiques des deux phases en présence aboutissant à la loi de Kelvin

- ✓ Adsorption+ condensation capillaire  
=> Diffusion, écoulement d'eau liquide
- ✓ Adsorption surfacique  
=> Diffusion vapeur, écoulement surfacique
- ✓ Adsorption moléculaire  
=> Diffusion vapeur

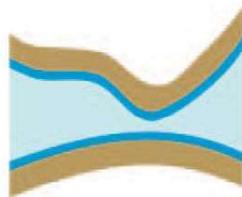


Taille des pores les plus fins : quelques dizaines d'Å  
10 Å = dimension de trois molécules d'eau

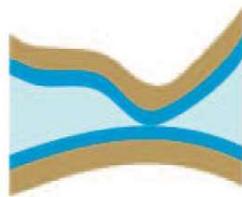
## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Condensation capillaire

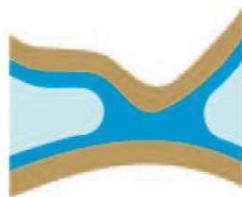
Représentation schématique du mécanisme lorsque l'humidité relative augmente :



1. Pour une faible humidité relative, de l'eau est absorbée par le matériau et forme une fine couche d'eau sur les parois des pores.



2. Lorsque l'humidité relative augmente, l'épaisseur de la couche absorbée augmente. Dans les canaux les plus étroits, les couches se touchent.



3. Lorsque l'humidité relative augmente encore, de la condensation se forme dans les pores les plus étroits du matériau; on dit qu'il y a *condensation capillaire*. Plus les pores sont étroits, plus la formation de condensation capillaire est rapide.

■ Matière solide  
■ Air  
■ Couche d'eau absorbée

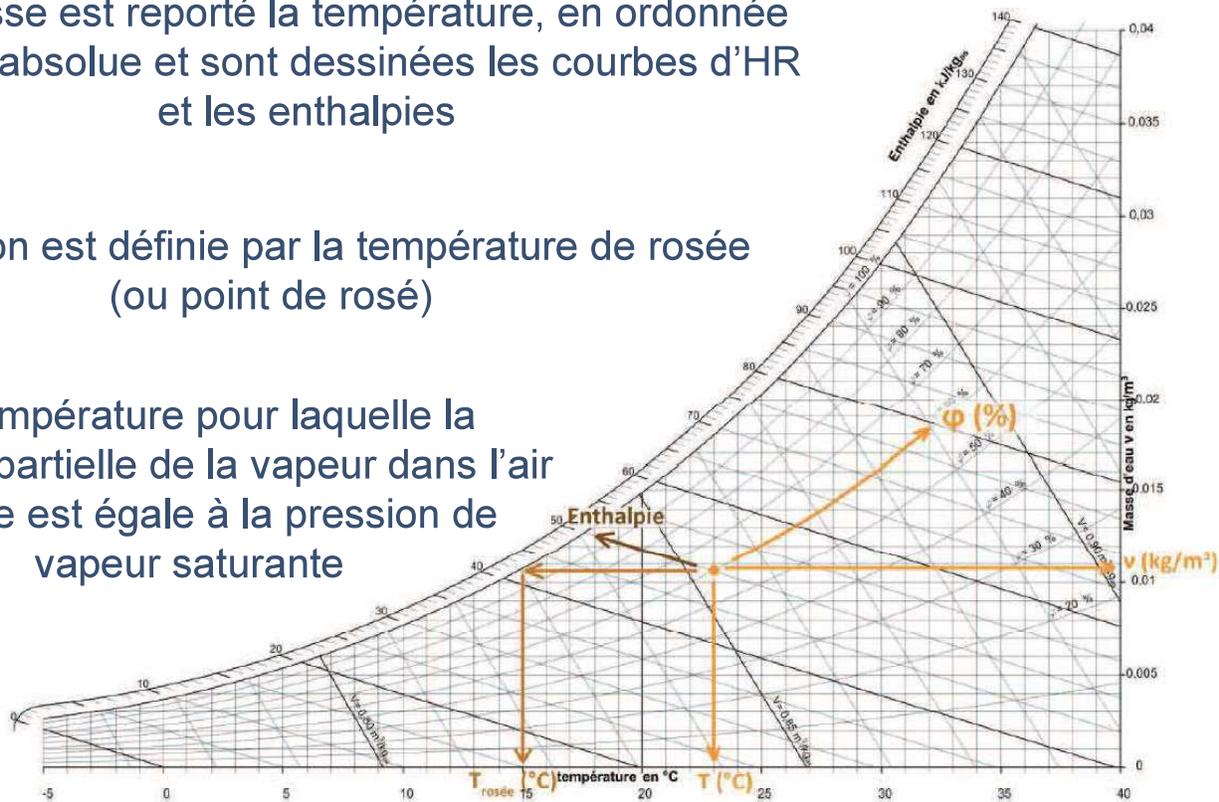
## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Condensation capillaire

En abscisse est reporté la température, en ordonnée l'humidité absolue et sont dessinées les courbes d'HR et les enthalpies

La saturation est définie par la température de rosée (ou point de rosé)

=> température pour laquelle la pression partielle de la vapeur dans l'air humide est égale à la pression de vapeur saturante



## Mécanisme de fixation d'humidité dans un matériau poreux

### Condensation capillaire

#### ↳ Température de rosée

Le point de rosée ou température de rosée est la température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise, à pression et humidité données, sans qu'il ne se produise une formation d'eau liquide<sup>1</sup> par saturation.

C'est une donnée déterminante dans l'isolation thermique du bâtiment qui permettra de savoir s'il y a un risque que l'humidité ambiante d'une pièce se condense en traversant les couches successives d'un mur extérieur, dans lequel chaque couche affiche un gradient de température particulier, dégressif vers l'extérieur. Le cas échéant, l'humidité qui se condense peut provoquer la détérioration de la couche dans laquelle le phénomène se produit.



# Analyse quantitative des phénomènes de transferts d'humidité

- Mécanismes de fixation
- **Transfert de la vapeur d'eau**
- Transfert de la phase liquide

## Transfert d'humidité

### 1) Vapeur d'eau

L'humidité dans le matériau est le plus souvent considérée sous forme de vapeur d'eau. Dans des conditions isothermes et selon le diamètre du pore, le transfert de vapeur dans les matériaux poreux de construction est globalement classé en trois modes différents :

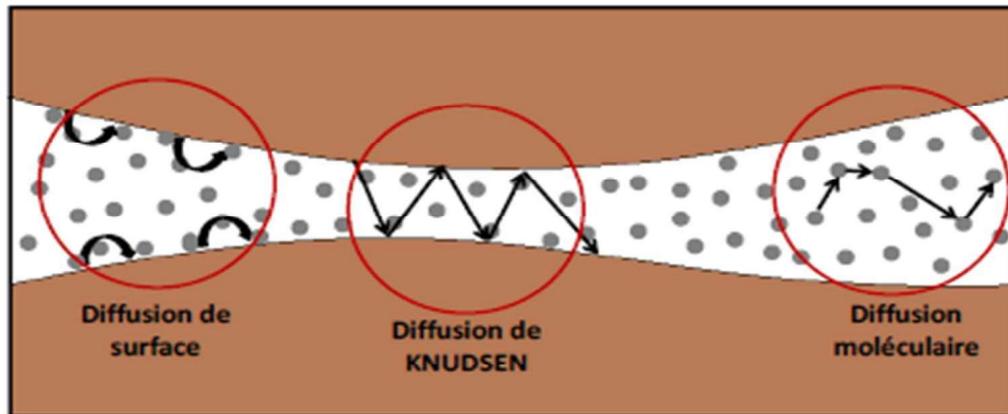


Illustration des modes de diffusion de la vapeur d'eau dans un pore



## Transfert d'humidité

### 1) Vapeur d'eau

⇒ dans les pores de grande taille la probabilité de choc des molécules d'eau contre la paroi est bien plus faible que celle de choc contre les autres molécules.

⇒ le libre parcours moyen (lpm) de la molécule de vapeur d'eau, qui représente la distance statique parcourue par la molécule entre deux chocs moléculaires, est petit devant la taille du pore.

=> Le transfert de vapeur dans les pores de rayon supérieur au libre parcours moyen sera principalement de la diffusion moléculaire

=> le transfert de vapeur dans les pores de rayon inférieur au libre parcours moyen sera de la diffusion de Knüdsen.

## Transfert d'humidité

### 1) Vapeur d'eau

#### Diffusion moléculaire – Loi de Fick

Le transport de vapeur d'eau dans un milieu à pression totale constante se fait par diffusion sous :

- gradient de concentration de vapeur **ou**
- gradient de pression partielle de la vapeur

Le flux de vapeur s'exprime par la relation phénoménologique dite **loi de Fick** représentée par l'équation :

$$j_v = -D_v \cdot \nabla p_v$$

$j_v$  : densité de flux vapeur ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

$p_v$  : pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

$D_v$  : coefficient de diffusion moléculaire ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

La valeur du coefficient de diffusion  $D_v$  résulte du désordre moléculaire et dépend de la pression totale et de la température.

$$D_v = \frac{1}{3} l_{pm} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$l_{pm}$  : libre parcours moyen (m)

R : constante des gaz parfaits,  $R=8,3143 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

T : température en (K)

M : masse molaire (kg/mol)

## Transfert d'humidité

### 1) Vapeur d'eau

#### Diffusion de Knudsen

Dans les cas où le rayon de pores est inférieure au libre parcours moyen, les chocs avec les parois qui régissent la vitesse des molécules => on parle d'effusion

L'équation d'effusion est donnée par :

$$j_v = -D_k \cdot \nabla p_v$$

$j_v$  : densité de flux vapeur selon Knudsen ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

$p_v$  : pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

$D_k$  : coefficient de diffusion moléculaire de Knudsen ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

La valeur du coefficient de diffusion  $D_k$  est proportionnel au rayon du pore,  $r$ (m) :

$$D_k = \frac{2}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

R : constante des gaz parfaits,  $R=8,3143 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

T : température en (K)

M : masse molaire ( $\text{kg}/\text{mol}$ )

## Transfert d'humidité

### 1) Vapeur d'eau

Dans la réalité, les deux phénomènes de diffusion de Fick et de Knudsen ne sont pas séparés et il y a une combinaison de ces deux équations :

$$j_v = -\delta_p \cdot \nabla p_v$$

$j_v$ : densité de flux vapeur ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

$p_v$ : pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

$\delta_p$ : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau ( $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ )

Cette perméabilité permet de se rapprocher plus simplement des propriétés du matériau. A partir de cette équation, il est possible d'écrire :

$$j_v = -\frac{\delta_{air}}{\mu} \cdot \nabla p_v$$

$\delta_{air}$  Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air ( $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ )

$\mu$  Facteur de résistance à la vapeur d'eau (-)

## Transfert d'humidité

### 2) Eau liquide

#### Loi de Darcy

L'écoulement de l'eau liquide est dû à un gradient de pression liquide au sein de l'eau. Celui-ci est dirigé dans le sens des pressions décroissantes.

La densité de flux liquide est décrite par la loi de Darcy qui est la transcription de la loi de Poiseuille à l'échelle macroscopique :

$$V_{moy} = -\frac{k_l}{\mu_l} \nabla p_l$$

$\mu_l$  : viscosité dynamique (kg/m/s)

$p_l$  : pression d'eau liquide (Pa)

$K_l$  : perméabilité liquide (kg/(m.s.Pa) )

$$q_{moy} = -S \cdot \frac{k_l}{\mu_l} \nabla p_l$$

Remarque : HR est reliée à la teneur en eau  $w$  par les isotherme de sorption désorption

## Transfert d'humidité

### 2) Eau liquide

#### Loi de Darcy

L'écoulement de l'eau liquide est dû à un gradient de pression liquide au sein de l'eau. Celui-ci est dirigé dans le sens des pressions décroissantes.

La densité de flux liquide est décrite par la loi de Darcy qui est la transcription de la loi de Poiseuille à l'échelle macroscopique :

$$j_l = -K_l \nabla p_l$$

$j_l$ : densité de flux liquide ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )  
 $p_l$ : pression d'eau liquide (Pa)  
 $K_l$ : perméabilité liquide ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ )

Utilisant la loi de Kelvin  $P_c = P_a - P_l$ , il est alors possible d'écrire :

$$j_l = -K_l \nabla P_c \quad \text{Avec} \quad P_c = \frac{RT\rho_l}{M} \ln(HR)$$

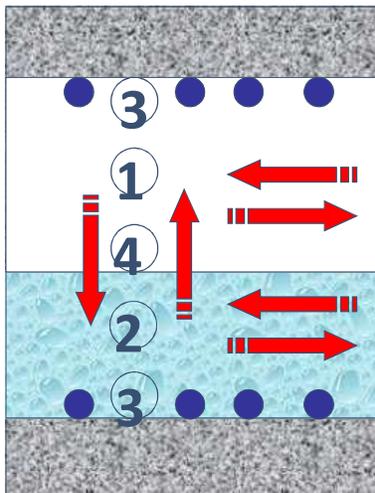
$j_l$  peut s'écrire de la manière suivante en choisissant pour potentiel moteur la teneur en eau :

$$j_l = -D_w \nabla u$$

$D_w$ : coefficient de transport capillaire ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $u$ : teneur en eau en masse par volume ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Remarque :  $HR$  est reliée à la teneur en eau  $u$  par les isotherme de sorption désorption

## Transfert 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

## Transfert d'humidité

### Bilan mécanismes de transfert

Mécanisme de transport		Cause et potentiel de transport
transport de chaleur	conduction de chaleur	température
	échanges radiatifs	température à la puissance 4
	flux d'air	pression totale, différentiels de densité
	flux d'enthalpie dus au mouvement d'humidité	diffusion de vapeur avec changement de phase et flux de transport liquide dans le champ de température
transport de vapeur	diffusion de gaz	pression de vapeur (température, pression totale)
	transport moléculaire (effusion)	pression de vapeur
	diffusion en solution	pression de vapeur
	convection	gradient de pression totale
transport liquide	conduction capillaire	force capillaire de succion
	diffusion de surface	humidité relative
	flux du aux infiltrations	gravité
	flux hydraulique	différentiels de pression totale
	électrocinétique	champs électriques
	osmose	concentration d'ions

## Transfert d'humidité

### Bilan hydrique : conservation de la masse

- Vapeur  $\frac{\partial u_v}{\partial t} = -div(\mathbf{j}_v) - \dot{m}$
- Liquide  $\frac{\partial u_l}{\partial t} = -div(\mathbf{j}_l) + \dot{m}$
- Air sec  $\frac{\partial u_a}{\partial t} = -div(\mathbf{j}_a)$

### Bilan : modes de transfert à modéliser

- Eau liquide : Loi de Darcy
- Vapeur d'eau : Loi de Fick
- Air sec : Loi de Darcy
- + Transport convectif de vapeur entraîné par la migration de l'air sec

Seuls les transports moléculaires et le flux hydraulique sera considéré. En supposant que le rayon du pore est supérieure au libre parcours moyen, le transfert de vapeur se fera par diffusion de Fick

## Transfert couplé de chaleur et d'humidité

### Couplage : vapeur d'eau + eau liquide

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_v}{\partial t} &= -\text{div}(\mathbf{j}_v) - \dot{m} \\ \frac{\partial u_l}{\partial t} &= -\text{div}(\mathbf{j}_l) + \dot{m} \end{aligned} \right\} \frac{\partial u}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{j}_l + \mathbf{j}_v)$$

$u$  : teneur en eau totale, liquide + vapeur ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )       $\mathbf{j}_l = -D_w \nabla u$        $\mathbf{j}_v = -\delta_p \cdot \nabla p_v$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(D_w \nabla u + \delta_p \cdot \nabla p_v)$$

### Transfert de chaleur

$$c \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{j}_q) - h_{lv} \dot{m}$$

$$\mathbf{j}_q = \underbrace{-\lambda \nabla T}_{\text{Conductive transfer}} + \underbrace{h_l \mathbf{j}_l + h_v \mathbf{j}_v}_{\text{Convective transfer (liquid and vapor)}}$$

Conductive transfer      Convective transfer (liquid and vapor)

## Transfert couplés de chaleur et d'humidité

### Résolution des équations : conditions aux limites

Le flux imposé et la concentration de vapeur à la frontière de la paroi suit une loi d'échange par transfert convectif :

$$g_v = h_m [(\rho_v)_{frontière} - (\rho_v)_{ambiance}]$$

Où  $g_v$  : densité de flux de vapeur (kg/(m<sup>2</sup>.s))

$h_m$  : coefficient d'échange convectif massique (m/s)

$\rho_v$  : masse volumique de la vapeur (kg/m<sup>3</sup>)

Il est possible d'attribuer des conditions du même type pour le flux de chaleur ::

$$q = h_c (T_{frontière} - T_{ambiance})$$

Où  $q$  : densité de flux de chaleur (W/m<sup>2</sup>)

$h_c$  : coefficient d'échange convectif thermique (W/m<sup>2</sup>.K)

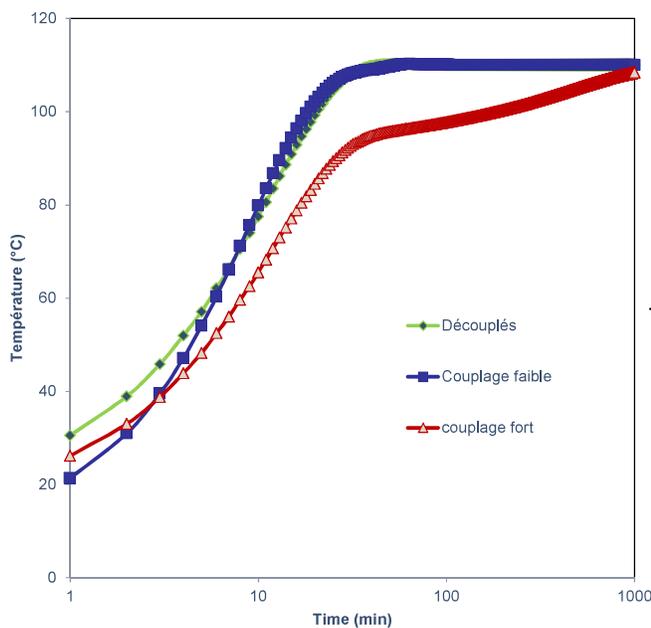
T : température (K ou °C)

Il existe une corrélation entre les coefficients d'échange  $h_c$  et  $h_m$  pour les fluides libre :

$$h_m = h_c \frac{D_{v0}}{\lambda_{ambient}}$$

Où  $D_{v0}$  : coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ambient ( $D_{v0} = 2,5.10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s)

## Influence du couplage sur les modèles de transfert couplés de chaleur et d'humidité



### Modèle de Luikov

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho C_m (\sigma L_{lv}) \frac{\partial \rho_v}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_m \rho_v) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_m \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon D_m \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

$$\lambda = \lambda_s + \theta_l \cdot \lambda_e$$

Ecart constaté de 10° C dès la première minute sur les valeurs des températures de surface

Ecart maximum constaté de 20° C



# Evaluation des transferts d'humidité dans une paroi courante de bâtiment en régime permanent

## Diffusion de vapeur en régime isotherme

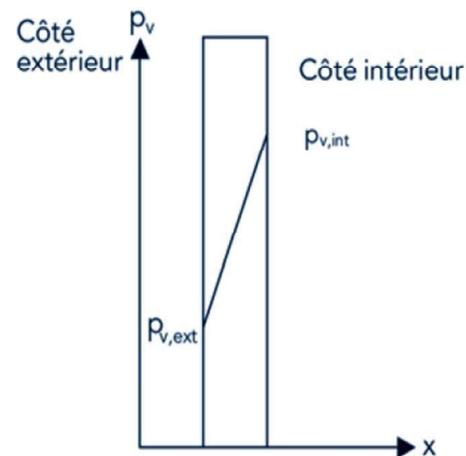
### Parois monocouche

- les pressions partielles de vapeur sont différentes dans chaque ambiance, notons les  $P_{v,int}$  et  $P_{v,ext}$  avec  $P_{v,int} > P_{v,ext}$

$$g_v = -\delta_p \Delta P_v$$

En régime permanent  $g_v$  est constant d'où une variation linéaire de la pression partielle de vapeur  $P_v$  dans la paroi :

$$g_v = -\delta_p \frac{dp_v}{dx} = \delta_p \frac{P_{v,int} - P_{v,ext}}{e}$$





## Diffusion de vapeur en régime isotherme

### Parois multicouche

- Lorsqu'une paroi composée de plusieurs couches de matériaux homogènes de perméabilités différentes sépare deux ambiances où règnent des pressions de vapeur différentes :  $P_{v,int}$  et  $P_{v,ext}$  avec  $P_{v,int} > P_{v,ext}$ .
- Il est possible en régime isotherme de déterminer le diagramme de pression partielle de vapeur dans cette paroi multicouche.
- Pour cela on raisonne par **analogie avec le calcul de flux de chaleur** dans une paroi multicouche et le tracé du diagramme de température

## Diffusion de vapeur en régime isotherme

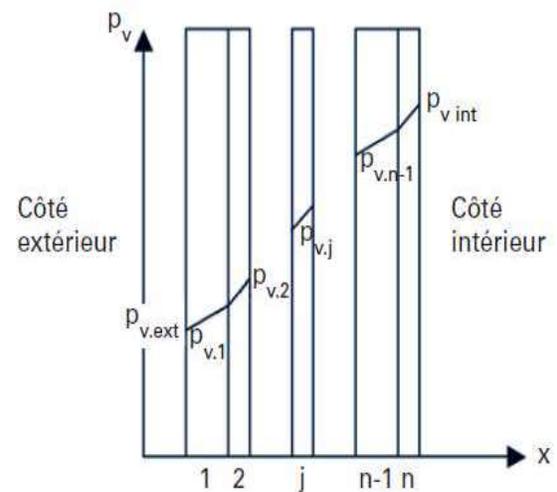
Le transfert au niveau de la couche  $j$  est le suivant :

$$g_{v,j} = \delta_{p,j} \frac{P_{v,j} - P_{v,j-1}}{e_j}$$

$$\begin{aligned} g_v &= \delta_{p,1} \frac{P_{v,1} - P_{v,ext}}{e_1} = \delta_{p,2} \frac{P_{v,2} - P_{v,1}}{e_2} = \delta_{p,j} \frac{P_{v,j} - P_{v,j-1}}{e_j} \\ &= \delta_{p,n} \frac{P_{v,int} - P_{v,n-1}}{e_n} = \frac{P_{v,int} - P_{v,ext}}{\sum_1^n \frac{e_j}{\delta_{p,j}}} \end{aligned}$$

La perméance totale de la paroi est telle que :

$$\left( \frac{e}{\delta_p} \right)_{\text{équivalent}} = \sum_1^n \frac{e_j}{\delta_{p,j}}$$



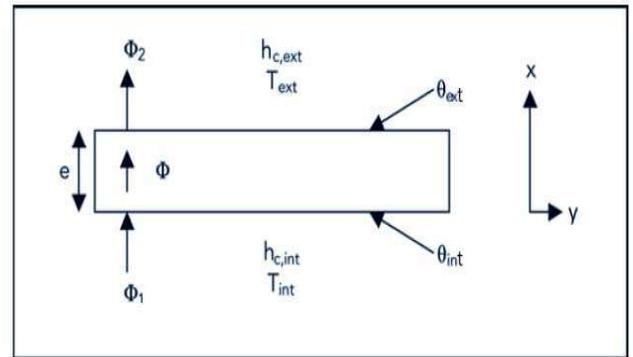
## Diffusion de vapeur sous gradient thermique

Par analogie électrique  $R_T$  est la résistance thermique équivalente de l'ensemble ; parois et conditions limites :

$$R_T = \frac{1}{h_{c,ext}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{c,int}}$$

Le flux total transmis par conduction à travers le mur est le suivant :

$$\Phi = \frac{S}{R_T} (T_{int} - T_{ext})$$



## Diffusion de vapeur sous gradient thermique

Ce flux est égal aux flux convectifs  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  soit :

$$\Phi = \Phi_2 = h_{c,ext} S (\theta_{ext} - T_{ext}) = \Phi_1 = h_{c,int} S (T_{int} - \theta_{int})$$

De ces égalités on peut en tirer les températures de parois  $\theta_{ext}$  et  $\theta_{int}$  ainsi que le profil de température dans le mur :

$$\begin{aligned} \theta_{int} &= T_{int} - \frac{\Phi}{Sh_{\theta,int}}; \theta_{ext} = T_{ext} + \frac{\Phi}{Sh_{\theta,ext}}; T_{mur} \\ &= (\theta_{ext} - \theta_{int}) \frac{x}{e} + \theta_{int} \end{aligned}$$

