



## - PARTIE 1 -

### ***LES PAROIS RESPIRANTES***

## 1. PRÉSENTATION

### 1.1. Préambule (pourquoi le mur respirant ?)

Un bâtiment est conçu pour protéger les personnes et les biens à l'intérieur de celui-ci des agressions extérieures. Ainsi, un bâtiment doit permettre :

- la réduction des pertes énergétiques lorsque le chauffage ou la climatisation des locaux est nécessaire,
- l'atténuation des variations de température extérieure.

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments, doivent posséder des qualités thermiques qui les feront réagir d'une façon satisfaisante aux différentes sollicitations. Ces forces varient constamment en intensité et en durée, elles entraînent des échanges d'énergie entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments.

Pour le thermique, ils peuvent prendre plusieurs formes :

- le rayonnement (énergie traversant une matière solide transparente à ce rayonnement ou traversant un gaz inerte),
- la convection (dissipation par un mouvement de gaz),
- la conduction (dissipation par la matière solide ou par un gaz inerte).

Pour répondre à ce besoin d'isoler thermiquement les bâtiments, notamment après la crise pétrolière de 1973, les industriels ont développé des produits isolants **qui empêchent la chaleur produite dans la maison de s'échapper**. Les travaux de recherche sur des matériaux de plus en plus sophistiqués se sont focalisés sur les performances thermiques en créant des isolants à base de matières plastiques alvéolaires et autres produits synthétiques de revêtement ce qui a abouti à la réalisation d'habitats étanches.

Néanmoins dans un souci d'économie et d'amélioration de qualité de vie, les pays nordiques et germaniques ont cherché à améliorer l'ambiance intérieure de la maison en minimisant les pertes de chaleur en hiver, la condensation, l'air pollué et la fraîcheur en été. C'est ainsi que nous avons vu naître les premières constructions respirantes (*figure 1*).

PAROI STRICTEMENT ETANCHE	PAROI RESPIRANTE
- Imperméabilité à l'air	- permet des échanges gazeux
- pas de régulation hygrométrique	- régule l'humidité ambiante, l'absorbe et la restitue
- nécessite la Ventilation Mécanique Contrôlée	- Ventilation naturelle, à travers les parois
- stockage, absorption du radon	- évacuation du radon

*Figure 1 : Tableau comparatif des différentes parois.*

### 1.2. Définition

Une paroi respirante fonctionne grâce à un **différentiel de pression intérieur-extérieur** qui permet de faire migrer l'air lentement dans les murs, de l'ambiance présentant la pression la plus élevée à l'ambiance dont la pression est la moins élevée avec lesquels il échange peu à peu ses calories et son eau excédentaire.

Pour respecter ce principe, la mise en oeuvre de parois respirantes nécessite le respect de conditions suivantes :

- **la paroi sera la plus homogène possible**, donc sans ponts thermiques pour éviter les concentrations d'humidité,
- les matériaux de construction devront être des **matériaux perméants** ayant tous une capacité hygroscopique moyenne à élevée, tels : bois, laine de bois, laine végétale ou animale, terre cuite, chaux, plâtre, etc,
- **les matériaux seront disposés de telle sorte que leur résistance à la vapeur d'eau ou leur valeur  $S_d$  soit en dégressivité de l'intérieur vers l'extérieur.**

### 1.3. Principe de fonctionnement

Son principe de fonctionnement est simple : trois composants de base (peau interne, isolant, peau externe) calculés les uns par rapport aux autres afin d'accélérer le transit d'air, d'eau et de vapeur de l'intérieur vers l'extérieur. Ce qui entre dans le mur en ressort tout naturellement sans qu'il soit nécessaire d'établir de barrières étanches. Le matériau isolant est choisi principalement pour ses propriétés hygroscopiques qui lui permettent d'absorber sans dommage les surplus ponctuels de vapeur d'eau et de les restituer quand les conditions le permettent tout en limitant le flux de chaleur vers l'extérieur (*figure 2*).

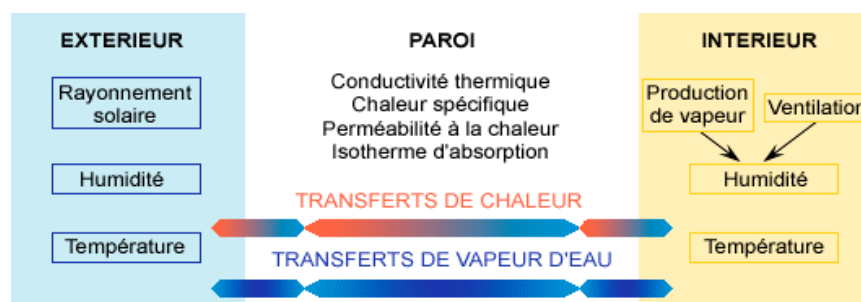


Figure 2 : Comportement hygrothermique d'un mur respirant.

### 1.4. Terminologie générale – Notions techniques

Sans entrer dans une démonstration scientifique, il est intéressant de présenter quelques éléments techniques. **La diffusion de la vapeur est caractérisée par la perméance d'un matériau.** Plus un matériau est perméant, plus il permet le transfert de vapeur.

Les normes en vigueur dans le bâtiment ont pour objet notamment d'éliminer tout risque de point de rosée dans l'isolant. Le point de rosée est le moment où, en fonction de la pression et de la température, la vapeur se transforme en eau. Pour atteindre cet objectif et compte tenu du fait que dans la grande majorité, pour ne pas dire la totalité, les isolants sont non hygroscopiques et que les matériaux composants les murs et les couvertures sont peu ou pas respirants, les normes imposent des pare-vapeurs ou frein vapeur. Nous définirons le pare-vapeur comme étant une couche imperméable à la vapeur qui résiste à la diffusion de la vapeur d'eau par suite d'une variation de pression de cette dernière. Alors que le frein vapeur n'est pas une barrière à la diffusion mais un ralentisseur qui limite les entrées d'air extérieur tout en permettant les transferts de vapeur d'eau. Le tableau suivant montre les  $S_D$  de différents matériaux perméants et non poreux.

Matériau	Épaisseur d'air équivalente ( $S_D$ en m)
Pare vapeur	> 130
Frein vapeur	1.3 à 50
10 cm de laine de mouton	0.1
10 cm de laine de verre	0.10 à 0.30

10 cm de fibre de bois	0.5
Peinture à l'eau microporeuse	0.007 à 0.01

Par contre l'approche écologique de l'isolation respirante prend en compte les qualités hygroscopiques de la plupart des isolants naturels. Le plus spectaculaire étant la laine de mouton qui peut absorber 30 % de son poids de vapeur d'eau sans perdre ses propriétés physiques et isolantes. Dans cette optique il ne s'agit plus de placer une barrière de vapeur pour en interdire le transfert mais d'adapter la perméance du pare-vapeur (qui se place côté chaud du local à isoler) aux qualités de respiration de la paroi extérieure. Dans certains cas, comme l'isolation sur combles perdus où la masse d'air sous la toiture, elles constituent une paroi très respirante qui excluent le pare-vapeur. Ainsi le volant hygrométrique de l'isolant peut être utilisé au maximum pour participer à la régulation de l'humidité à l'intérieur du bâtiment.

### 1.5. Des "parois qui respirent"

Il convient de s'expliquer sur l'expression "murs qui respirent". En effet il s'agit d'un terme qui veut renseigner sur le potentiel salubre de l'habitat. C'est néanmoins un terme médical spécifique aux organismes vivants. La "paroi qui respire" est assimilé à une troisième peau, à qui on attribue des fonctions qualitatives telles que la perméabilité à l'eau et à l'air, entraînant une meilleure circulation, l'élimination de l'humidité et mieux, la régulation de l'hygrométrie.

### 1.6. Pourquoi aérer ?

Le but de l'aération est d'assurer un environnement intérieur confortable pour préserver les occupants en bonne santé (*figure 6*). Un air sans cesse renouvelé à l'intérieur des bâtiments est nécessaire avant tout pour éliminer les divers polluants générés dans le bâtiment et l'atmosphère malodorante ou toxique. Toutes ces émissions sont regroupés sous la même appellation : COV (composés organiques volatils). Ils proviennent des substances nocives présentes sous la forme de solvants dans les peintures et les vernis, dans les détergents ou dans les produits pour les soins du corps. On les utilise également comme gaz propulseurs dans les bombes aérosols. Alors en l'absence d'aération, les occupants ressentiront un manque d'air et seront incommodés par une concentration trop élevée de contaminants.

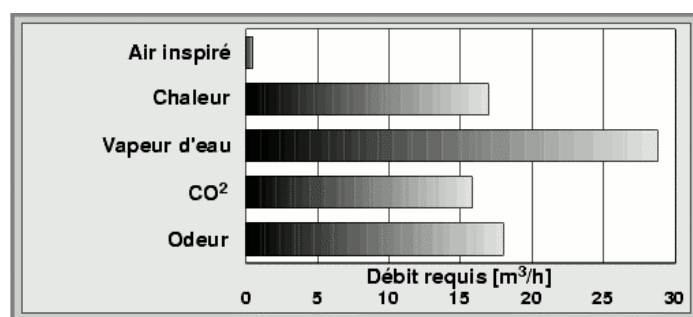


Figure 6 : Débit d'air requis pour évacuer les divers contaminants produits par une personne assise.

### 1.7. Le cadre technique

Il faut savoir que le mécanisme paroi respirant est un phénomène très complexe. Dans l'air, l'eau est à l'état gazeux (vapeur), l'air se décompose alors de la façon suivante : Air = Air sec + Vapeur d'eau. Qui plus est, de la condensation peut avoir lieu dans la paroi occasionnant de l'eau sous forme liquide. Tous ces phénomènes peuvent être regroupés sous trois critères : le flux thermique, la transmission de la vapeur d'eau et le transport de liquide.

Le tableau suivant récapitule les mécanismes et les causes des différents phénomènes associés que *Künzel* a expliqué dans une de ses thèses sur le transport de chaleur et d'humidité [33] :

	<i>Mécanismes</i>	<i>Cause, force motrice</i>
<b>Transfert de chaleur</b>	conduction de chaleur	différence de température
	Radiation	différence de température
	convection (flux d'air)	pression totale, différence de densité
	flux enthalpique	diffusion de vapeur avec changement d'état et flux de transport liquide dans des champs de température différents
<b>Transfert de vapeur</b>	diffusion des gaz	pression de vapeur (température, pression totale)
	transport moléculaire (effusion)	pression de vapeur
	diffusion en solution	pression de vapeur
	convection (fuite d'air)	gradient de pression totale
<b>Transfert de liquide</b>	transport capillaire	succion capillaire
	diffusion de surface	humidité relative
	Drainage	gravité
	flux hydraulique	pression différentielle totale
	Electrokinesis	champ électrique
	Osmose	concentration en ions

Certains phénomènes restent anecdotiques et ne seront pas étudiés. A ces rôles il faut rajouter que la paroi doit assurer les fonctions mécaniques et acoustiques. Mais ces phénomènes ne sont pas directement pris en compte car ce n'est pas le but prioritaire que l'on recherche, seul les performances hygrothermiques seront étudiées. C'est la deuxième partie de nos recherches.

## 2. ÉTUDES, RECHERCHES ET EXPÉRIENCES

### 2.1. Perméabilité à l'air

C'est un **hygiéniste allemand, Max von Pettenkofer** qui, probablement le premier, insista sur la nécessité de construire des « murs respirants ». Le scientifique a démontré en 1877 la perméabilité de la maçonnerie au gaz en effectuant un essai simple [1] :

Un morceau de mortier de chaux aérien de forme cylindrique est entouré d'une couche de cire puis bouché à chaque extrémité par un entonnoir, comme le montre la figure 3. En soufflant dans l'entonnoir, il arrivait à éteindre une bougie et les essais fonctionnaient de la même manière avec des briques, le bois et le grès poreux, plus difficilement avec le calcaire ou la pierre.

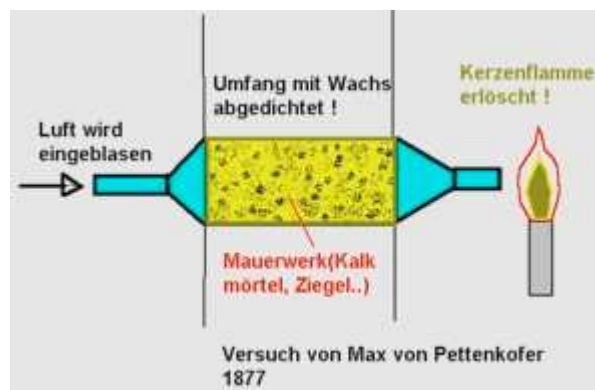


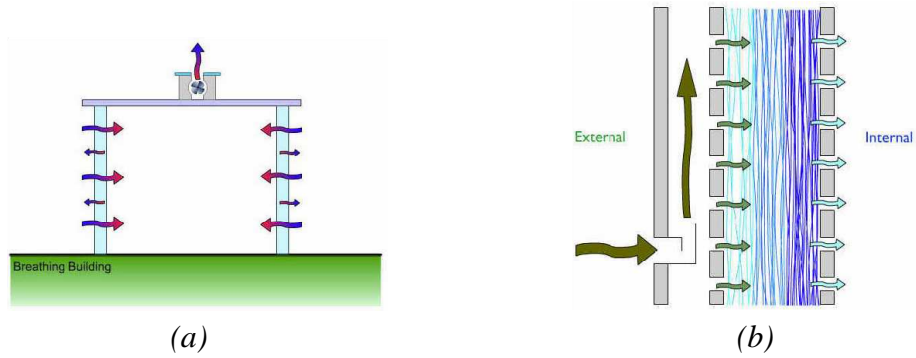
Figure 3 : Expérience de la bougie par Pettenkofer

Il concluait de ses expériences que l'air vicié d'une maison pouvait quitter le logement avec la condition d'avoir les cloisons sèches.

Plus proche de notre ère, des expériences menées en Ecosse [5] ont démontré que, en plus de réduire la perte de chaleur grâce à l'isolation dynamique, la paroi du bâtiment peut agir en tant que filtre à air avec un rendement élevé dans les bâtiments naturellement aérés, de ce fait fournissant une alternative viable et attrayante à la climatisation mécanique dans les environnements urbains encombrés.

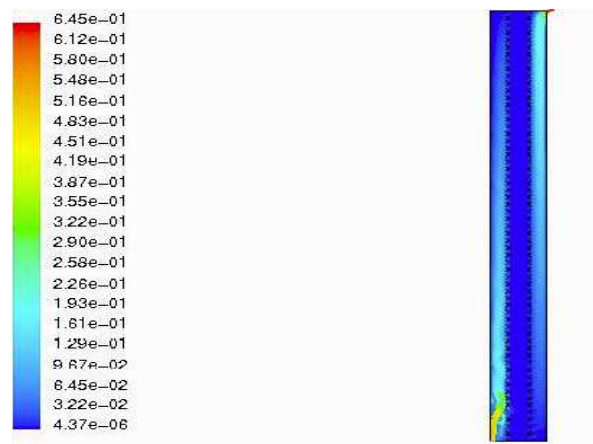
Le chercheur *Mohamed Imbabi* de l'université d'Aberdeen en Écosse est un expert en matière de technologie structurale. Il travaille dans le développement des systèmes de mur respirant. La compagnie "Environmental Building Partnership Limited" dont il est le directeur, a reçu un financement du "Scottish Executive SMART programme" pour développer les systèmes de mur respirant. Le travail d'*Imbabi* a été édité dans les journaux, où il a écrit plus de cinquante articles scientifiques et rapports techniques [14]. Ses collègues et lui-même ont établi les paramètres d'exécution de cette forme de construction, ont également prouvé que les murs isolés dynamiquement étaient perméables à l'air et possédant des propriétés de filtration particulaire excellentes [15].

Il a également mené avec *Peacock* [12] une étude sur le mur respirant pour les bâtiments et les bureaux dans les environnements urbains pollués. Le projet avait une technologie permettant une circulation d'air frais vers l'intérieur dans la direction opposée de la chaleur afin de permettre un échange thermique entre le mur et l'air entrant par ventilation comme représenté sur les figures 4a et 4b ci-dessous :



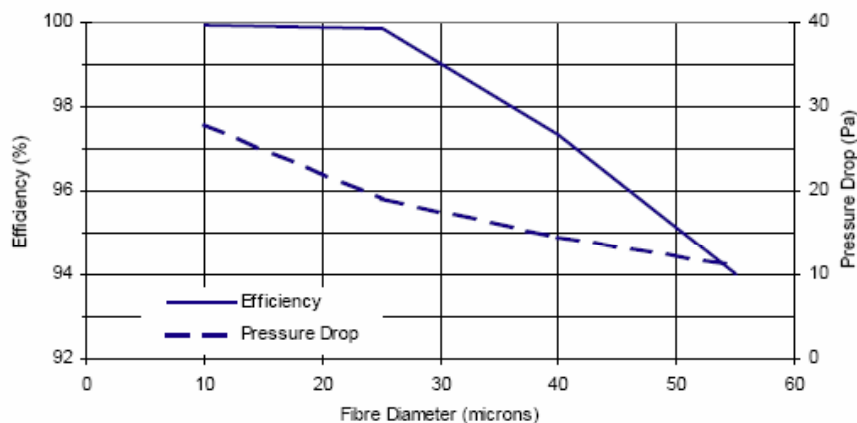
**Figure 4 :** Chaleur et écoulements de la masse dans (a) le bâtiment de respiration, et (b) le mur de respiration.

Les différentes simulations réalisées confirment l'excellente uniformité d'écoulement de flux d'air circulant dans la cavité derrière la peau interne du mur avant de ressortir, préchauffé et filtré (figure 5).



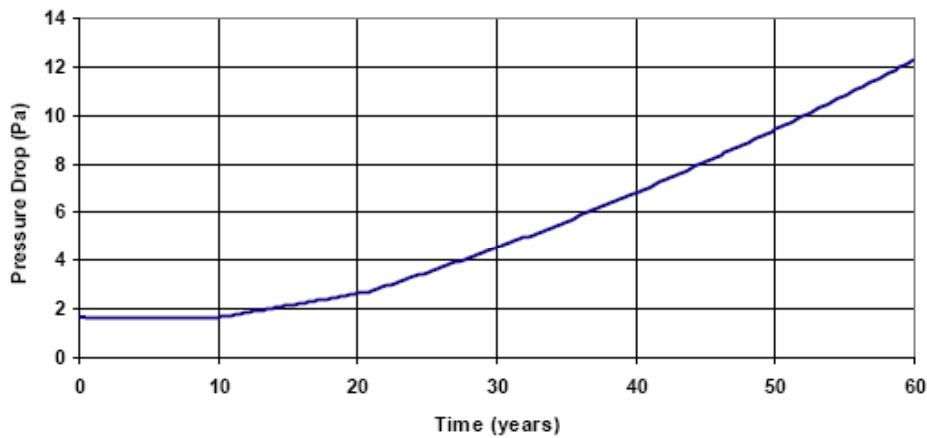
**Figure 5 :** distribution de vitesse sur un mur de 3m.

Les expériences montrent également qu'en fonction du pouvoir de filtration des matériaux, l'efficacité du mur respirant peut être réduite et se répercuter sur une baisse de pression. (Figure 6)



**Figure 6 :** Effet du diamètre de la fibre (porosité) sur la chute et l'efficacité de la pression.

L'étude fournit des réponses préliminaires aux questions cruciales de l'efficacité de filtration sur une période plus ou moins longue. En fait, elle permet de montrer qu'avec le temps de fines particules de pollution obstruent les matériaux poreux. L'évolution de la chute de pression sur une période de 60 ans est montrée sur la figure 7 :

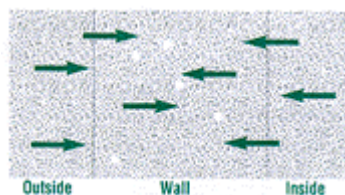


*Figure 7 : évolution de la chute de pression avec le temps.*

#### Avantages concernant le renouvellement d'air :

Premièrement l'environnement intérieur d'une maison atteint un niveau de pollution jusqu'à 20 fois plus toxique qu'à l'extérieur; menant à des syndromes, maux de tête, allergies et cancers. **Des problèmes avec l'air éventé sont complétés par un potage chimique de composés organiques volatils comme les peintures, tapis, et textiles synthétiques comprenant les meubles et la colle de tapis, plastiques, mousse, tuile et de tapis, etc...**

Deuxièmement, ces "maisons modernes" bien hermétiques ont un taux d'échange d'air d'une fois toutes les cinq heures seulement. La Science de bâtiment nous indique que le corps humain exige entre un et deux changements d'air par heure pour maintenir la vitalité, pour régénérer des cellules du corps et pour éliminer les toxines environnementales. Or **la maison à base de murs respirant admet un échange d'air complet trois fois par heure**. Ce rapport extrêmement élevé permet à la toxicité d'être absorbée par le mur et d'assurer un renouvellement d'air frais avec un minimum de rejet de produits nocifs (figure 8).



*Figure 8 : Echange air frais et toxique.*

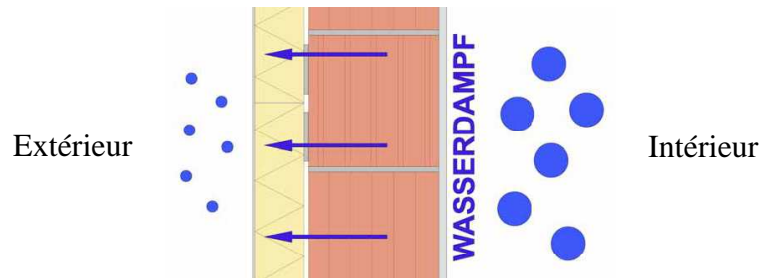
Troisièmement, les murs "respirables" fonctionnent automatiquement, n'exigent aucune énergie, sont exempts d'entretien et durent la vie du bâtiment. Ils peuvent également réagir beaucoup plus rapidement que la ventilation.

Quatrièmement les murs respirants peuvent filtrer 99.9% de tous les polluants particuliers, gazeux et autres aéroportés de l'air entrant [12].



## 2.2. Transport de vapeur d'eau

Il faut savoir que par exemple quatre personnes produisent tous les jours 6-9 litres d'eau qui se transforme en vapeur. Cette vapeur d'eau contenue dans l'air, dioxyde de carbone et polluants aériens larges, est évacuée par les parois. Le processus de "diffusion de vapeur d'eau" est réalisé grâce à une différence de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur du à l'air chaud qui peut absorber plus de vapeur d'eau que l'air froid (*figure9*).



*Figure 9 : Processus de transfert de vapeur par diffusion.*

Au Canada, un programme de recherche réalisé sur l'hygrothermie de différentes conceptions de mur a été étudié avec l'appui d'un consortium de sept fabricants de produits du bâtiment. L'étude a comporté des investigations théoriques, des essais en laboratoire, l'observation des conditions d'humidité et de température sur 26 murs et surveillés pendant deux années à 5 minutes d'intervalles tandis que les murs étaient exposés sud-ouest dans l'environnement climatique de l'Ontario (Canada).

Les résultats démontrent la supériorité des prétendus murs respirants que ce soit pour la perméance à la vapeur d'eau, l'isotherme de sorption, la vapeur d'eau absorbée en 24 heures par des murs exposés à un changement de 50% HR ainsi que l'humidité relative maximum et minimum sur toute une saison [11].

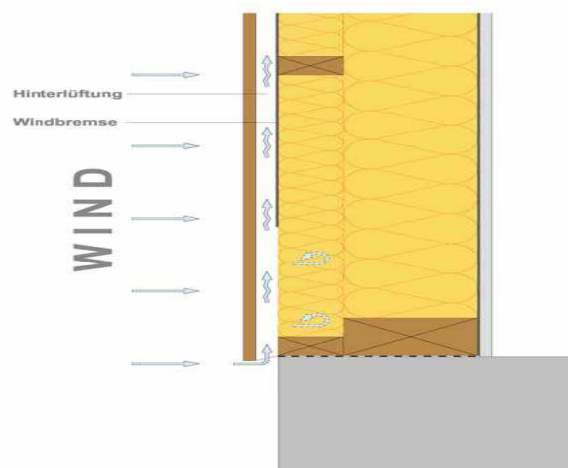
Pour évaluer la technologie de murs respirants, deux demi-maisons expérimentales semi-détachées ont été construites en 1994 à Swansea au pays de galles par un bureau d'étude Wimpey Environmental Ltd et surveillées par Wimpey et TRADA. Une moitié est construite en utilisant la technologie de mur respirant, alors que l'autre moitié est établie en utilisant l'armature conventionnelle de construction en bois. En plus des examens réalisés sur place, des essais en laboratoire ont été effectués pour fiabiliser les résultats. Que se soit en terme de transfert thermique ou de transfert de vapeur, les conclusions montrent le net avantage de la technologie de mur respirant. [13]

### Avantages sur la régulation et le transfert de vapeur :

Le premier argument en faveur de la "paroi respirante" est la capacité à compenser les fluctuations d'humidité dans l'air. "la paroi active" ne déshydrate plus par conséquent les intérieurs, mais compense seulement les fluctuations d'humidités et améliore ainsi le climat ambiant car il faut savoir qu'une humidité relative de plus de 70% entraîne une sensation désagréable pour une personne en raison d'une réduction de la prise d'oxygène dans le sang en conditions chaud-humides. On observe aussi des douleurs rhumatismales croissantes avec un air humide froid. Des études montrent qu'à l'intérieur des maisons, il y a pendant toute l'année une humidité relative (Rhésus) de 45% à 55%. Ce qui correspond à l'humidité relative idéale pour le corps humain.

### 2.3. Etanchéité au vent et à la pluie

Il ne faut pas négliger l'imperméabilité des murs car selon le chercheur *Doleza* les parois respirantes doivent avoir une étanchéité au vent et à la pluie afin de ne pas perturber le fonctionnement des parois provoqué en grande partie par le différentiel de pression intérieur-extérieur. Il préconise l'emploi d'une barrière à l'extérieur de la paroi avec laquelle la façade empêchera l'infiltration d'air froid et d'eau venant de l'extérieur (*figure10*) [2].



**Figure 10 :** barrière installée à l'extérieur de la paroi contre le vent.

Toutefois si le parement extérieur est un système à base d'enduit appliqué sur l'isolant, il faut selon le CSTB respecter un rapport entre la perméance de l'enduit et la perméabilité de l'isolant en fonction du coefficient de transmission thermique ( $U$  ou  $K$ ) et de la température extérieure [30].

### 2.4. Combinaison des deux phénomènes (air et vapeur d'eau)

En 1997 deux professeurs suédois *Kai Ödeen* et son assistant *Folke Björk* ont expérimenté le transport d'air, de gaz traceur et d'humidité sur une structure isolée par une fibre de cellulose [41]. La perméabilité à l'humidité, la perméabilité à l'oxyde de dinitrogen ( $N_2O$ ) et la perméabilité spécifique du matériau comme milieu poreux ont été mesurées. Ils ont utilisé la fibre de cellulose car ce matériau est selon les prétendus "Eco-constructeurs" respirant dans le sens que les contaminants tels que l'anhydride carbonique ( $CO_2$ ) sont évacués de l'intérieur par le processus diffusif et réduisant ainsi le besoin en ventilation. L'équilibre hygroscopique dans le mur n'a pas été traité dans cet essai. Mais les calculs montrent que la théorie du mur respirant n'est pas une utopie.

### 3. RÉALISATIONS ET CONCEPTIONS DE MAISONS

En Norvège l'architecte *Dag Roalkvam* a présenté une alternative sur la philosophie de la "construction bien aérée." Il affirme qu'un mur ou un plafond "respirant" permet à l'air de traverser lentement sa structure et ainsi occasionnerait une amélioration de la ventilation et une perte limitée de chaleur. Il indique également que la méthode fonctionne seulement si la maison est bien étanche à l'air [3]. Pour ce faire il utilise pour la conception de ses murs, des bottes de paille compacte, sous le concept "Strawbales" *Lacinski* 1996 (figure 11).



Figure 11 : Maison montée en botte de paille.

De plus, l'institut "Canadian Mortgage and Housing Corporation" a commandité en 1998 des recherches sur l'humidité et le transfert dans des maisons en bottes de paille (figure 12). Neuf maisons ont été construites aux différents endroits d'Amérique du Nord afin d'avoir un plus grand champ de tests et mesures sous différents climats. Les résultats montrent la bonne tenue générale des maisons au transfert de vapeur et à l'humidité qui ne stagnent pas dans la texture des parois [17].

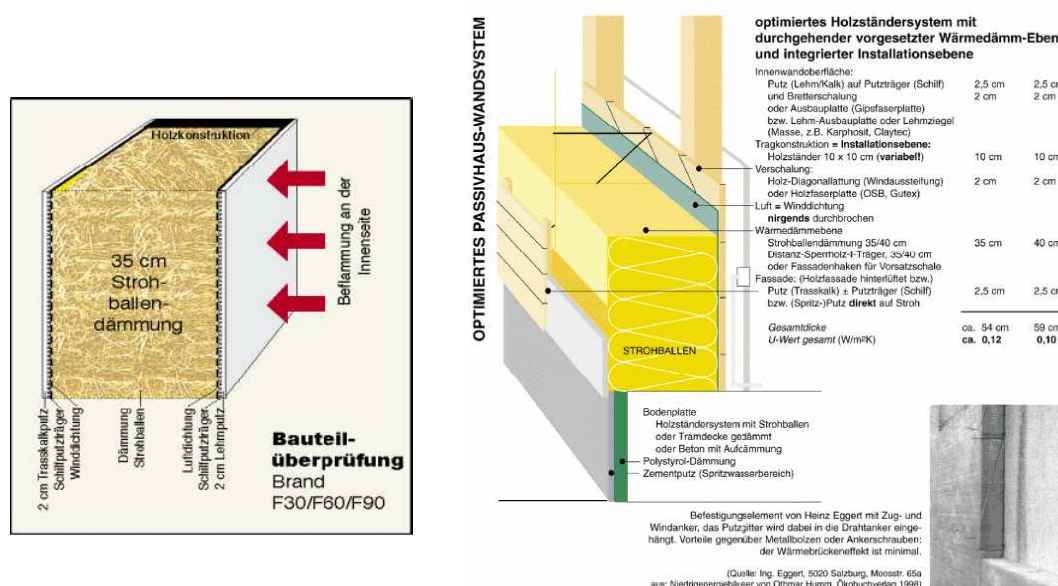


Figure 12 : conception de mur en botte de paille.

Au Royaume-Uni dans les années 80 un projet d'Eco-Village "Findhorn" a vu le jour sous la responsabilité de l'ingénieur *John Talbott*. Avec actuellement plus de 40 bâtiments il a travaillé avec d'autres professionnels au développement des divers dispositifs écologiques des bâtiments, y compris le système unique de mur respirant. Le projet a produit un énorme intérêt à tous les niveaux : architectes, ingénieurs, du constructeur au bricoleur. L'Eco-Village est présenté en tant que bases de données et documents de référence pour la profession du bâtiment. [8]

Plusieurs maisons dites à murs dynamiques ont été construites au Canada (Timusk 1987) et en Suède (Levon 1986) dans le but de suivre l'évolution de la déperdition conductrice et d'exfiltration d'énergies (qu'elles peuvent réaliser). Elles n'améliorent pas nécessairement la qualité d'air intérieur, mais assurent une bonne ventilation (Taylor 1997) [11]. Par contre J.F. Straube ingénieur en recherche affirme que de telles maisons ont employé des moyens mécaniques afin de fournir le niveau exigé de renouvellement de ventilation. Ce qui est à l'encontre du concept "maison respirante".

En Nouvelle Zélande des maisons conçues à base de terre compacte vantent l'intérêt des murs qui agissent en tant que filtre, tout en permettant à l'oxygène d'imprégner la maison (figure 13) [6].

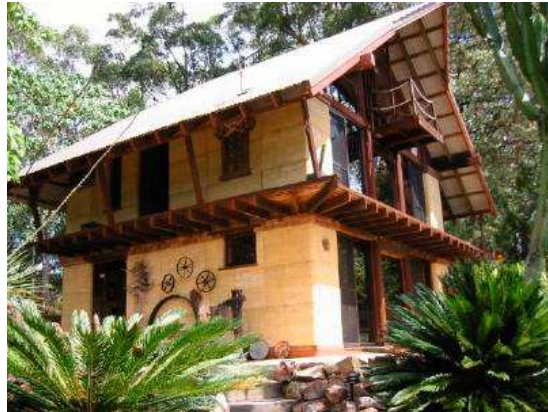


Figure 13 : Maison construite en terre compressée.

Un système Nord-américain utilise la combinaison bois-ciment [7] et principalement le bois de rebut comme matière première. Les murs sont fabriqués à partir de briques réalisées d'agrégat de bois à 85% et de ciment à 15%. Le constructeur garantit une structure qui produit un échange d'air très lent entre l'intérieur et l'extérieur tout en maintenant le mur sec. La condensation est alors quasiment nulle, éliminant de ce fait les conditions pour la croissance des moisissures qui rappelons-le, est la "maladie du bâtiment". Ces capacités de respiration permettent également de traiter plus rapidement et intégralement l'humidité qui s'évapore du mur et pas simplement superficiellement comme dans les systèmes à base de polystyrène (figure 14).

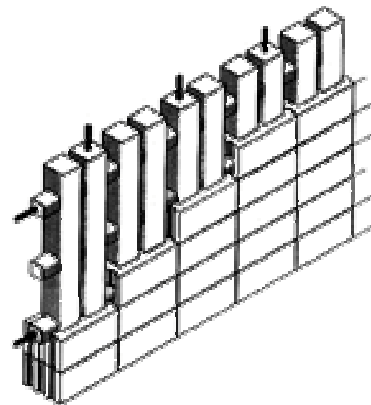


Figure 14 : Brique en copeaux bois-ciment.



Durisol est un matériau en bois-ciment collé ayant des propriétés similaires à la conception vue précédemment. Mais ils incorporent en plus un isolant minéral résistant à l'humidité placé coté extérieur du mur pour augmenter l'efficacité énergétique additionnelle qui n'est pas possible avec un isolant disposé sur le bord intérieur de l'aggloméré (figure 15 et 16).

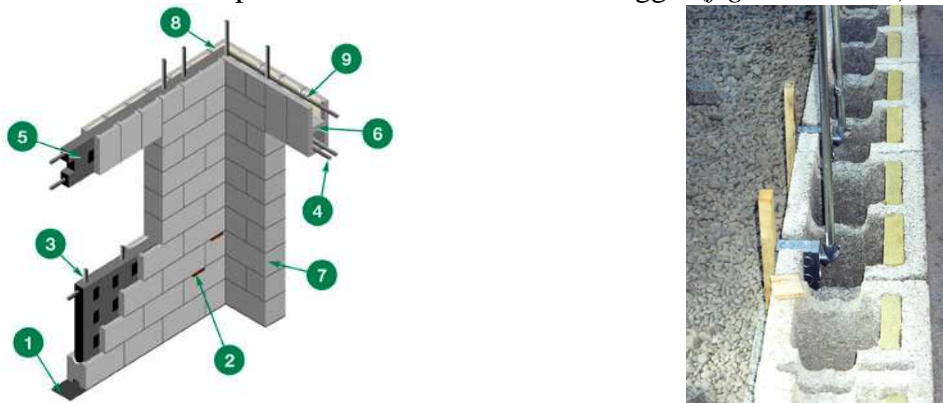


Figure 15 et 16 : Le système Durisol formant le mur.

Au Pays de galles à Rhymney, l'entreprise "Excel Industries Limited" a mis au point une structure respirante qui peut être appliquée à différents éléments du bâtiment, tels que les murs, planchers, toits, ou l'enveloppe complète de bâtiment.

Ils utilisent des composants fournissant l'équilibre parfait à la résistivité et à la perméabilité à la vapeur pour réaliser le mur respirant parfait. Cette structure est conçue autour d'un isolant dynamique fabriqué à base de rebut de papier journal réutilisable à 100% et qui a la capacité de favoriser la migration de l'humidité grâce à sa texture poreuse. Cette ossature assure une diffusion maximale afin de rendre la structure aussi libre que possible au passage de la vapeur d'eau (figure 17).

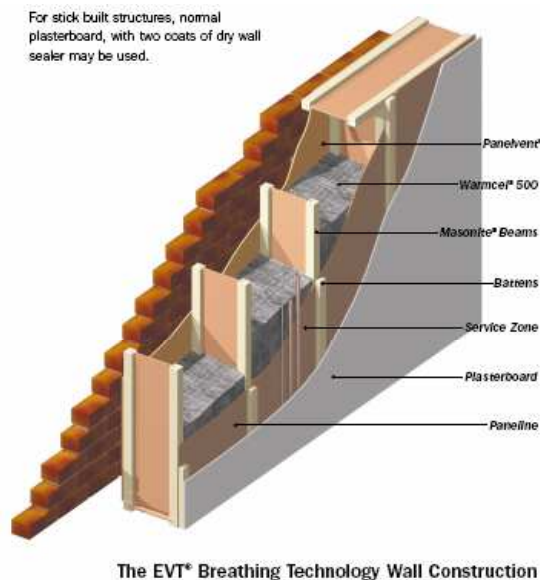


Figure 17 : Technologie à base de papier journal recyclé.

Il en résulte que les matériaux respirants sont principalement naturels comme le bois, la laine de bois, l'argile, la paille, le liège, avec de bonnes capacités hygroscopiques, absorbant l'humidité excessive et la re-libérant quand les conditions environnementales le permettent. Ces systèmes permettent la diffusion d'air et de vapeur tout en évitant la condensation. Mais il ne faut pas oublier que la prolifération de moisissures peut se produire dans des circonstances externes au système respirant des maisons dues à certains problèmes de conception et de réalisation comme une fuite de tuyauterie ou un écoulement dans le toit.

## 4. ENVIRONNEMENT LÉGISLATIF ET TECHNIQUE

### 4.1. L'approche Française

En France il n'existe aucune réglementation concernant les parois respirantes. Malgré cela les maisons dites respirantes doivent se conformer à la législation Française qui s'applique au bâtiment. Nous allons nous efforcer de trouver les similitudes des points de la réglementation et des normes en ce qui concerne les matériaux servant à la construction des murs. Elles doivent respecter au moins trois principaux critères que sont : l'isolation des parois, l'hygrométrie dans le logement et le renouvellement d'air à l'intérieur des locaux.

L'approvisionnement en oxygène, la production d'humidité sur l'air, la réduction usagée du CO<sub>2</sub> et des polluants dans l'air d'un logement sont exclusivement la tâche de l'aération. Elle est aussi nécessaire pour évacuer la vapeur d'eau, les odeurs, les produits de combustion. L'**arrêté du 24 mars 1982** du code de la construction et de l'habitation (CCH) stipule dans l'article R111-9 que : « les dispositifs de ventilation, qu'ils soient mécaniques ou à fonctionnement naturel, doivent être tels que les exigences de débit extrait, soient satisfaites dans les conditions climatiques moyennes d'hiver ».

Les débits extraits dans chaque pièce de service doivent pouvoir atteindre, simultanément ou non, les valeurs données dans le tableau ci-après :

Nombre de pièces principales du logement	Débits extraits exprimés en m <sup>3</sup> /h				
	Cuisine	Salle de bains ou de douches commune ou non avec un cabinet d'aisance	Autre salle d'eau	Cabinet d'aisance unique	Cabinet d'aisance multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	30	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

Dans le premier chapitre de l'**arrêté du 29 novembre 2000** relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments sur l'isolation thermique stipule dans l'article 31 que : « chaque paroi d'un local chauffé, dont la surface est supérieure ou égale à 0,5 m<sup>2</sup>, donnant sur l'extérieur, un vide sanitaire, un parking collectif, un comble ou le sol, doit présenter une isolation minimale, exprimée en coefficient de transmission thermique  $U$ , exprimé en W/m<sup>2</sup>.K, de la paroi, dont la valeur maximale est donnée pour : Mur en contact avec l'extérieur ou avec le sol : coefficient  $U$  maximal : 0.47 W/m<sup>2</sup>.K ».

De plus dans le troisième chapitre de l'arrêté du 29 novembre 2000 concernant la perméabilité à l'air, l'article 15 fixe la perméabilité d'une enveloppe extérieure d'un bâtiment à ne pas dépasser : 0.8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h pour les maisons individuelles.

La Norme NF EN ISO 13788 [20] précise que pour éviter la prolifération de moisissures, il convient que l'humidité relative à la surface ne dépasse pas **80%** pendant plusieurs jours. Cette règle est assez simpliste car elle traite seulement l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse, mais ne couvre pas les autres aspects de l'humidité (par exemple, l'eau du sol, les précipitations, l'humidité de constitution et la convection d'humidité) qui peuvent être considérés dans la conception d'un composant de bâtiment. De plus le point réglementaire de la norme **P10-202-2 d'avril 1994** extraite du **DTU 20.1** concernant l'hygrométrie des locaux nous stipule que les exigences relatives à cette fonction dépendent également de la destination du bâtiment; elles ont pour objet de définir les conditions auxquelles doivent satisfaire ces murs pour se prémunir contre les risques de condensation dans l'épaisseur du mur. (cf. Annexe 2).

## 4.2. Les normes et règlements Européens, Internationaux

Le panorama des réglementations françaises et des textes d'accompagnement est, comme nous venons de le voir, complexe et important. La situation européenne dans le secteur de la construction est le reflet de la situation française, multipliée par autant de pays qui composent l'Europe, à quoi il faut ajouter les différentes cultures, de traditions du domaine de la construction, la situation économique des pays, leur politique vis-à-vis de l'énergie, et la législation qui n'a pas la même forme que la nôtre.

C'est pour harmoniser à terme le secteur de la construction que les communautés européennes ont adopté une directive relative aux produits de la construction. Le CEN (Comité Européen de Normalisation) sert à l'harmonisation technique en Europe conjointement avec les organismes internationaux (ISO) et l'évaluation de conformité des produits et de leur certification.

Selon *Jean-Pierre OLIVA*, pour éviter toute condensation dans un mur la réglementation britannique dite « 5/1 » (norme **BS5250** : 1989) semble la plus simple à appliquer. [21]

Mais cette norme est remplacée en 2003 par une loi internationale plus aboutie en rapport avec les parois respirantes : l' **EN ISO 13788** de 2002 [20] qui fait partie d'une série de règles prescrivant des méthodes de calculs relatives aux propriétés thermiques et hydriques des matériaux et produits du bâtiment. Elle a depuis reçu le statut de norme nationale.

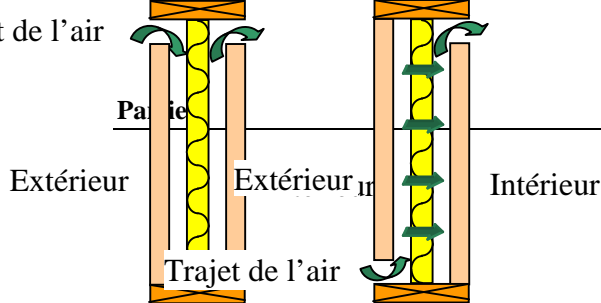
En Allemagne la norme **DIN 4108-3** définit les exigences, méthodes de calcul et indications pour la planification et la mise en œuvre des performances hygrothermiques des murs [22].

Au Pays-bas une norme publiée en 2004, indique une méthode pour calculer le transfert non régulier de la chaleur et de l'humidité par les fondations. Les équations sont définies et un exemple de repère est donné. Les modèles de simulation couverts par cette norme tiennent compte des phénomènes de stockage et de transport dans une seule dimension.

Cette norme appelée **NEN EN 15026 :2004**, aura son équivalence en France en décembre 2006.

En Suisse pour contrôler les débits d'air en dehors des ouvertures telles que le système de ventilation et les ouvertures aménagées dans une enveloppe, ont instauré une norme **SIA 180** permettant de donner des valeurs limites maximales pour la perméabilité à l'air des enveloppes des bâtiments [36].

Pour finir la norme internationale **ISO 13786** définit les caractéristiques relatives à l'inertie thermique d'éléments du bâtiment [37]. Cette règle s'approche de la méthode de calcul du transfert thermique utilisée pour les murs respirants. En France cette règle est appliquée pour le calcul TH-I de la RT 2000 afin de déterminer la classe d'inertie du bâtiment.



## 5. CONCEPTION DES ISOLANTS DIFFUSIF ET DYNAMIQUES

Nous avons, au vu des recherches effectuées dans la première partie de l'ouvrage que la majorité des ingénieurs et chercheurs ont basé leurs études et essais sur l'utilisation d'un matériau prédominant : l'isolant dynamique et diffusif.

*Imbabi* avec l'aide de deux collaborateurs ont développé un modèle unidimensionnel décrivant le comportement dynamique et diffusif équilibré d'une enveloppe de bâtiment composée de trois-couches, avec l'objectif d'élucider la physique du transport simultané de la chaleur et vapeur par les enveloppes construites avec une isolation dynamique. Les équations trouvées sont simples, permettant à des architectes de construire les outils qui leur permettront de concevoir les constructions "respirantes" et programmer un bilan. Des variables peuvent être modifiées comme la perméabilité à l'air et à la vapeur, la conductivité thermique et l'épaisseur des couches comportant l'enveloppe. Tandis que le transfert de masse a été discuté en terme de transport de vapeur d'eau, les équations sont très générales et s'appliquent au calcul de transport de n'importe quel gaz sur un mur perméable [16] [40].

### 5.1. Isolation dynamique

L'isolation dynamique est la combinaison, dans un mur, d'une isolation conventionnelle et d'un certain genre d'échange dynamique entre les températures extérieures et intérieures. La typologie des isolants dynamiques se divise en:

- isolation dynamique de pariéto où un fluide (la plupart du temps air) circule dans une cavité qui sert d'échangeur de chaleur (*figure 18*)
- isolation dynamique de perméo où un fluide circule dans un matériel poreux. (*figure 19*)

L'air traverse le mur, conduit par une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, créé par des ventilateurs ou par effet cheminée. Naturellement l'air entrant dans le mur est réchauffé par la chaleur qui est conduite à l'extérieur. Cette chaleur perdue à l'extérieur peut être réduite pratiquement à zéro par des circulations d'air tout à fait petites [5]

Le système d'isolation peut être couplé à une ventilation offrant de ce fait une manière efficace de préchauffer l'air frais. Il faut préciser que le coefficient de transmission thermique ( $U$ ) d'une construction dynamique sera très variable en fonction de la vitesse d'écoulement de l'air.

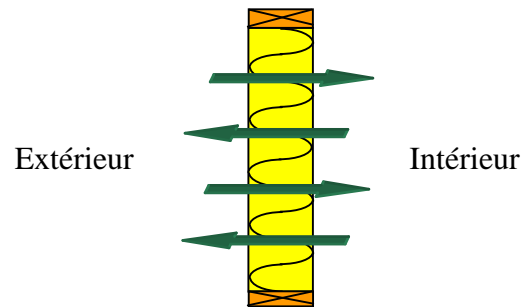
**Figure 19** : isolation pariéto-dynamique

**Figure 18** : isolation perméo-dynamique



## 5.2. Isolation diffusive

Le principe de l'isolation diffusive réside dans le fait que le mouvement d'air qui s'effectue à travers la paroi résulte de la seule force du gradient de concentration (*figure 20*).



*Figure 20 : mouvement d'air sur une paroi composée d'une isolation diffusive.*

Ces systèmes ont déjà été largement diffusés et leur efficacité prouvée. *Taylor* [19] a montré que pour des petites maisons individuelles, une économie d'énergie de l'ordre de 5 à 10% peut être obtenue en utilisant seulement une isolation dynamique.

## 6. FORMULES ET ÉQUATIONS

Afin de confirmer la véracité des maisons respirantes, il est utile de connaître les formules et équations nécessaires aux calculs de transfert de chaleur, transfert d'humidité, transport d'eau liquide et diffusion d'air à travers la paroi. Le professeur *Hens* de l'université de Leuven en Belgique a étudié en 1996 et publié en 2002 un rapport technique sur les phénomènes physiques d'intérieurs et les conséquences du transfert de chaleur, d'air et d'humidité à travers les parois isolées [24] [25].

### 6.1. Transmission de l'énergie thermique

Le phénomène de transfert thermique est composé de trois modes de transmission comme nous l'avons vu en première partie du rapport. Nous allons les étudier séparément et aborder ensuite le cas où les trois modes ont lieu simultanément (*figure 21*).

#### 6.1.1. par conduction

Ce transport s'effectue sans mouvement moléculaire de translation : de proche en proche, les vibrations moléculaires transmettent l'énergie d'agitation. Elle est régie par la *loi de Fourier* qui stipule que le flux thermique transmis par conduction en un point donné est proportionnel au gradient de température existant en ce point :

$$\Phi_{cond} = A \cdot \frac{\lambda}{e} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{A \cdot (t_1 - t_2)}{R_\lambda} \quad \text{en W}$$

avec

$\Phi_{cond}$ [W]	flux thermique
$A$ [m <sup>2</sup> ]	surface
$\lambda$ [W/m.K]	conductivité thermique
$e$ [m]	épaisseur de matériau
$t_1$ [°C]	température de la face la plus chaude
$t_2$ [°C]	température de la face la plus froide
$R_\lambda$ [m <sup>2</sup> .K/W]	résistance thermique d'une épaisseur de matériau

#### 6.1.2. par convection

Elle est régie par la *loi de Newton* qui stipule que le flux de chaleur transmis est proportionnel à l'écart entre la température  $t_1$  du corps solide qui reçoit ou transmet de la chaleur et la température  $t_2$  du liquide ou du gaz qui transmet ou reçoit cette chaleur :

$$\Phi_{conv} = h_c \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$$

avec

$h_c$ [W/m <sup>2</sup> .K]	coefficient de transmission thermique par convection
$t_1$ [°C]	température la plus chaude
$t_2$ [°C]	température la plus froide

### 6.1.3. par rayonnement

C'est la quantité d'énergie thermique cédée par un corps rayonnant par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre 0,04 et 800  $\mu\text{m}$ . Il existe plusieurs lois pour quantifier le flux : la loi de *Stefan-Boltzmann* qui n'est théoriquement valable que pour les corps noirs absolu qui absorbent les rayonnements et la loi de *Kirchhoff* qui utilise dans sa formule les pouvoirs émissif et absorbant. Mais elle n'est valable que pour des plages de longueurs d'onde bien précises. Malgré tout, la chaleur transmise par rayonnement se laisse quantifier par une formule identique à celle de la transmission par convection ; on introduit pour ce faire le coefficient de transmission thermique par rayonnement  $h_r$  :

$$\Phi_{\text{ray}} = h_r \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$$

avec

$h_r$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] coefficient de transmission thermique par rayonnement

$t_1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] température du corps le plus chaud

$t_2$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] température du corps le plus froid

Il est à noter que l'effet du rayonnement solaire peut être pris en considération et l'écoulement de la chaleur du rayonnement sur la surface peut être calculé comme suit [33] :

$$q = a_s \times l$$

avec

$q$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] flux de chaleur du rayonnement solaire à onde courte

$a_s$  [-] absorption des radiations d'ondes courtes

$l$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] rayonnement solaire verticale sur la surface du composant

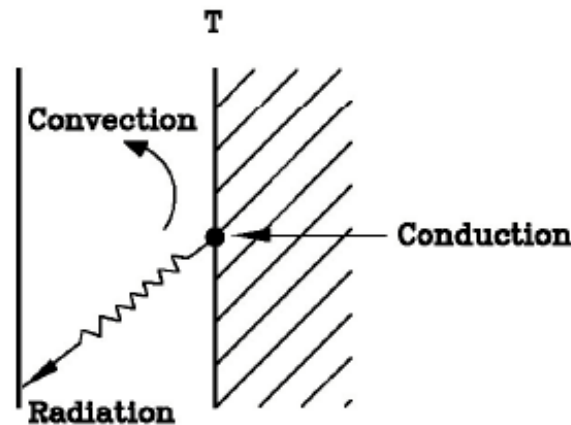


Figure 21 : Les mécanismes de transport pour la simulation de la température

En règle général ces trois modes d'échange se produisent simultanément et l'expression du flux thermique transmis s'exprime par la relation suivante :

$$\Phi = K \cdot A \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}})$$

En sachant que (figure 22)

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \sum \frac{e_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_e} = R$$

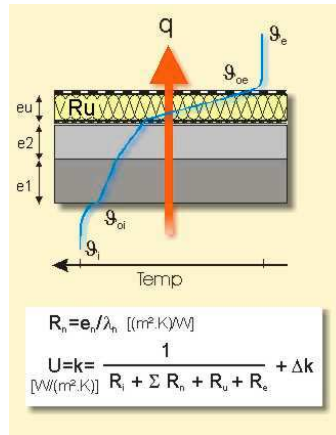


Figure 22 : Transfert de chaleur en fonction de l'épaisseur des matériaux.

avec

$K [W/m^2.K]$  coefficient de transmission thermique globale

$\frac{1}{h_i} [m^2.K/W]$  résistance thermique superficielle interne

$\frac{1}{h_e} [m^2.K/W]$  résistance thermique superficielle externe

$\sum \frac{e_j}{\lambda_j} [m^2.K/W]$  résistance thermique des différentes couches de matériaux

Les formules sont empruntées du manuel "Le Recknagel" [29], et pour les calculs, on se réfère à la réglementation thermique 2000 pour les caractéristiques thermiques à prendre en compte.

## 6.2. Transfert d'humidité

Les molécules d'air (air sec+vapeur d'eau) sont toujours en mouvement en raison des forces thermiques. Quand un mur perméable sépare deux espaces avec une concentration différente en gaz, le transfert de vapeur dans les parois de construction est décrit par des équations dérivées de la première loi de *Fick* (figure 23). La diffusion équilibrée de l'humidité par un mur perméable est représentée par :

$$g = -\pi \frac{dP}{dx}$$

le signe – indiquant que le courant de diffusion est dirigé vers les pressions décroissantes. Il conviendra pour faciliter les calculs de noter l'équation sous la forme suivante :

$$g_v = \pi_v \frac{\Delta P}{e}$$

avec

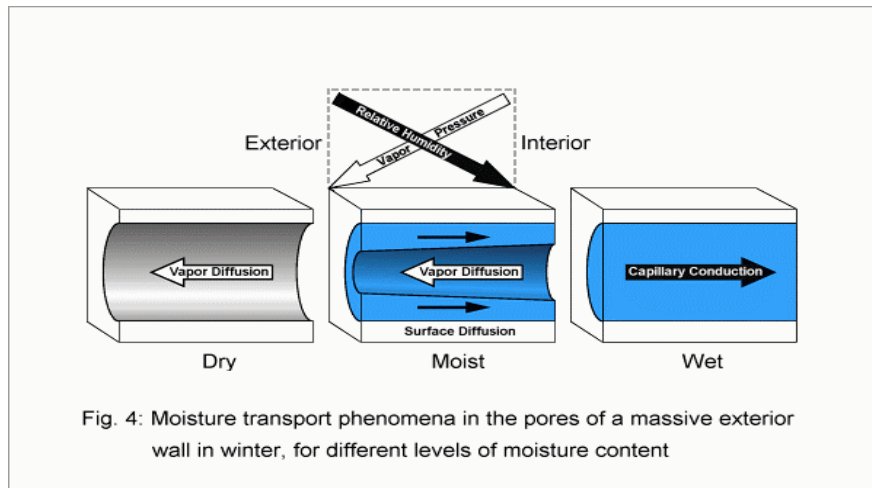
$\Delta P [Pa]$  différentiel de pression partiel de vapeur d'eau

$g_v [g/m^2.h]$  densité du courant de diffusion ou quantité de vapeur d'eau diffusée

$e [m]$  épaisseur du matériau

$\pi_v [g/m.h.mmHg]$  perméabilité à la vapeur d'eau

L'ingénieur *Berthier* du CSTB a analysé puis développé des règles de qualité concernant la diffusion de vapeur au travers d'une paroi [30].



**Figure 23 :** Phénomènes de transport d'humidité dans les pores d'un mur massif extérieur en hiver, pour différents niveaux de contenu d'humidité.

L'organisme de normalisation AFNOR a élaboré un document sur la protection des bâtiments où il est défini une règle de calcul sur la migration de la vapeur d'eau dans les parois [38].

La norme Européenne **EN 12524** [18] donne sous forme tabulée des valeurs utiles pour les calculs de transfert de chaleur et d'humidité, pour des matériaux et produits thermiquement homogènes d'usage courant dans la construction de bâtiments.

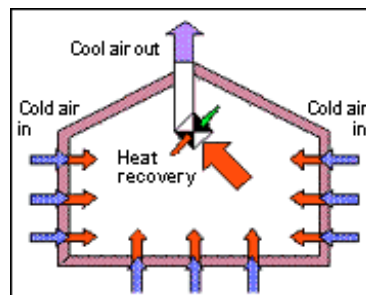
### 6.3. Diffusion d'un gaz

La perméabilité au gaz (air ou  $O_2$ ) d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression (*figure 24*). Elle s'exprime au moyen de la relation de *Darcy* en y ajoutant un terme qui tient compte de la compressibilité des gaz :

$$Q = \frac{k \cdot \Delta P}{\mu \cdot e}$$

avec

$Q$ [m/s]	débit du fluide
$\mu$ [poises]	viscosité dynamique du fluide (pour l'air à 20°C = $18 \cdot 10^{-6}$ Pa.s)
$k$ [m <sup>2</sup> ]	perméabilité apparente du matériau
$\Delta P$ [Pa]	différence de pression à travers le matériau
$e$ [m]	épaisseur du matériau



**Figure 24 :** Transfert d'air à travers les parois.

La loi de *Darcy*, et donc la perméabilité, est définie pour des conditions d'écoulement laminaire dans un milieu homogène, isotrope et continu. Néanmoins la description de l'écoulement s'avère plus complexe par rapport au cas du liquide. Le gaz est sujet à plusieurs types d'écoulement. Lorsqu'un gaz saturant un milieu poreux est à faible pression, le libre parcours moyen des molécules de gaz peut devenir du même ordre de grandeur que la taille des pores. En conséquence, la condition aux limites d'adhérence du fluide sur la paroi du solide n'est plus valable à l'échelle du pore et la loi de *Darcy* n'est donc plus vérifiée à l'échelle macroscopique. En effet, les molécules de gaz "glissent" sur la paroi, ce qui donne lieu à un flux de gaz plus important que celui prédit par la loi de *Darcy*. Ce phénomène s'appelle l'effet *Klinkenberg*. Pour le décrire, *Klinkenberg* proposa en 1941 le concept de perméabilité au gaz.

Une thèse sur le lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température explique plus en détails la description de la perméabilité à la phase gazeuse dans un milieu poreux [34]. Un autre rapport présente également les équations et démonstrations sur l'écoulement et diffusion des gaz en milieux poreux [35].

Nous venons de voir ce que tous les fabricants de matériaux du bâtiment emploient, malheureusement nous étudions plutôt la théorie de la diffusion de l'air. De la même manière que le transfert d'humidité utilise la loi de *Fick*, la diffusion de n'importe quel contaminant en air peut être décrite par :

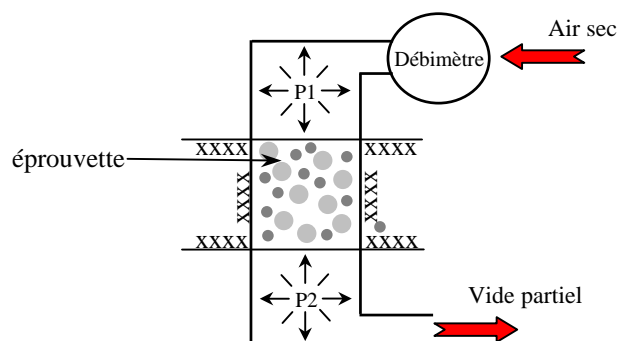
$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = -D \cdot \nabla C$$

avec

$J [g/m^2.s]$	flux spécifique du gaz perméant
$D [m^2/s]$	coefficient de diffusion du gaz (ou diffusivité) dans le matériau
$C [g/m^3]$	concentration massique de gaz

Cette formule n'est valable que pour un gaz pur, dans le cas d'un mélange de gaz l'équation reprendra d'autres termes dont un facteur de séparation. L'ADEME a publié ces démarches portant sur le principe de séparation par perméation gazeuse [42].

Différents montages permettent de mesurer le passage d'un gaz à travers un matériau. Le "perméamètre" est un des appareils qui permet de mesurer la vitesse de passage d'un gaz et donc de l'oxygène à travers un échantillon d'une paroi (*figure 25*).



**Figure 25 :** Schéma du principe de fonctionnement du perméamètre.

Il est à noter que lorsqu'une différence de pression partielle existe entre les deux côtés opposés d'un élément de construction, le gaz diffusera à travers les matériaux jusqu'à ce que l'égalisation des pressions partielles de ce gaz soit réalisée. La vitesse de la diffusion dépendra

de la différence des pressions partielles, de la longueur de la voie suivie par l'écoulement de ce gaz et de la perméabilité des matériaux traversés à l'égard de ce gaz.

## 6.4. Transport d'eau liquide

Les études sur le phénomène lié à la capillarité ont montré que si une des couches d'une paroi a atteint le taux d'humidité critique, il s'amorcera à partir de cette couche un transfert d'eau en phase liquide vers les couches les plus sèches. On remarquera que le transfert se fera pour un mur respirant de l'extérieur vers l'intérieur, c'est à dire à l'inverse du transfert de vapeur d'eau.

Pour le transport capillaire, *Krischer* a présenté une équation de diffusion qui a été reprise puis développée par les ingénieurs *Krus* et *Künzel* [26] et [33] :

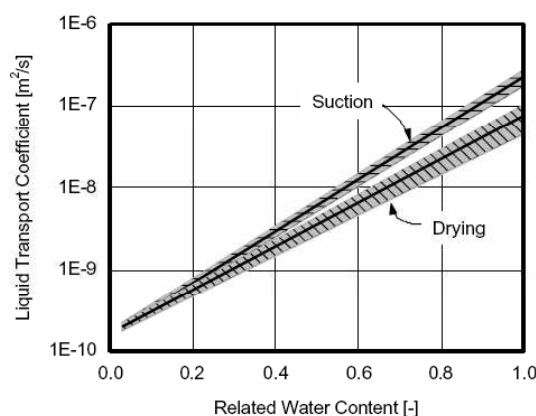
$$g_w = -D_w(w) \cdot \nabla w$$

avec

$g_w$ [kg/m <sup>2</sup> .s]	densité de flux de transport liquide
$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	coefficient de transport d'eau liquide
$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	teneur en eau

Ils ont mis en évidence deux mouvements de transport de liquide, l'absorption et la redistribution. Ce dernier procède beaucoup plus lentement que le transport par processus d'absorption, de sorte qu'il soit nécessaire d'appliquer différents coefficients liquides de transport (*figure 26*) :

- Le coefficient liquide de transport pour le processus d'aspiration  $D_{ws}$  décrit la prise capillaire de l'eau quand la surface imbibée est entièrement mouillée. Dans ce contexte de la physique du bâtiment, ceci décrit par exemple la pluie sur une façade.
- Le coefficient liquide de transport par séchage  $D_{ww}$  décrit la propagation de l'eau imbibée quand le mouillage est fini, l'eau présente dans le matériau commence à être redistribuée. Dans un composant du bâtiment, ceci correspond par exemple à la migration d'humidité en l'absence de pluie.



**Figure 26 :** teneur en eau par rapport aux coefficients de transport d'eau pour l'aspiration et le séchage.

On sait également que pour une humidité relative inférieure à 50%, les molécules d'eau sont tellement liées aux pores des murs que le transport liquide peut être exclu. Par contre au-dessus de 50%, la condensation capillaire se produit bien dans les micro-pores.

De plus la quantité d'eau admissible dans la couche isolante dépend de la nature de l'isolant et des effets que cette peau peut avoir sur ses caractéristiques. Pour la mesurer, le CSTB a considéré que la conductivité thermique utile des isolants sera peu influencée tant que le taux d'humidité de l'isolant ne dépasse pas 2% en volume.

## 6.5. Modélisation

Pour prévoir et suivre les mouvements hygrothermiques dans l'enveloppe d'un bâtiment, de nombreux outils de simulation sont développés et validés dans le monde au cours des dernières années afin de faciliter et réduire la complexité des mesures en laboratoire et expériences sur le terrain. Un des deux modèles développés par Kunzel [27] sous le nom de WUFI est disponible commercialement et largement utilisé en Allemagne, Europe de l'Est et Etats-Unis. Ce logiciel est assez complet mais certains phénomènes ne sont pas pris en considération : la circulation d'air par différence totale de pression n'est pas incluse, l'influence du givrage sur l'enthalpie et le transport liquide sont pour faciliter le calcul, sans effet sur la conductivité thermique. Le programme quand à lui, fonctionne autour de deux équations :

$$\frac{dw}{d\Phi} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\Phi} \cdot \nabla \Phi + \delta_p \nabla \cdot (\Phi p_{sat})) \quad \text{Transfert d'humidité}$$

$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla \cdot (\Phi p_{sat})) \quad \text{Transfert de chaleur}$$

avec

$\frac{dH}{dT} [J/m^3.K]$	capacité d'accumulation de chaleur du matériau humide
$\frac{dw}{d\Phi} [kg/m^3]$	capacité de stockage d'humidité du matériau
$D_{\Phi} [kg/m.s]$	coefficient de conduction de l'eau liquide
$H [J/m^3]$	enthalpie totale
$h_v [J/kg]$	chaleur latente de changement d'état
$\lambda [W/m.K]$	conductivité thermique
$p_{sat} [Pa]$	pression de vapeur saturante
$t [s]$	temps
$T [^{\circ}C]$	température
$w [kg/m^3]$	teneur en humidité
$\delta_p [kg/m.s.Pa]$	coefficient de diffusion de vapeur d'eau (perméabilité à la vapeur)
$\Phi [-]$	humidité relative

Le deuxième modèle numérique LATENITE-VTT développé par *Salaonvaara* est le plus complet des deux. Il a permis de résoudre le transfert de chaleur et de masse simultanément entre les enveloppes du bâtiment et l'air intérieur. Les vérifications prouvent que le modèle peut prévoir le transfert de la vapeur d'eau, du CO<sub>2</sub>, et du SF<sub>6</sub> (Hexafluorure de soufre : molécule traçante pour déterminer les mouvements et la vitesse de l'air dans les immeubles) entre l'enveloppe de bâtiment et l'air. Une simulation numérique réalisée dans une chambre à coucher d'un bâtiment en bois situé dans quatre pays européens (Finlande, Belgique, Allemagne, et Italie) afin d'étudier l'humidité, le confort, et la qualité d'air a permis de prouver que le transfert d'humidité entre l'air d'intérieur et la structure hygroscopique réduit de manière significative l'humidité d'intérieur maximale (jusqu'à 35% d'HR), le confort thermique (jusqu'à 10%) et la qualité d'intérieur d'air (jusqu'à 25%) [39].



## 6.6. Bilan

Ce chapitre a permis de présenter brièvement un système général d'équations pour la description d'un milieu poreux et le développement du processus hygrothermique. De même pour rendre plus facile les calculs, des logiciels sont développés afin d'obtenir des résultats fiables et sont une aide précieuse pour comprendre les processus hygrothermiques afin de pouvoir corriger les erreurs dès la conception. Cependant, l'interprétation de ces résultats exige une expérience pratique importante et ces applications ne sont qu'un outil simplifié qui ne permette pas de modéliser tous les phénomènes liés à une paroi respirante. En effet pour quantifier les effets de diffusion de gaz (air ou  $O_2$ ), tels que le transport des polluants de l'intérieur vers l'extérieur, ou inversement le renouvellement de l'oxygène nécessaire au bien être des personnes, aucune étude n'est effectuée sur la diffusion d'air à travers une paroi. Il est vrai que la notion de transfert d'air à travers un système respirant est récente et que des essais et des pré-études sont en cours, mais ces rapports ou thèses ne sont établis qu'à titre de supposition. D'autre part les fabricants intègrent dans leurs catalogues un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau ( $\mu$ ) qui vantent soi-disant les capacités respiratoires de leur produit. Mais aucun organisme officiel que ce soit en France ou dans le monde n'a établi de normes ou de lois pour définir les règles à respecter. Néanmoins plusieurs chercheurs et ingénieurs dont le précurseur *Imbabi* démontrent aujourd'hui que le phénomène existe bien et qu'en suivant quelques directives et formules, on peut obtenir un pouvoir respirant des parois.