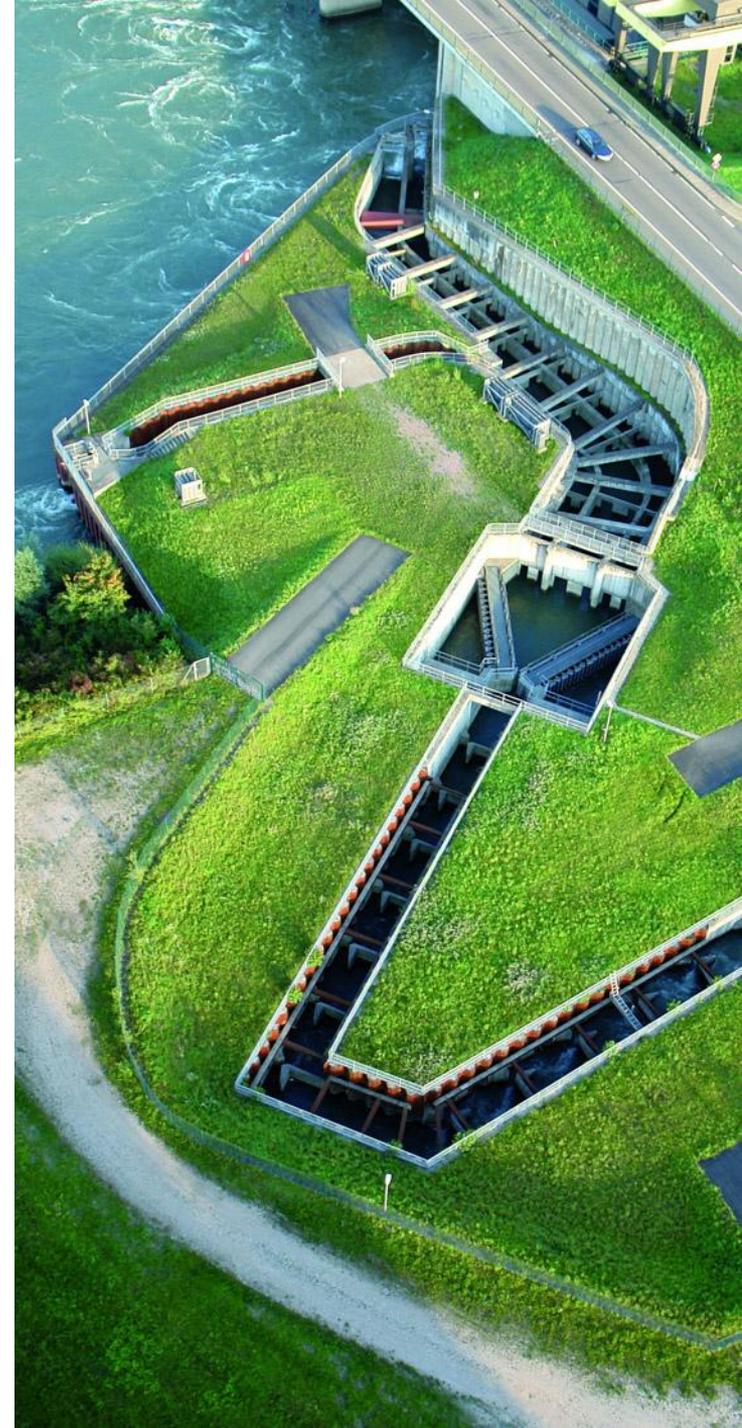




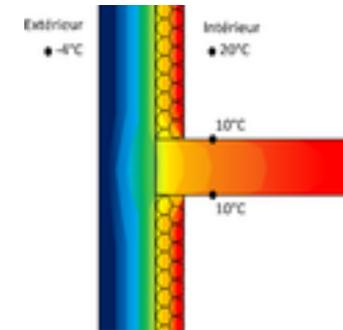
MODÉLISATION DES TRANSFERTS COUPLÉS.

Impact de la pression gazeuse.
Illustration sur la méthode de la
coupelle.

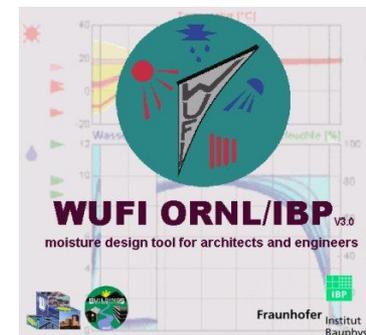
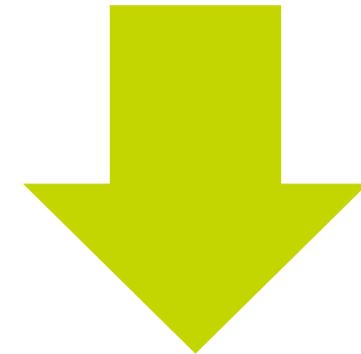


RAPIDE HISTORIQUE DES TRANSFERTS DE MASSE ET DE CHALEUR DANS LE BÂTIMENT.

- 1975. Une problématique scientifique et technique qui s'impose dans le sillage de l'isolation thermique.
 - Parois hétérogènes, points froids, risques de condensation.
- 1980. Avènement du modèle de GLASER.
 - Régime permanent.
 - Non couplé en thermique et humidité.
 - Transferts de vapeur seulement.
- 1990. Puis une émergence lente de modèles couplés issus de l'agriculture.
 - Potentiels et domaines hygrométriques inadaptés.
- 2000. Généralisation des modèles de transferts couplés de chaleur et d'humidité adaptés en 2D/3D.



$$\vec{g}_v = -\pi \vec{\nabla} p_v$$
$$\vec{g}_c = -\lambda \vec{\nabla} T$$



DES MODÈLES COUPLÉS DE TRANSFERT D'AIR, D'HUMIDITÉ ET DE CHALEUR ...

- Mais qui ont hérité des « tropismes » historiques des modèles du bâtiment.
 - Une formulation « GLASER » améliorée du transfert de vapeur, somme d'une diffusion (en gradient de P_v) et d'une advection (en gradient de P_t).
 - Seul le couplage entre flux de chaleur et flux d'humidité est pris en compte :
 - Transfert d'humidité sous l'effet d'un gradient de température via la perméabilité liquide de Darcy.
 - Transfert de chaleur sous l'effet d'un transfert de vapeur dû au transfert de chaleur latente.

$$\vec{g}_v = -\pi \vec{\nabla} p_v - \omega_{mv} K_t \vec{\nabla} p_t$$

$$\vec{g}_h = -\frac{K_l \rho_l}{T} (r_v T \ln(HR) - L(T)) \vec{\nabla} T - \pi \vec{\nabla} p_v$$

$$\vec{g}_c = -\lambda \vec{\nabla} T + L(T) \vec{g}_v$$

UN MODÈLE BASÉ SUR LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT.

Conservation de l'énergie

$$\begin{aligned} & \left(\rho_s C_s + \tau_v C_l - \tau_v h_p + \varphi_v \left(C_l + \frac{dL(T)}{dT} \right) + \varphi_{as} C_{pas} - (L(T) + h^m) \left(\frac{\beta_p p_v}{\rho_l r_v T} + \frac{\varepsilon p_v}{r_v T^2} \right) + \frac{p_l \beta_p}{\rho_l} \right) \frac{dT}{dt} \\ & + \left(-\tau_v h_r + (L(T) + h^m) \left(-\frac{p_v \alpha_r}{\rho_l r_v T} + \frac{\varepsilon}{r_v T} \right) + \frac{p_l \alpha_r}{\rho_l} \right) \frac{dp_v}{dt} \\ & - \varepsilon \frac{dp_l}{dt} = \\ & \vec{\nabla} \cdot \left[\lambda^* \vec{\nabla} T + (L(T) + h^m) \left(\frac{\pi_v^*}{p_l} \right) \vec{\nabla} p_v + (L(T) + h^m) \left(\omega_{mv} K_t - \frac{\pi_v^* p_v}{p_l^2} \right) \vec{\nabla} p_l \right] \end{aligned}$$

Conservation de la masse d'eau

$$\begin{aligned} & \left(\beta_p - \frac{\varepsilon p_v}{r_v T^2} \right) \frac{dT}{dt} + \left(\alpha_r + \frac{\varepsilon}{r_v T} \right) \frac{dp_v}{dt} = \\ & \vec{\nabla} \cdot \left[K_l \rho_l \left(r_v \ln \left(\frac{p_v}{p_{sat}(T)} \right) - \frac{L(T)}{T} \right) \vec{\nabla} T + \left(\frac{\pi_v^*}{p_l} + K_l \frac{\rho_l r_v T}{p_v} \right) \vec{\nabla} p_v + \left(\omega_{mv} K_t - \frac{p_v \pi_v^*}{p_l^2} \right) \vec{\nabla} p_l \right] \end{aligned}$$

Conservation de la masse d'air sec

$$\begin{aligned} & -\frac{p_l - p_v}{r_{as} T} \left(\frac{\beta_p}{\rho_l} + \frac{\varepsilon}{T} \right) \frac{dT}{dt} - \frac{1}{r_{as} T} \left(\frac{\alpha_r (p_l - p_v)}{\rho_l} + \varepsilon \right) \frac{dp_v}{dt} + \frac{\varepsilon}{r_{as} T} \frac{dp_l}{dt} = \\ & \vec{\nabla} \cdot \left[\left(-\frac{\pi_v^* M_{as}}{p_l M_v} \right) \vec{\nabla} p_v + \left(\rho_{as} \frac{K k_{rg}}{\eta_l} + \frac{\pi_v^* p_v M_{as}}{p_l^2 M_v} \right) \vec{\nabla} p_l \right] \end{aligned}$$

UN MODÈLE BASÉ SUR LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT.

- Le modèle que nous proposons est tout à fait classique dans sa structure...

- Equations de conservation de l'énergie et des masses d'humidité et d'air sec, corpus d'hypothèses sur les milieux poreux.

- ... et dans le choix de ses potentiels.

- Température, pression partielle de vapeur, pression total du gaz.

Conservation de l'énergie

$$\begin{aligned} & \left(\rho_s C_s + \tau_v C_l - \tau_v h_p + \varphi_v \left(C_l + \frac{dL(T)}{dT} \right) + \varphi_{as} C_{pas} - (L(T) + h^m) \left(\frac{\beta_p p_v}{\rho_l r_v T} + \frac{\varphi_v}{r_v T^2} \right) + \frac{p_l \beta_p}{\rho_l} \right) \frac{dT}{dt} \\ & + \left(-\tau_v h_r + (L(T) + h^m) \left(-\frac{p_v \alpha_r}{\rho_l r_v T} + \frac{\varepsilon}{r_v T} \right) + \frac{p_l \alpha_r}{\rho_l} \right) \frac{dp_v}{dt} \\ & - \varepsilon \frac{dp_l}{dt} = \\ & \vec{\nabla} \cdot \left[\lambda^* \vec{\nabla} T + (L(T) + h^m) \left(\frac{\pi_v^*}{p_l} \right) \vec{\nabla} p_v + (L(T) + h^m) \left(\omega_{mv} K_t - \frac{\pi_v^* p_v}{p_l^2} \right) \vec{\nabla} p_l \right] \end{aligned}$$

Conservation de la masse d'eau

$$\begin{aligned} & \left(\beta_p - \frac{\varphi_v}{r_v T^2} \right) \frac{dT}{dt} + \left(\alpha_r + \frac{\varepsilon}{r_v T} \right) \frac{dp_v}{dt} = \\ & \vec{\nabla} \cdot \left[K_l \rho_l \left(r_v \ln \left(\frac{p_v}{p_{sat}(T)} \right) - \frac{L(T)}{T} \right) \vec{\nabla} T + \left(\frac{\pi_v^*}{p_l} + K_l \frac{\rho_l r_v T}{p_v} \right) \vec{\nabla} p_v + \left(\omega_{mv} K_t - \frac{p_v \pi_v^*}{p_l^2} \right) \vec{\nabla} p_l \right] \end{aligned}$$

Conservation de la masse d'air sec

$$\begin{aligned} & -\frac{p_l - p_v}{r_{as} T} \left(\frac{\beta_p}{\rho_l} + \frac{\varepsilon}{T} \right) \frac{dT}{dt} - \frac{1}{r_{as} T} \left(\frac{\alpha_r (p_l - p_v)}{\rho_l} + \varepsilon \right) \frac{dp_v}{dt} + \frac{\varepsilon}{r_{as} T} \frac{dp_l}{dt} = \\ & \vec{\nabla} \cdot \left[\left(-\frac{\pi_v^* M_{as}}{p_l M_v} \right) \vec{\nabla} p_v + \left(\rho_{as} \frac{K k_{rg}}{\eta_t} + \frac{\pi_v^* p_v M_{as}}{p_l^2 M_v} \right) \vec{\nabla} p_l \right] \end{aligned}$$

UN MODÈLE BASÉ SUR LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT.

- **Le modèle que nous proposons est tout à fait classique dans sa structure...**
 - Equations de conservation de l'énergie et des masses d'humidité et d'air sec, corpus d'hypothèses sur les milieux poreux.
- **... et dans le choix de ses potentiels.**
 - Température, pression partielle de vapeur, pression total du gaz.
- **Mais qui cependant diffère des modèles classiques par deux points :**
 - Une écriture thermodynamique de tous les phénomènes énergétiques (sorption/désorption, transferts enthalpiques).

Conservation de l'énergie

$$\Lambda = h^m + L(T)$$

UN MODÈLE BASÉ SUR LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT.

- **Le modèle que nous proposons est tout à fait classique dans sa structure...**
 - Equations de conservation de l'énergie et des masses d'humidité et d'air sec, corpus d'hypothèses sur les milieux poreux.
- **... et dans le choix de ses potentiels.**
 - Température, pression partielle de vapeur, pression total du gaz.
- **Mais qui cependant diffère des modèles classiques que par deux points :**
 - Une écriture thermodynamique de tous les phénomènes énergétiques (sorption/désorption, transferts enthalpiques).
 - Une écriture du transfert diffusif des gaz en gradient de titre moléculaire.

Conservation de l'énergie

$$\Lambda = h^m + L(T)$$

Conservation de la masse d'eau

Conservation de la masse d'air sec

$$\vec{g}_{i,diff} = -\pi_i * \vec{\nabla} \frac{p_i}{p_t}$$

UN MODÈLE BASÉ SUR LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT.

Globalement, ce modèle ne présente pas de grosses différences au regard des modèles classiques, mais ce sont des différences qui parfois peuvent compter.



ILLUSTRATION SUR LA MÉTHODE DE LA COUPELLE

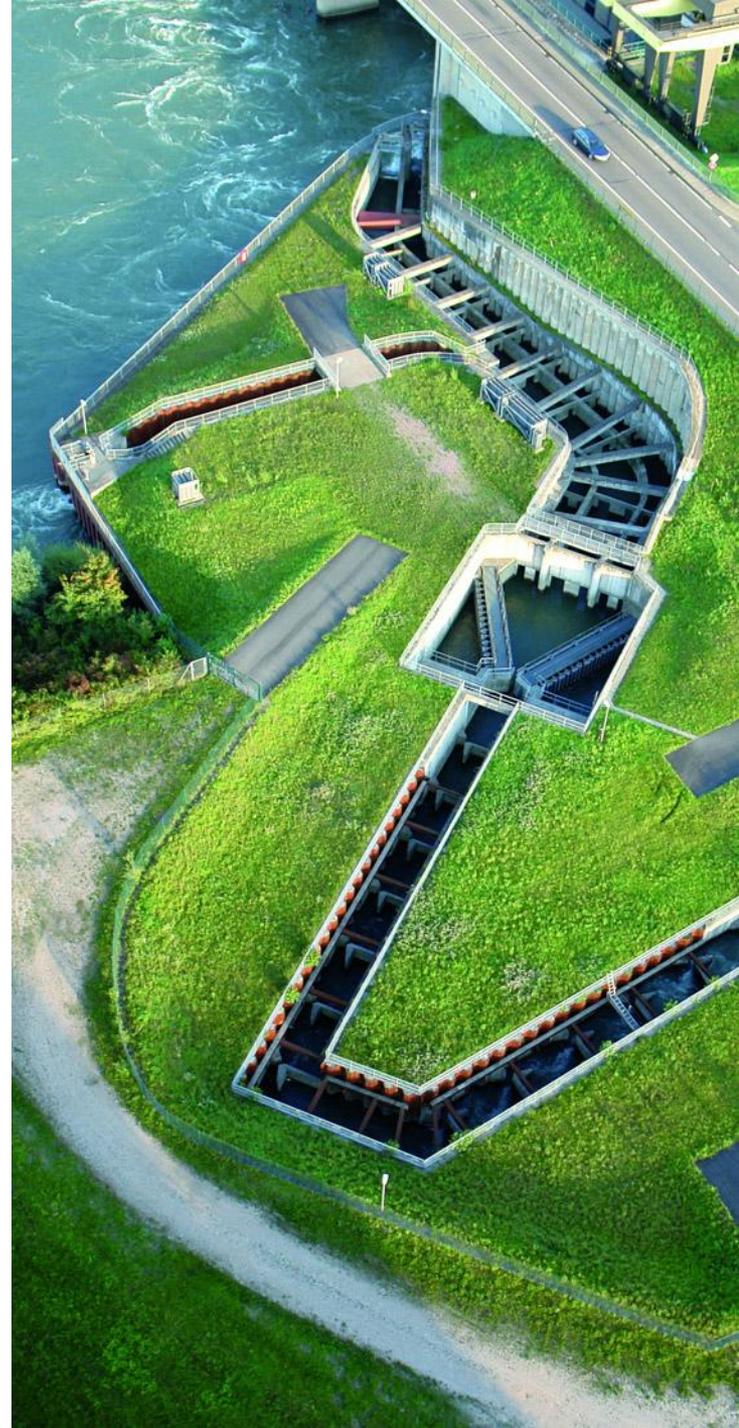
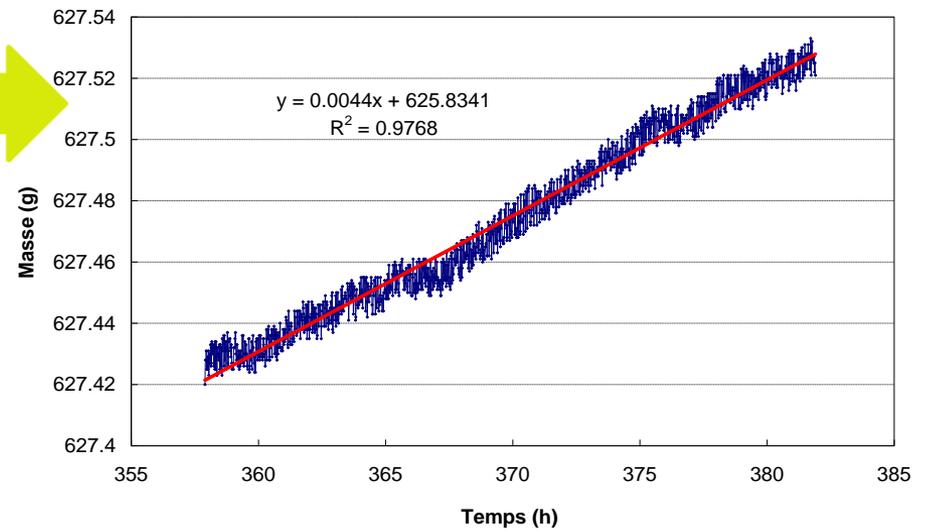
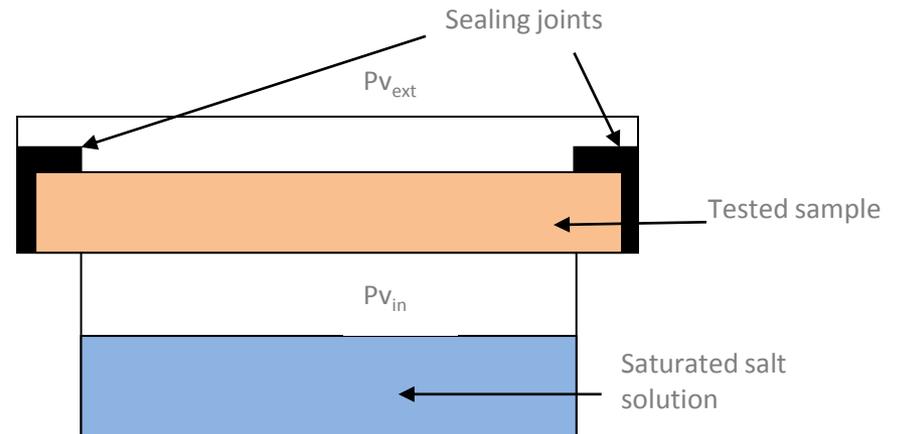


ILLUSTRATION PAR LA MÉTHODE DE LA COUPELLE.

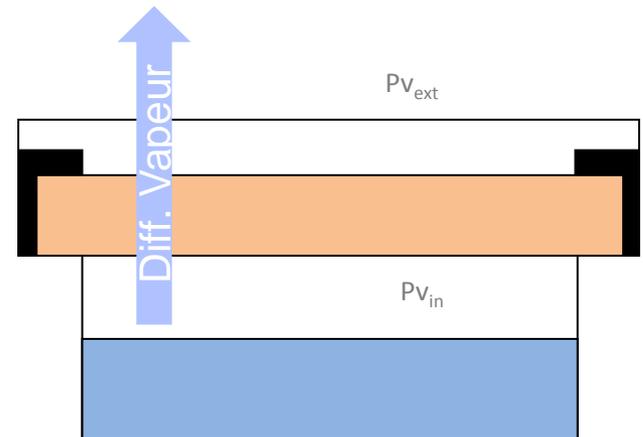
- **Un processus expérimental très simple.**
 - Deux ambiances régulées en humidité relative.
 - Une température uniforme.
 - Pesées régulières.
 - Evaluation finale en régime permanent.



- **Mais l'interprétation est bien plus complexe qu'il n'y paraît.**

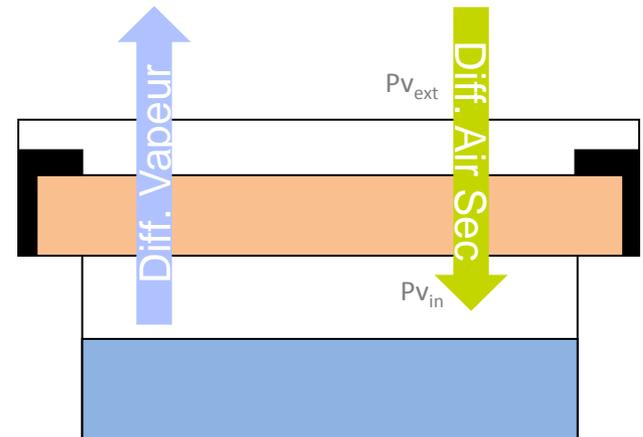
CE QUI SE PASSE PHYSIQUEMENT LORS D'UN ESSAI À LA COUPELLE.

- La diffusion de vapeur se met en place du fait de la différence de P_v entre les deux faces de l'échantillon.



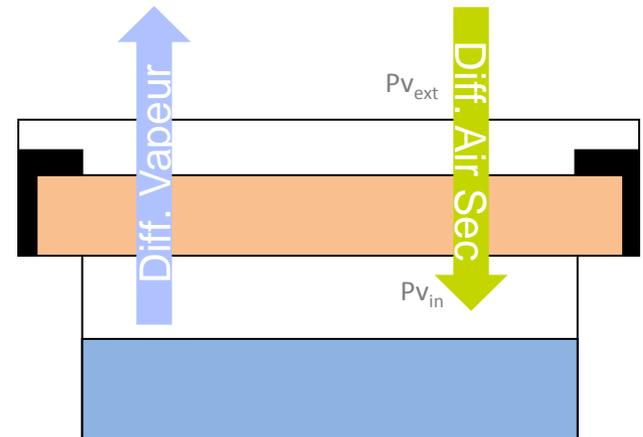
CE QUI SE PASSE PHYSIQUEMENT LORS D'UN ESSAI À LA COUPELLE.

- La diffusion de vapeur se met en place du fait de la différence de P_v entre les deux faces de l'échantillon.
- Une diffusion d'air sec se met en place en sens contraire.



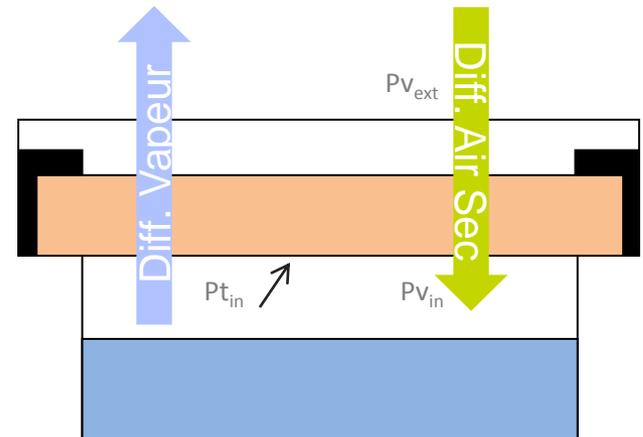
CE QUI SE PASSE PHYSIQUEMENT LORS D'UN ESSAI À LA COUPELLE.

- La diffusion de vapeur se met en place du fait de la différence de P_v entre les deux faces de l'échantillon.
- Une diffusion d'air sec se met en place en sens contraire.
- Mais en régime permanent, le flux total d'air sec ne peut être que nul (ni puits, ni source d'air sec dans la coupelle).



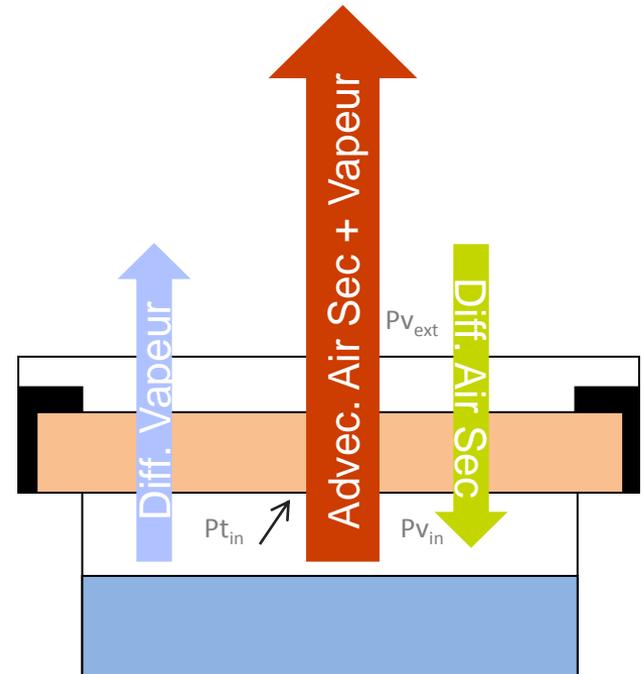
CE QUI SE PASSE PHYSIQUEMENT LORS D'UN ESSAI À LA COUPELLE.

- La diffusion de vapeur se met en place du fait de la différence de P_v entre les deux faces de l'échantillon.
- Une diffusion d'air sec se met en place en sens contraire.
- Mais en régime permanent, le flux total d'air sec ne peut être que nul (ni puits, ni source d'air sec dans la coupelle).
- La seule solution est de créer une surpression dans la coupelle.



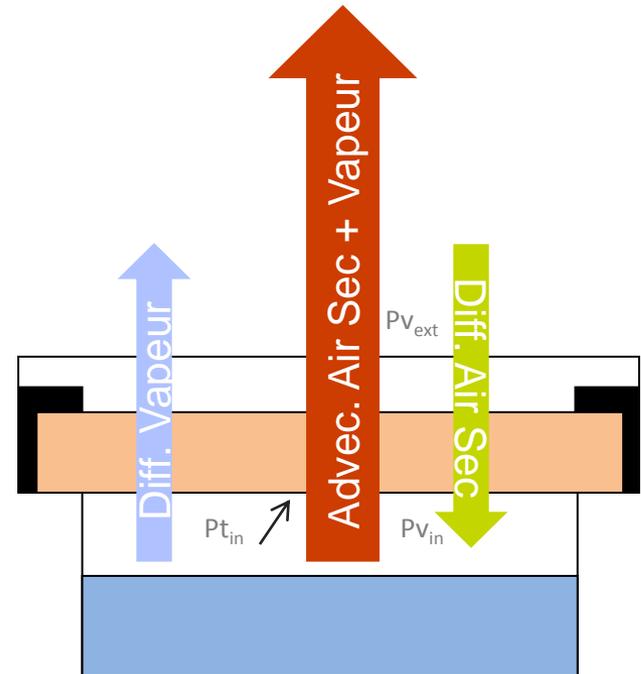
CE QUI SE PASSE PHYSIQUEMENT LORS D'UN ESSAI À LA COUPELLE.

- La diffusion de vapeur se met en place du fait de la différence de P_v entre les deux faces de l'échantillon.
- Une diffusion d'air sec se met en place en sens contraire.
- Mais en régime permanent, le flux total d'air sec ne peut être que nul (ni puits, ni source d'air sec dans la coupelle).
- La seule solution est de créer une surpression dans la coupelle.
- De façon à créer un flux advectif du gaz contraire au flux diffusif d'air sec afin d'annuler le flux total d'air sec.



CE QUI SE PASSE PHYSIQUEMENT LORS D'UN ESSAI À LA COUPELLE.

- La diffusion de vapeur se met en place du fait de la différence de P_v entre les deux faces de l'échantillon.
- Une diffusion d'air sec se met en place en sens contraire.
- Mais en régime permanent, le flux total d'air sec ne peut être que nul (ni puits, ni source d'air sec dans la coupelle).
- La seule solution est de créer une surpression dans la coupelle.
- De façon à créer un flux advectif du gaz contraire au flux diffusif d'air sec afin d'annuler le flux total d'air sec.

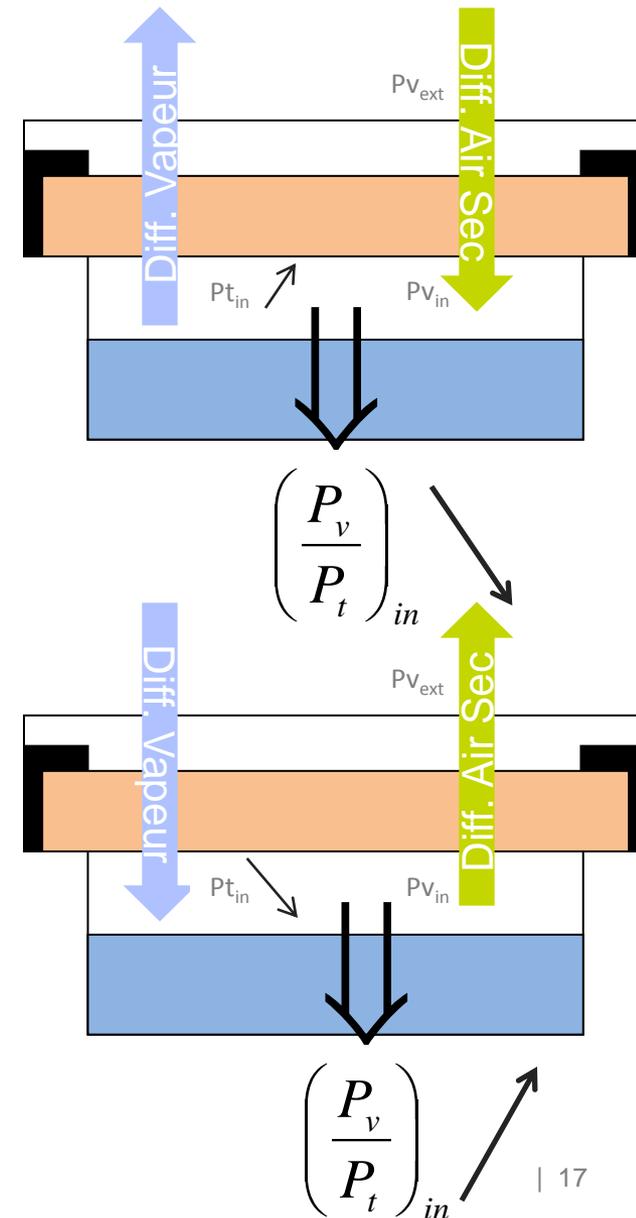


La pression totale ne peut pas être uniforme.

Le flux de vapeur mesuré est donc toujours la somme d'un flux diffusif et d'un flux advectif.

LA PERMÉABILITÉ VAPEUR AINSI MESURÉE EST EN GÉNÉRAL SOUS-ÉVALUÉE.

- Deux cas possibles : Flux de vapeur sortant ou entrant dans la coupelle.
- A l'extérieur, P_v et P_t sont régulées par la chambre climatique.
- A l'intérieur, P_v est régulée par la solution saline, mais P_t peut évoluer sans contrainte.
 - Pour annuler le flux d'air sec, P_t augmente si l'ambiance la plus humide est dans la coupelle et P_t diminue dans le cas contraire.

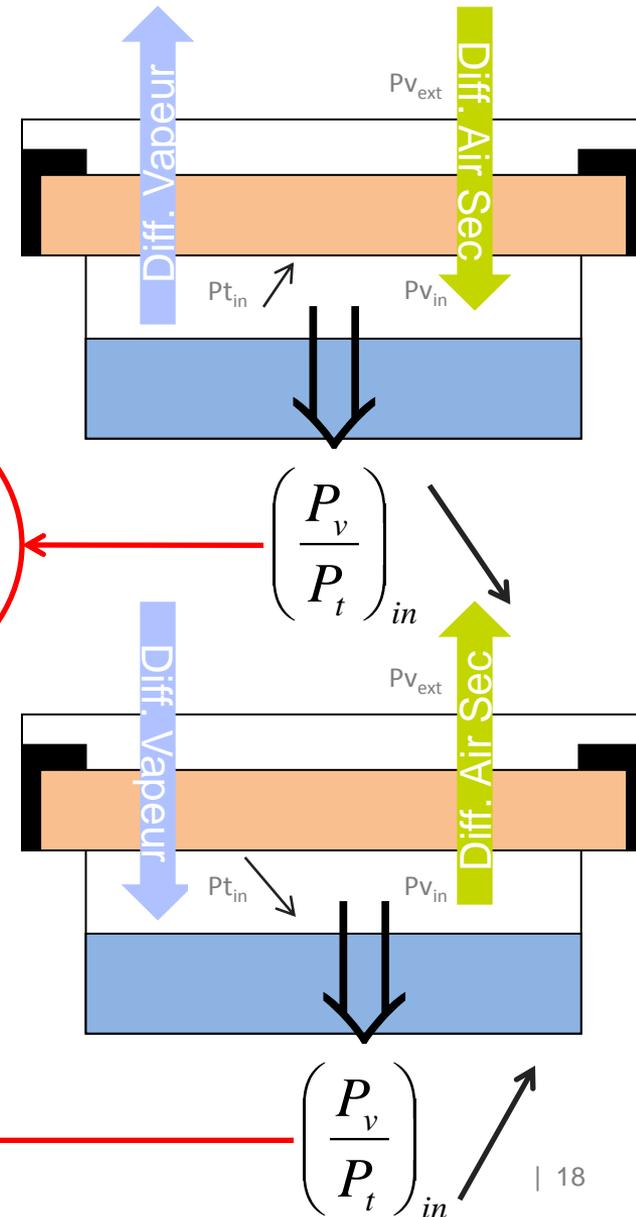


LA PERMÉABILITÉ VAPEUR AINSI MESURÉE EST EN GÉNÉRAL SOUS-ÉVALUÉE.

- Dans les deux cas, l'évolution de P_t dans la coupelle tend à diminuer l'écart du rapport P_v/P_t (moteur de la diffusion) entre les deux faces de l'échantillon.

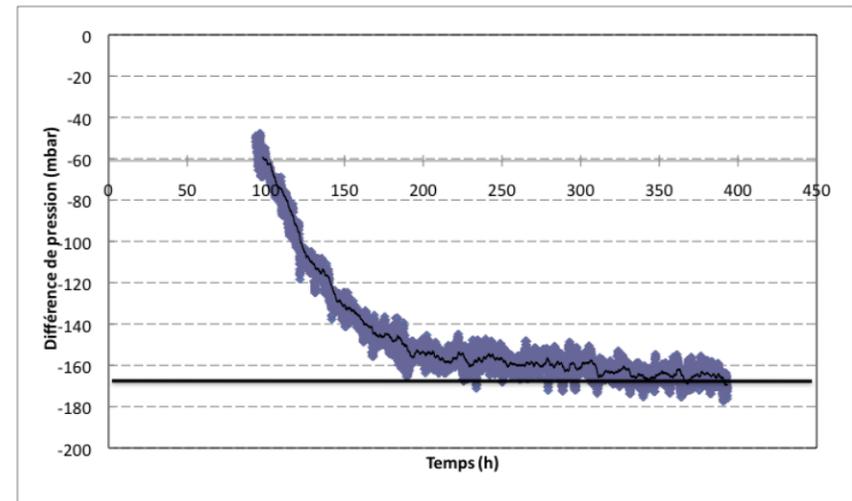
$$\Delta \left(\frac{P_v}{P_t} \right)$$

- Cela tend donc à diminuer le flux diffusif et donc à sous-estimer la perméabilité vapeur mesurée si l'on ne tient pas compte de cette évolution.



UNE PREMIÈRE MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE DE LA VARIATION DE PRESSION INTERNE.

- Echantillon de chêne (sens du flux en travers de l'orientation des fibres).
- La température de l'essai est de 60°C.
- L'humidité relative extérieure est 50% ($P_v=9866$ Pa).
- L'humidité relative intérieure est 11% ($P_v=2171$ Pa).
- On mesure alors une dépression dans la coupelle 168 mb, soit 16 800 Pa.
- Dans ce cas, la différence entre les perméabilités vapeur estimées (avec et sans prise en compte de la variation de P_t interne) est de l'ordre de 6%.



ESTIMATION DE L'ERREUR RELATIVE SUR LA MESURE DE LA PERMÉABILITÉ VAPEUR.

- L'écriture du flux d'air sec nul en régime permanent permet d'établir une relation entre le gradient de P_t et le gradient de P_v .
- On peut alors écrire le flux de vapeur uniquement en fonction du gradient de P_v , du titre moléculaire de vapeur et d'un adimensionnel A (à peu près le rapport entre perméabilité au gaz et perméabilité à la vapeur).
- Cela permet d'exprimer l'erreur relative sur la mesure de la perméabilité vapeur due à la non uniformité de la pression totale.

$$\vec{\nabla} p_t = \frac{1}{c_v + (1 - c_v)A} \vec{\nabla} p_v$$

$$A = \frac{M_v}{M_t} \frac{K_t}{\pi}$$

$$\frac{\pi_{app}^* - \pi_v^*}{\pi_v^*} = \frac{c_v (A - 1)}{c_v + (1 - c_v)A}$$

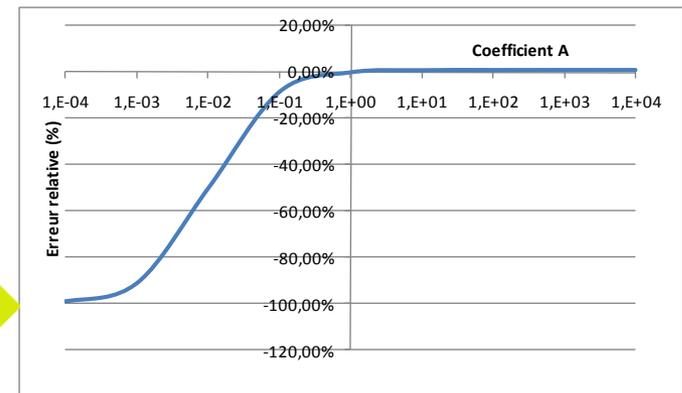
ESTIMATION DE L'ERREUR RELATIVE SUR LA MESURE DE LA PERMÉABILITÉ VAPEUR.

- L'écriture du flux d'air sec nul en régime permanent permet d'établir une relation entre le gradient de P_t et le gradient de P_v .
- On peut alors écrire le flux de vapeur uniquement en fonction du gradient de P_v , du titre moléculaire de vapeur et d'un adimensionnel A (à peu près le rapport entre perméabilité au gaz et perméabilité à la vapeur).
- Cela permet d'exprimer l'erreur relative sur la mesure de la perméabilité vapeur due à la non uniformité de la pression totale.
- Que l'on peut représenter graphiquement en fonction de A en admettant qu'à P_{atm} C_v reste proche de 10^{-2} .

$$\vec{\nabla} p_t = \frac{1}{c_v + (1 - c_v)A} \vec{\nabla} p_v$$

$$A = \frac{M_v}{M_t} \frac{K_t}{\pi}$$

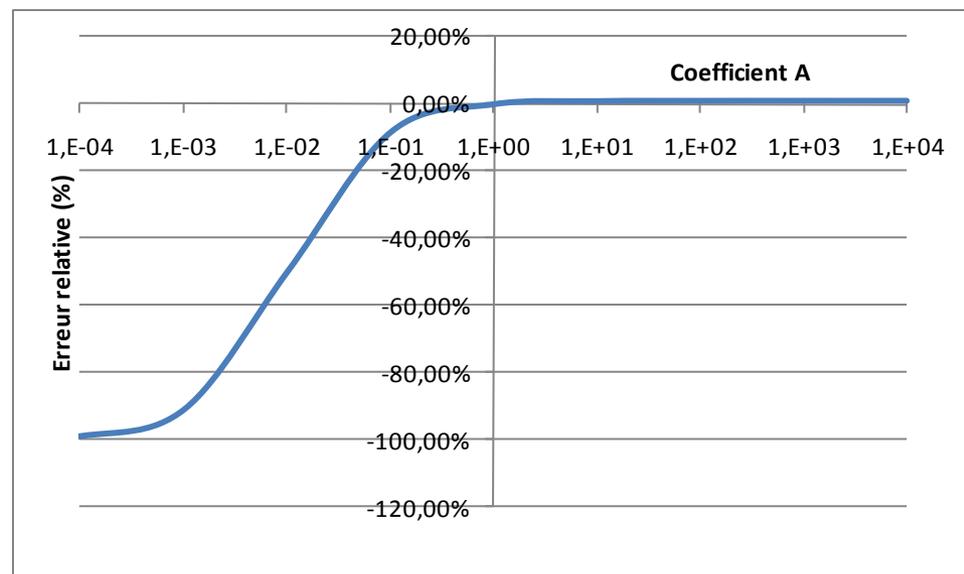
$$\frac{\pi_{app}^* - \pi_v^*}{\pi_v^*} = \frac{c_v (A - 1)}{c_v + (1 - c_v)A}$$



ESTIMATION DE L'ERREUR RELATIVE SUR LA MESURE DE LA PERMÉABILITÉ VAPEUR (SUITE).

$$A = \frac{M_v}{M_t} \frac{K_t}{\pi}$$

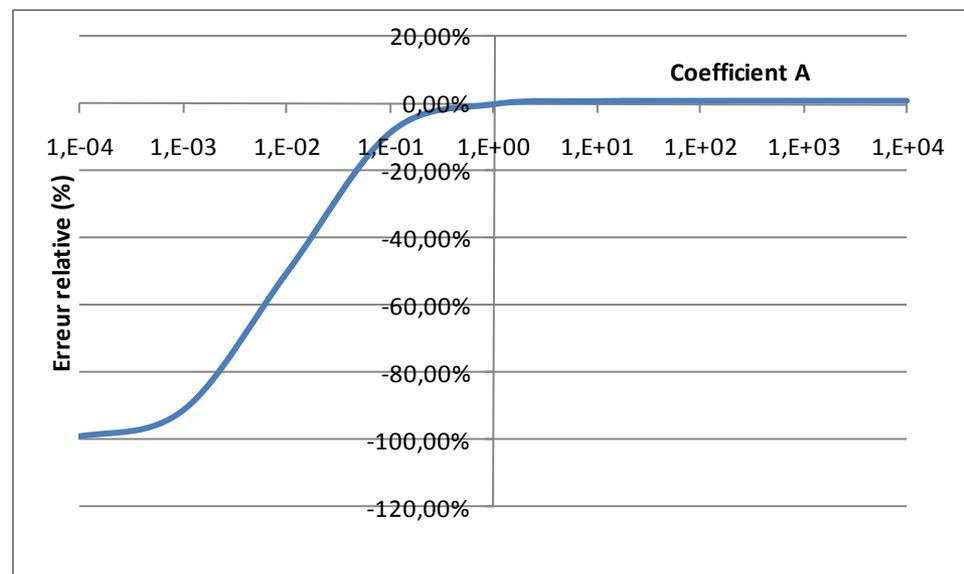
- Pour les valeurs fortes de A (matériaux très perméables au gaz et/ou peu perméables à la vapeur), la perméabilité vapeur peut être très légèrement surestimée.
- Pour toutes les autres valeurs de A, la perméabilité sera d'autant plus sous-estimée que la valeur de A sera faible.
- De plus, en cas sous-évaluation, l'erreur véritable ne peut pas être évaluée a posteriori, car le processus de correction diverge.



ESTIMATION DE L'ERREUR RELATIVE SUR LA MESURE DE LA PERMÉABILITÉ VAPEUR (SUITE).

$$A = \frac{M_v}{M_t} \frac{K_t}{\pi}$$

- Pour les valeurs fortes de A (matériaux très perméables au gaz et/ou peu perméables à la vapeur), la perméabilité vapeur peut être très légèrement surestimée.
- Pour toutes les autres valeurs de A, la perméabilité sera d'autant plus sous-estimée que la valeur de A sera faible.
- De plus, en cas sous-évaluation, l'erreur véritable ne peut pas être évaluée a posteriori, car le processus de correction diverge.



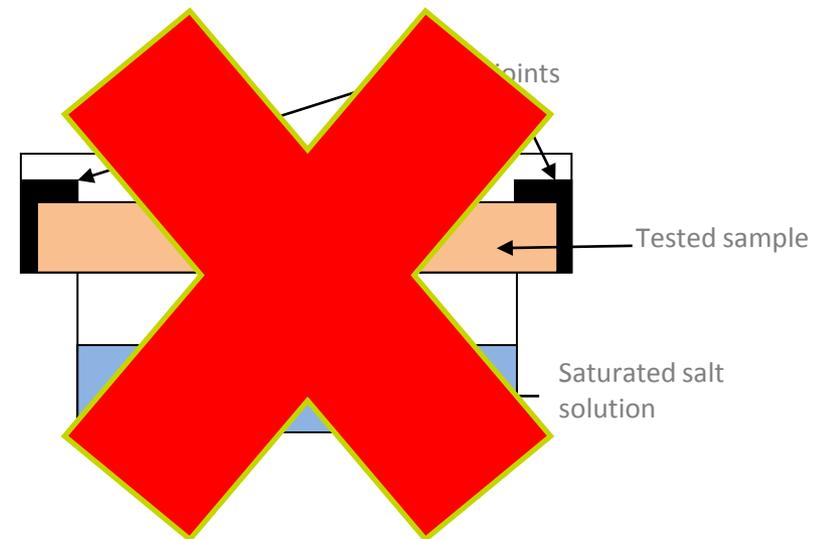
Il est donc très probable qu'un grand nombre de valeurs de perméabilité vapeur issues de la littérature soient très significativement sous-évaluées sans qu'on puisse les corriger.

EN PRATIQUE, POUR LES VALEUR DE A INFÉRIEURES À 10^{-2} , LA MÉTHODE DE LA COUPELLE EST INOPÉRANTE.

- On peut écrire une expression générale du flux d'air sec à l'aide de l'adimensionnel A.
- Ainsi, une valeur de A inférieure à 10^{-2} signifie que dans cette expression A est négligeable devant 1.
- Dans ce cas, le flux d'air sec est parfaitement diffusif car il s'exprime sous la forme générique d'un flux diffusif.
- Or dans la méthode de la coupelle, le flux d'air sec est nul en régime permanent. Donc lorsque A est inférieur à 10^{-2} , le flux diffusif d'air sec est nul, ce qui signifie que le flux diffusif de vapeur l'est aussi.
- Or à P_{atm} , le flux de vapeur mesuré à la coupelle est à 98% diffusif. Il doit donc être quasiment nul et la méthode de la coupelle ne peut mesurer que les fuites du dispositif expérimental.

$$\vec{g}_{as} = -\frac{\pi_{as}^*}{P_t} \left(\vec{\nabla} p_{as} - \frac{P_{as}}{P_t} (1 - A) \vec{\nabla} p_t \right)$$

$$\vec{g}_{as} = -\pi_{as}^* \vec{\nabla} \frac{P_{as}}{P_t}$$



APPLICATION À QUELQUES MATÉRIAUX CONNUS.



- Base bibliographique : Hansen 1986; Tveit 1966.
- Données anciennes donc matériaux anciens.
- Doute possible sur la fiabilité des perméabilités advectives mesurées.

Matériau	Coefficient A
Laine de verre	$1,08 \cdot 10^{-04}$
PSE	$1,53 \cdot 10^{-03}$
Bois	$6,06 \cdot 10^{-01}$
Béton cellulaire	$1,67 \cdot 10^{+02}$
Plâtre	$4,50 \cdot 10^{-01}$
Béton	$1,51 \cdot 10^{-01}$



Matériau	Evaluation de l'erreur relative sur la perméabilité vapeur (%)
Laine de verre	1,01%
PSE	-86,71%
Bois	0,65%
Béton cellulaire	1,00%
Plâtre	-1,21%
Béton	-5,32%

DÉTERMINATION CONJOINTE DES PERMÉABILITÉS AU GAZ ET À LA VAPEUR

- **C'est à la fois une opportunité et une obligation.**
 - Opportunité car c'est la possibilité de mesurer deux caractéristiques avec un seul essai.
 - Une obligation car il faut s'affranchir de l'erreur due à la pression totale.
- **Dans le principe proposé, il s'agit de mesurer simultanément la variation de masse et la différence de pression entre les deux faces de l'échantillon.**
- **On peut alors déterminer les différences de P_t et de C_v entre les deux faces de l'échantillon et déterminer les perméabilités au gaz K_t et à la vapeur π_v^* par les formules ci-contre.**

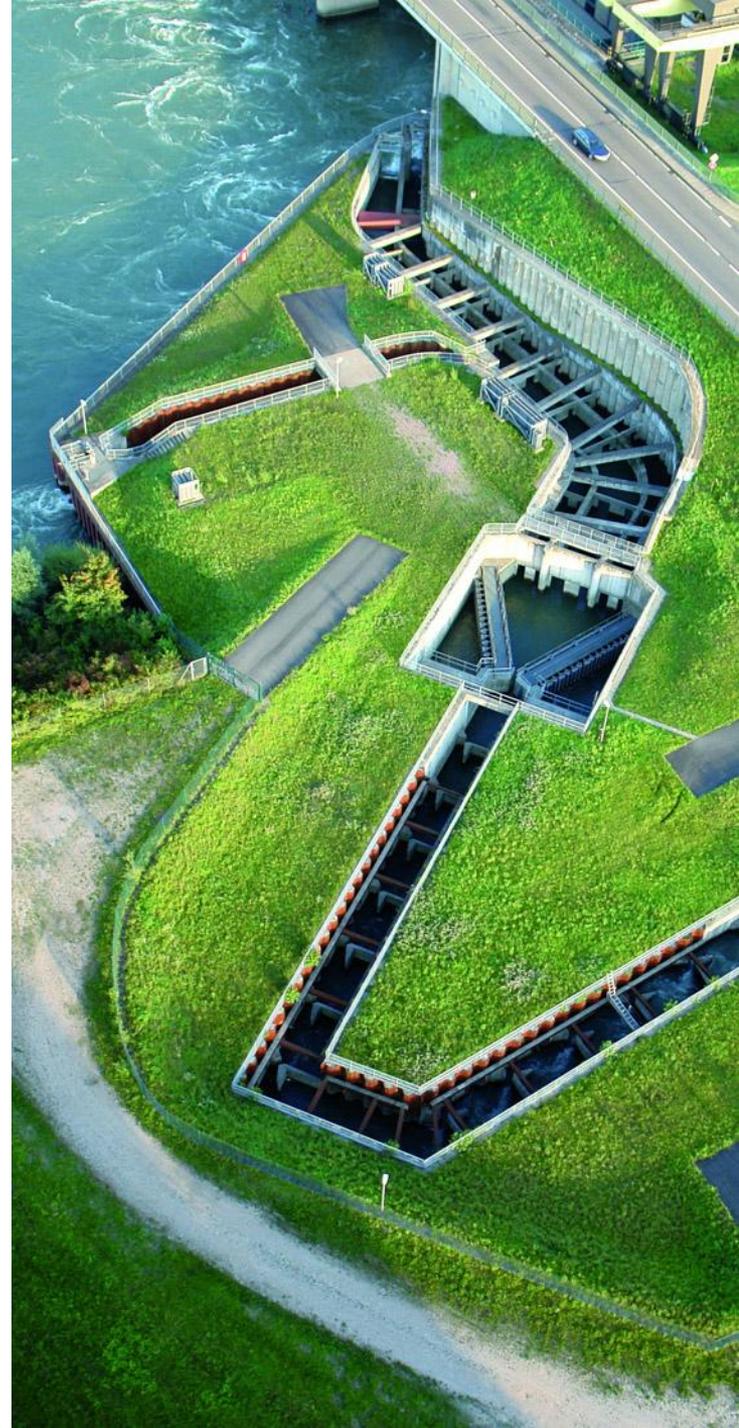
$$K_t = \frac{[(1 - \bar{c}_v)M_{as} + \bar{c}_v M_v]g_v e}{M_v \Delta p_t}$$

$$\bar{\pi}_v^* = \frac{g_v e}{\Delta c_v} (1 - \bar{c}_v)$$

Une approche encore purement théorique, qu'il faudra mettre à l'épreuve de la pratique.



CONCLUSIONS



RAPPROCHER APPROCHES THÉORIQUES ET APPROCHES EXPÉRIMENTALES

- **Lorsque l'on compare résultats simulés et résultats expérimentaux, il est rare que l'on trouve la même chose.**
- **La plupart du temps, on ne sait pas à quoi imputer les différences :**
 - Hypothèses de modélisation, Méthodes de détermination des caractéristiques, Incertitudes des expérimentations?
- **Le projet ANR HYGROBAT a permis de lever quelques coins de voile pour certains matériaux à base végétale, mais :**
 - Certaines caractéristiques restent indéterminables.
 - Certaines méthodes de mesure doivent être revues.
 - Certains matériaux n'ont presque pas été étudiés (notamment les plus anciens).
- **La méthodologie est validée, mais la marche à franchir désormais est très haute.**

RAPPROCHER APPROCHES THÉORIQUES ET APPROCHES EXPÉRIMENTALES

- Lorsque l'on compare résultats simulés et résultats expérimentaux, il est rare que l'on trouve la même chose.
- La plupart du temps, on ne sait pas à quoi imputer les différences :
 - Hypothèses de modélisation, Méthodes de détermination des caractéristiques, Incertitudes des expérimentations?
- Le projet ANR HYGROBAT a permis de lever quelques coins de voile pour certaines configurations avec matériaux à base végétale, mais :
 - Certaines caractéristiques restent indéterminables.
 - Certaines méthodes de mesure doivent être revues.
 - Certains matériaux n'ont presque pas été étudiés (notamment les plus anciens).
- La méthodologie est validée, mais la marche à franchir désormais est très haute.



LE RENOUVEAU DES TRANSFERTS DE MASSE ET DE CHALEUR EN PHYSIQUE DU BÂTIMENT

- Il y a dix ans, trois ou quatre laboratoires en France œuvraient sur cette spécialité.
- Aujourd'hui, presque tous les laboratoires d'énergétique du bâtiment s'y intéressent.
- Et ce thème de recherche semble interroger au-delà de la sphère R&D au travers de deux sujets :
 - La dimension thermique des transferts de masse.
 - très forte isolation
 - bois et biomatériaux
 - La réhabilitation des bâtiments très anciens.
- La période est donc favorable à un réinvestissement en R&D sur ce sujet afin d'en fiabiliser les applications pratiques à venir.

