



## **- PARTIE 2 -**

### ***CALCUL SUR UNE PAROI***

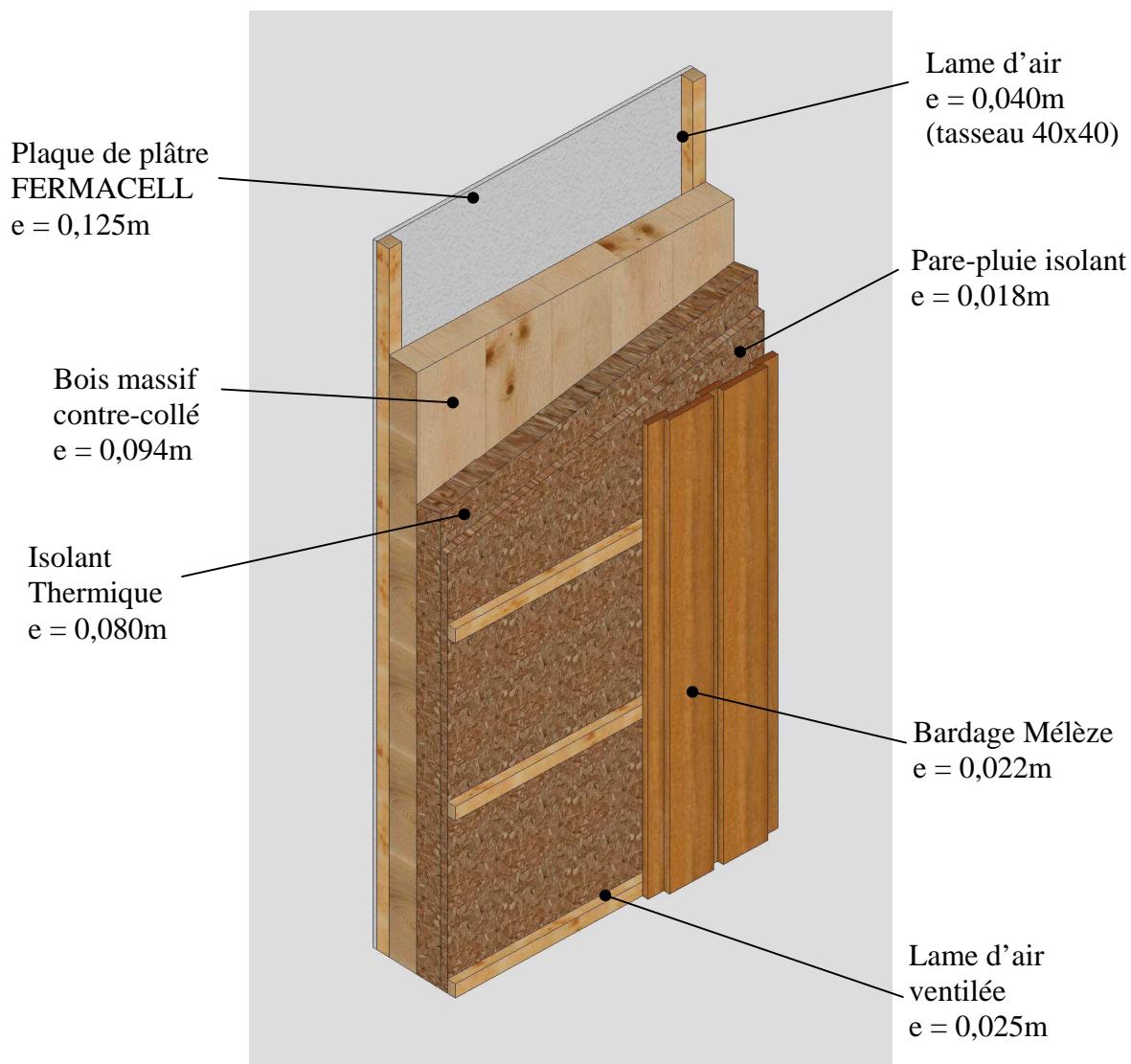
## 1. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

### 1.1 Hypothèses

Les calculs seront établis dans le but de mesurer et d'évaluer le comportement hygrothermique d'une paroi. Le choix du mur s'est porté sur le concept Méga Bois composé d'une structure porteuse en panneaux contre-collés d'épaisseur 94mm à laquelle vient s'ajouter une isolation par l'extérieur, fibre de bois (80mm + pare pluie 18mm), avec lame d'air de 25mm et bardage en mélèze ou red cédar ou parement crépi minéral . Finitions intérieures en plaques de plâtre Fermacell ou en lambris de 18mm.

Nous partirons sur le parement en bardage bois (*figure 1*).

Un vide technique sur tous les murs intérieurs d'une épaisseur de 35 ou 40 mm permet de faire passer des câbles et tuyauterie.



*Figure 1 : système constructif Méga Bois.*

Nous prendrons pour effectuer nos calculs les conditions climatiques suivantes :

- ambiance extérieure :  $T_{ext} -15^{\circ}C$  avec une  $H_r$  de 90%
- ambiance intérieure :  $T_{int} 20^{\circ}C$  avec une  $H_r$  de 60%

Pour examiner les risques de condensation dans la paroi, il sera utile de tracer les diagrammes des températures et des pressions. La première opération consiste à trouver les températures à chaque interface de la paroi. Nous aurons besoin pour ces calculs du coefficient de transmission de la paroi  $K$  ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ) afin de pouvoir en déduire le flux thermique  $\Phi$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

## 1.2. Calcul du flux thermique

DESIGNATION	épaisseur en m	$\lambda$ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$R$ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$	cumul des résistances
Résistance sup. ext.			0,130 **	0
Bardage				0,130
Lame d'air ventilé	0,025			0,130
Pare-pluie rigide (isolant)	0,018	0,047		0,513
Isolant (fibre de bois)	0,080	0,042		2,418
Bois massif (épicéa)	0,094	0,14		3,089
Vide technique non ventilé	0,040			0,180 *
Fermacell (plaque de plâtre)	0,0125	0,32		3,308
Résistance sup. int.				0,130
			<b>TOTAL</b>	<b>3,44 <math>\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}</math></b>

\* : pour la résistance du vide technique non-ventilé, la norme NF EN ISO 6946 montre que pour une lame d'air verticale (flux de chaleur horizontal) la résistance augmente avec les deux premiers centimètres seulement, ensuite elle reste pratiquement constante.

Nous avons une épaisseur de 4 cm, ce qui correspond à la résistance maximale soit  $0,18 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$

\*\* : pour la résistance d'une lame d'air ventilé la norme NF EN ISO 6946 stipule :

Type de lame d'air verticale	Surface d'ouverture libre
Lame d'air non ventilé	$\leq 500 \text{ mm}^2$ par m de longueur
Lame d'air faiblement ventilé	Comprise entre $500$ et $1500 \text{ mm}^2$ par m de longueur
Lame d'air fortement ventilé	$> 1500 \text{ mm}^2$ par m de longueur

Nous avons un bardage posé par recouvrement, ce qui nous donne une « lame d'air fortement ventilée ». La norme précise alors que l'on néglige la résistance thermique de la lame d'air et de toutes les autres couches séparant cette lame d'air de l'ambiance extérieure, mais on inclus une résistance thermique superficielle extérieure correspondant à l'air immobile (c'est-à-dire égale à la résistance thermique superficielle intérieure du même composant) (figure 2).

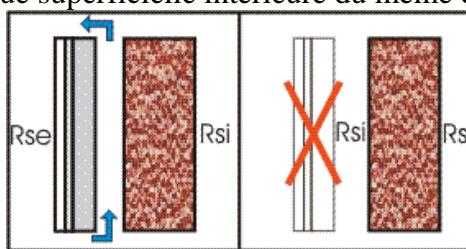


Figure 2 : substitution du bardage et de la lame d'air par une  $Rsi$ .

### Intérêt d'une lame d'air ventilée avec une isolation extérieure et un bardage ?

La perméance des matériaux utilisés en bardage est généralement faible, voire nulle, si bien qu'il importe de ménager une lame d'air entre l'isolant et le bardage et d'éviter de disposer sur la face extérieure de l'isolant une protection de trop faible perméance afin d'éviter la saturation de l'air dans la lame d'air ce qui provoquerait des condensations sur la face intérieure du bardage. Il convient pour ce faire d'assurer un renouvellement d'air de la lame

d'air avec l'extérieur. Propos recueillis dans un document du CSTB traitant des condensations.

Avec la résistance thermique de la paroi, on peut alors calculer le coefficient de déperdition thermique  $K$  :

$$K = \frac{1}{3,44} = 0,29 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

On peut remarquer que le mur respecte bien l'arrêté du 29 novembre 2000 concernant le coefficient thermique pour un mur en contact avec l'extérieur :  $0,29 < 0,47 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

le flux thermique  $\Phi$  calculé nous permet de connaître la répartition des températures à l'intérieur de la paroi.

$$\Phi = K \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}) = 0,29 \times (20 - (-15)) = 10,15 \text{ W/m}^2$$

On a de l'intérieur vers l'extérieur (figure 3) :

$$T_{\text{int}} - T_1 = \Phi * 1/h_i$$

$$= 10,15 * 0,13 = 1,32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- $T_1 = 20 - 1,32 = 18,68 \text{ } ^\circ\text{C}$  (*T. superficielle de la face intérieure de la paroi*)
- $T_2 = 18,68 - 0,39 = 18,29 \text{ } ^\circ\text{C}$  (*interface FERMACELL/vide technique*)
- $T_3 = 18,29 - 1,83 = 16,46 \text{ } ^\circ\text{C}$  (*interface vide technique/bois massif*)
- $T_4 = 16,46 - 6,81 = 9,65 \text{ } ^\circ\text{C}$  (*interface bois massif/isolant*)
- $T_5 = 9,65 - 19,34 = -9,69 \text{ } ^\circ\text{C}$  (*interface isolant/pare-pluie*)
- $T_6 = -9,69 - 3,89 = -13,58 \text{ } ^\circ\text{C}$  (*T. superficielle de la face extérieure*)
- $T_{\text{ext}} = -13,58 - 1,32 = -14,90 \text{ } ^\circ\text{C} \approx -15 \text{ } ^\circ\text{C}$

Evolution des températures dans la paroi

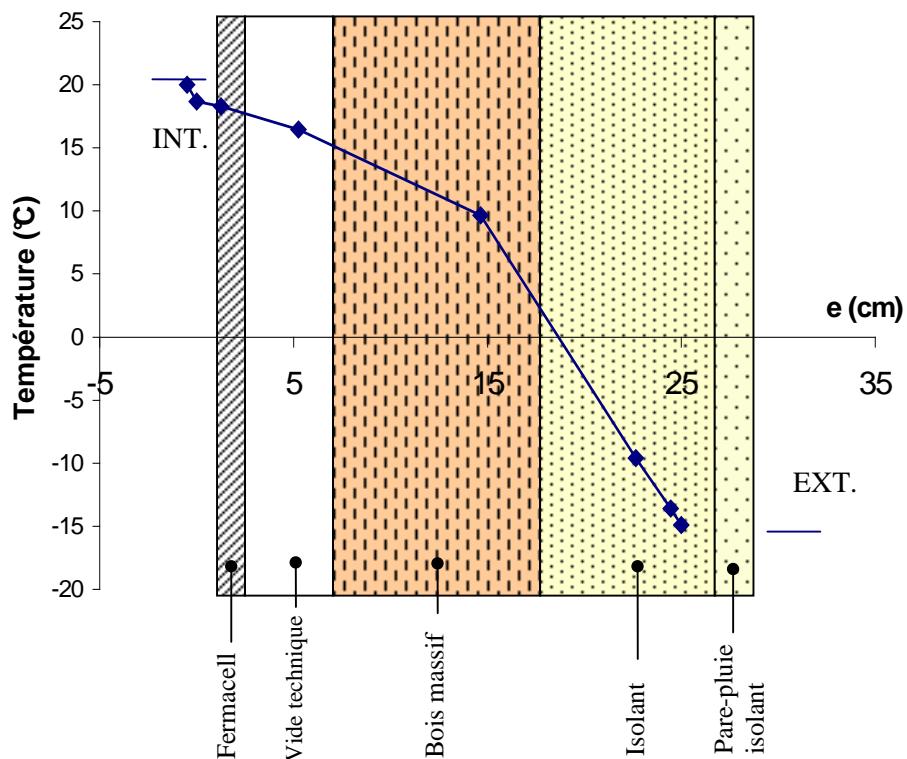


Figure 3 : performance thermique de la paroi.

Avec l'isolation par l'extérieur, on obtient un mur qui assure un rôle de stockage de calories en hiver et le transfert de chaleur en sera ralenti par l'inertie de la paroi. On pourrait remarquer qu'en été c'est l'inverse le mur maintiendrait la fraîcheur dans sa structure.

### 1.3. Transfert de masse (eau+vapeur) par diffusion

La migration de la vapeur d'eau dans la paroi nécessite le calcul préalable de :

- La pression de vapeur saturante ( $P_{vs}$ )
- La pression partielle ou réelle ( $P_r$ )

#### 1.3.1 Calcul des pressions de vapeur saturantes (Pa)

On utilisera la relation :

$$P_{vs} = \exp \left[ 25,5058 - \frac{5204,9}{T+273} \right] \quad (P_{vs} \text{ en Pa et } T \text{ en } ^\circ\text{C})$$

Je peux définir les pressions ( $P_{vs}$ ) à chaque interface de la paroi :

	T ( $^\circ\text{C}$ )	$P_{vs}$ (Pa)
$T_{int}$	20	2302
$T_1$	18,68	2124
$T_2$	18,29	2074
$T_3$	16,46	1853
$T_4$	9,65	1201
$T_5$	-9,69	311
$T_6$	-13,58	231
$T_{ext}$	-15	207

#### 1.3.2 Calcul des pressions réelles (Pa)

Pour connaître la quantité de vapeur  $g$  traversant la paroi par unité de temps et de surface, nous devons d'abord calculer les pressions partielles intérieure et extérieure :

- pour l'extérieur :  $T = -15^\circ\text{C}$   $HR = 90\%$

$$P_{vse} = 207 \text{ Pa}$$

$$P_{re} = 207 * 0,9 = 186 \text{ Pa}$$

- pour l'intérieur :  $T = 20^\circ\text{C}$   $HR = 60\%$

$$P_{vsi} = 2302 \text{ Pa}$$

$$P_{ri} = 23,02 * 0,6 = 1381 \text{ Pa}$$

La formule générale permettant de quantifier la vapeur d'eau qui va être diffusée à travers le mur est :

$$g = \frac{\Delta P_r}{\sum \frac{e_i}{\pi_i}}$$

Nous avons besoin de connaître la perméabilité pour en déduire la résistance à la diffusion de chaque matériau. Malheureusement la majorité des fabricants et la norme NF EN 12524 [18] ne fournissent que le facteur de résistance à la diffusion de vapeur ( $\mu$ ). Alors pour prendre en compte  $\mu$ , nous allons utiliser l'équation prise dans le Recknagel [29] :

$$g = \frac{\Delta P_r}{\sum R_D}$$

avec

$$R_D = 1,5 \cdot 10^6 \cdot \mu e$$

$R_D$  [m<sup>2</sup>.h.Pa/kg] résistance à la diffusion d'une couche de matériau

DÉSIGNATION	Facteur de résistance	Résistance $R_D$	Cumul $R_D$
	$\mu$	m <sup>2</sup> .h.Pa/kg	
<i>Extérieur</i>		0	0
<i>Pare-pluie isolant</i>	5	135000	135000
<i>Isolant (fibre de bois)</i>	5	600000	735000
<i>Bois massif contre-collé</i>	35	4935000	5670000
<i>Vide technique non ventilé</i>	1	60000	5730000
<i>Plaque de plâtre (fermacell)</i>	13	243750	5973750
<i>Intérieur</i>		0	5973750

Par conséquent, la quantité de vapeur d'eau diffusée est :

$$g = \frac{(1381-186)}{5973750} = 0,20 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$$

D'après la quantité de vapeur diffusée à travers le mur, on peut en déduire les pressions partielles à chaque interface :

- interface intérieur/plaque de plâtre

$$P_{r1} = 1381 \text{ Pa}$$

- interface plaque de plâtre/vide technique non ventilé

$$P_{r2} = P_{r1} - (g \times R_D) = 1332 \text{ Pa}$$

Il en va de même pour les autres calculs.

	e	T	P <sub>r</sub>	P <sub>vs</sub>
	en mm	°C	Pa	
<i>Intérieur</i>		20	1381	2302
	0	18,68	(1381)	2124
<i>Plaque de plâtre (fermacell)</i>				
	12,5	18,29	1332	2074
<i>Vide technique non ventilé</i>				
	52,5	16,46	1320	1853
<i>Bois massif</i>				
	146,5	9,65	333	1201
<i>Isolant (fibre de bois)</i>				
	226,5	-9,69	213	311
<i>Pare-pluie+ isolant</i>				
	244,5			
<i>Lame d'air ventilé</i>				
	269,5			
<i>Bardage</i>				
	287,5			
<i>Extérieur</i>		-15	186	207

### Diagramme de diffusion de vapeur d'eau

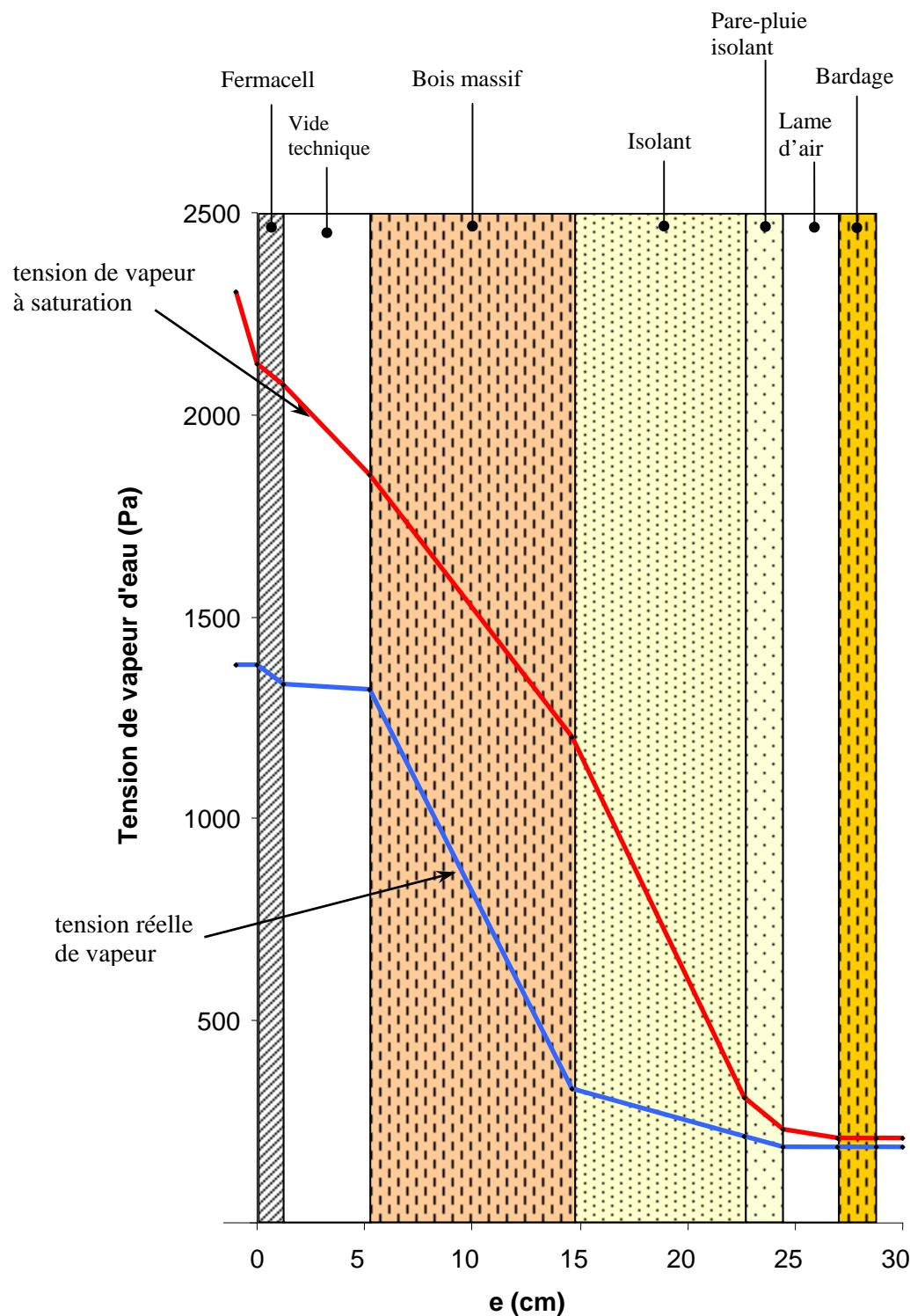


Figure 4 : performance hygroscopique de la paroi.

On remarque qu'il n'y a pas de noyau de condensation dans la structure, on peut en conclure avec les figures 3 et 4 que ce système de conception est satisfaisant d'un point de vue hygrothermique.

Mais supposons que de la condensation apparaisse à l'intérieur de la paroi. Alors pour déterminer la quantité d'eau qui se dépose, l'ingénieur *Berthier* du CSTB [30] donne une méthode en appliquant la loi de *Fick*. Elle consiste à calculer la quantité d'eau entrant puis la quantité d'eau sortant de la paroi et d'en effectuer la différence.

## 1.4. Étanchéité à l'eau de pluie et au vent

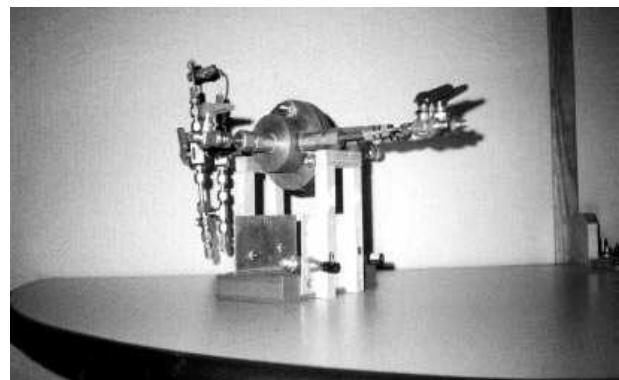
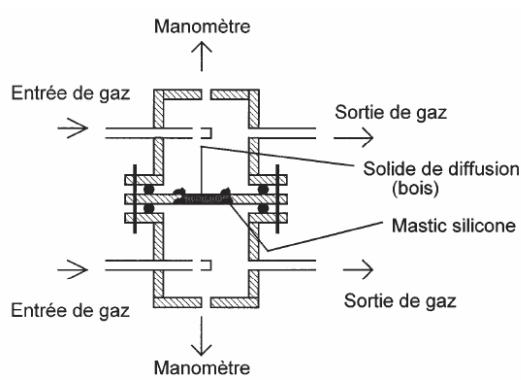
Comme l'a stipulé le chercheur *Doleza*, un parement décroché de la paroi de quelques centimètres assure la fonction très importante de résistance à la pénétration de l'eau de pluie et joue le rôle de coupe-vent tout en laissant un mouvement d'air derrière celui-ci afin d'assurer une meilleure évacuation de la vapeur d'eau venant du mur.

## 1.5. Diffusion à l'air

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 6.3 de la partie 3 de notre ouvrage, le flux d'un gaz dans la paroi dépend du coefficient de diffusion du gaz dans le matériau. Actuellement aucun de ces éléments n'est utilisé, pour le moment, dans la construction, c'est pour cette raison qu'aucune valeur n'est répertoriée ou validée par un organisme de certification. Les valeurs connues sont le fait de mesures effectuées par des chercheurs ou des étudiants pour leur expérimentation.

### 1.5.1. Discussion sur le coefficient de diffusion

Les mesures du coefficient de diffusion sont réalisées dans une cellule classique de diffusion du type *Wicke et Kallenbach* (*figure 5*) où les deux compartiments sont séparés par l'échantillon pour lequel on cherche à prévoir le coefficient de diffusion.



*Figure 5 : schéma et photo d'une cellule de diffusion Wicke et Kallenbach.*

Le tableau ci-dessous, reprend quelques valeurs du coefficient de diffusion de l'oxygène mesurées sur différentes essences.

Essence	Direction	T (°C)	D (m <sup>2</sup> /s)
sapin	R,T	40	3,24.10 <sup>-10</sup>
pin	T	25	3,5.10 <sup>-7</sup>
	L	25	8,04.10 <sup>-6</sup>
	R	25	4,88.10 <sup>-7</sup>
peuplier	L	25	9,22.10 <sup>-9</sup>
Chêne	R	25	1,85.10 <sup>-7</sup>
	T	25	1,87.10 <sup>-7</sup>
	L	25	2,82.10 <sup>-6</sup>
Hêtre	T	30	1,91.10 <sup>-8</sup>
	R	30	3,12.10 <sup>-8</sup>

R : direction radiale, T : direction tangentielle, L : direction longitudinale, R+T : moyenne des directions radiale et tangentielle.

Il est important de préciser que ces valeurs dépendent de la température, de l'humidité relative du milieu et pour le bois du sens du fil. Comme le montre le tableau suivant, le coefficient de diffusion d'un gaz diffère en fonction de la teneur en eau du matériau.

M; kg/kg	D · 10 <sup>-10</sup> ; m <sup>2</sup> /s
0.08	2.35
0.09	2.45
0.10	2.55
0.11	2.66
0.12	2.77
0.13	2.88
0.14	3.00
0.15	3.13

De plus l'atmosphère actuelle est un mélange de gaz (*tableau 5*) auquel il faut joindre les gaz polluants dus aux agents extérieurs et les parois d'un bâtiment qui sont généralement constituées par différents matériaux, ce qui nous amène à un combinaison de mesures assez élevées de coefficients de diffusion.

Nom du Gaz	Formule chimique	% présence
Diazote	N <sub>2</sub>	78
Dioxygène	O <sub>2</sub>	21
Argon	Ar	0,93
Vapeur d'eau	H <sub>2</sub> O	0 ~ 4
Dioxyde de Carbone	CO <sub>2</sub>	0,033
Néon	Ne	0,0018
Krypton	Kr	0,000114
Dihydrogène	H <sub>2</sub>	0,00005
Monoxyde d'Azote	N <sub>2</sub> O	0,00005
Xénon	Xe	0,0000087
Ozone	O <sub>3</sub>	0- 0,0000001

*Tableau 5 : composition de l'atmosphère.*

### 1.5.2. Prévisions

Seule une simulation numérique permettrait d'évaluer rapidement la diffusion de gaz à travers une paroi respirante et ainsi apprécier le temps de renouvellement d'air ou l'évacuation des polluants de la maison. Malheureusement ce logiciel n'existe pas et pour le moment nous pouvons seulement affirmer que l'ouverture des fenêtres et portes assurent ce changement d'air.