

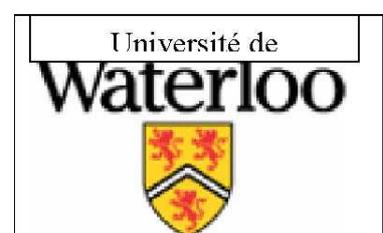
# **Mousse de Polyuréthane Giclée: La nécessité d'un retarde vapeur dans les murs résidentiels surélevés**

Rapport pour: L'Association Canadienne des Entrepreneurs en Mousse de Polyuréthane

**Groupe d'Ingénierie du Bâtiment, Université de Waterloo**

Professeur John Straube  
Rachel Smith & Graham Finch

Mars 2009



## Table des matières

<b>1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Historique .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Pare Vapeur et Pare Air .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Programme expérimental .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Mesures sur le terrain .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Préparatifs pour l'expérience.....</b>	<b>4</b>
2.2.1 Description du local de tests .....	4
2.2.2 Murs de tests .....	4
2.2.3 Propriétés du matériau de MPG .....	14
<b>2.3 Résultats .....</b>	<b>15</b>
2.3.1 Conditions environnantes.....	15
2.3.2 MPG à cellule fermée (Murs 7 & 8) .....	19
2.3.3 Performance des poteaux de cloison en bois .....	21
<b>2.4 Validation du modèle hygrothermique.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5 Conclusions et Recommandations.....</b>	<b>24</b>
<b>3 Tests de la chambre climatique.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Envergure et design expérimental.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 Préparatifs pour les tests.....</b>	<b>26</b>
3.3.1 Contenu d'humidité et mesure des masses .....	31
<b>3.4 Procédures expérimentales .....</b>	<b>33</b>
<b>3.5 Résultats .....</b>	<b>33</b>
.5.1 Mesures gravimétriques .....	33
<b>3.6 Contenu d'humidité et mesures .....</b>	<b>35</b>
<b>3.7 Analyses.....</b>	<b>37</b>
<b>4 Modélisation.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Approche de modélisation .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Climat extérieur .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 Climat intérieur .....</b>	<b>41</b>
<b>4.4 Procédures de simulation .....</b>	<b>43</b>
<b>5 Conclusions et Recommandations .....</b>	<b>46</b>
<b>6 Références .....</b>	<b>48</b>

# Mousse de Polyuréthane Giclée: La nécessité d'un pare vapeur dans les murs résidentiels surélevés

## Rapport du Groupe d'Ingénierie du Bâtiment, Université de Waterloo

John Straube, Rachel Smith, et Graham Finch

### Sommaire exécutif

La mousse de polyuréthane giclée (MPG) est un produit de mousse isolante de plastique isolante hermétique installée sur place par une application giclée. Le produit est utilisé dans les murs, planchers et toitures autant dans les constructions d'édifices commerciaux que résidentiels. Il y a deux grandes classes de MPG; celle à densité basse de  $8 \text{ kg/m}^3$  (0.5 pcf), c'est une mousse à cellules ouvertes et très flexible, et celle à densité haute de  $32 \text{ kg/m}^3$  (2 pcf) qui est une mousse rigide à cellules fermées. Cette étude couvre ces deux classes de mousse. Une question typique à laquelle font face les installateurs de la MPG, les designers d'édifices et les officiels du code du bâtiment, est le besoin d'un pare vapeur additionnel ou retardateur de vapeur. L'expérience de plusieurs entrepreneurs et de quelques consultants suggère que des couches à basse perméabilité spéciale, tel que le polyuréthane, sont rarement nécessaires dans plusieurs types de murs. La théorie indique que la mousse à cellules fermées est suffisamment imperméable à la vapeur pour contrôler la diffusion de condensation et que les applications de mousse à cellules ouvertes de densité basse pourraient avoir besoin de contrôle additionnel de la diffusion de vapeur dans certains environnements extrêmes. Cependant, le besoin et le type de contrôle par des couches additionnelles demeurent incertains pour plusieurs. Un projet de recherche a été initié afin trouver les réponses à ces questions. L'objectif du projet était de fournir des recommandations basées sur des preuves scientifiques solides, de la nécessité d'un contrôle additionnel de la vapeur concernant les deux classes de MPG installées dans des murs avec encadrements de bois d'une grande variété de types d'édifices d'occupation résidentielle ou commerciale et de conditions climatiques froides. Une combinaison de tests à pleine échelle sur le terrain exposés aux conditions naturelles, des mesures prélevées dans une chambre climatique et des modèles par ordinateurs hygrothermiques ont été appliqués. Le Code National Canadien du Bâtiment spécifie que les pare vapeur ne sont pas requis « lorsque l'on peut faire la démonstration que la diffusion de vapeur non contrôlée n'aura pas d'effets nocifs sur, (a) la santé et la sécurité des usagers de l'édifice, sur (b) l'utilisation prévue de l'édifice ou sur (c) l'opération des services de l'édifice ». La recherche a démontré l'habileté des murs avec encadrements de bois isolés avec la mousse de polyuréthane giclée, avec ou sans couches additionnelles de pare vapeur, de satisfaire à ces exigences.

Plus spécifiquement, la recherche a démontré (\*) que:

- Les cellules fermées (environ 2 livres de densité ou plus par pied cube) de mousse appliquée à plus 2" d'épaisseur (50 mm) contrôlera la diffusion de vapeur à des niveaux sécuritaires dans tous les types de climats jusqu'à 10000 DJC ainsi que l'humidité relative dans des températures intérieures pendant l'hiver jusqu'à et pouvant dépasser 50%HR. Cette épaisseur augmente également le niveau de contrôle de la diffusion. Le contrôle de la diffusion est équivalent aux murs munis des traditionnelles nattes de fibre de verre et de polyéthylène.

**(\*)Quant aux murs extérieurs recouverts d'une épaisseur de couches de blindage, de membranes, de revêtements et d'autres couches qui offrent une perméabilité à plus d'environ 60 ng/Pa s m<sup>2</sup>,**

- La mousse à cellules ouvertes (1/2 livre par pied cube de densité) peut contrôler la diffusion dans des climats qui ne sont pas trop froids (exemple, sous 4500 DJC) et alors que l'humidité relative de l'intérieur en hiver est contrôlée par une ventilation appropriée à environ moins 40%. La mousse à cellules ouvertes ne dispose pas suffisamment de contrôle de la vapeur pour assurer son utilisation dans des climats très froids (4500 DJC à 5000 DJC) à moins que l'humidité relative intérieure en hiver soit strictement contrôlée (à environ moins 30%HR).
- Pour l'un de ces deux types de mousse, l'encadrement de bois fournit suffisamment de résistance à la vapeur inhérente pour maintenir le contenu d'humidité à un niveau sécuritaire et ce même dans des températures extérieures très froides (10 000 DJC) et des conditions intérieures très humides (50%HR en hiver).

Étant donné que pour tous les murs construits avec toutes sortes de matériaux, un assemblage de pare air fonctionnel doit exister, ainsi qu'un contrôle contre la pluie, le feu, une suffisance structurale, etc.

Le programme du modèle hygrothermique 1-D " WUFI Pro 3.3" a été validé comme un outil efficace et précis pour prédire le contenu d'humidité du revêtement extérieur dans les tests sur le terrain. On peut l'utiliser pour prédire la performance de d'autres assemblages de murs dans d'autres climats si l'on porte attention à la définition et aux propriétés des matériaux et des conditions environnantes. Les tests de diffusion de vapeur de la chambre climatique furent effectués sur une gamme de produits différents sous un gradient de température. Ces tests ont confirmé la performance notée lors des tests sur le terrain et ont démontré que les différents produits commerciaux de la même classe (cellules fermées ou cellules ouvertes) performaient de façons très similaires. Une observation intéressante notée dans les tests de la chambre climatique pour le sous-système des matériaux est que le HCFC -245 mousse giclée se comportait essentiellement de la même façon que les produits antérieurs "HCFC-141b". La perméabilité à la vapeur de la nouvelle génération semble légèrement moindre que la précédente.

### Moisture Content (MC) in Wood Exterior Sheathing Subjected to Various Canadian Climates and Interior Relative Humidities

Chart values are %MC by dry mass of wood and represent a predicted maximum annual value

		Vancouver			Toronto			Ottawa			Calgary			Winnipeg			Yellowknife			Inuvik		
		HDD 3000			HDD 4000			HDD 4500			HDD 5000			HDD 6000			HDD 8000			HDD 10000		
		Low RH 30/55%	Med. RH 40/60%	High RH 50%	Low RH 30/55%	Med. RH 40/60%	High RH 50%	Low RH 30/55%	Med. RH 40/60%	High RH 50%	Low RH 30/55%	Med. RH 40/60%	High RH 50%	Low RH 20/50%	Med. RH 30/55%	High RH 50%	Low RH 20/50%	Med. RH 30/55%	High RH 50%	Low RH 20/50%	Med. RH 30/55%	High RH 50%
Fiberglass (FG)	Open Cell	12%	12%	11%	11%	11%	11%	10%	10%	10%	9%	9%	9%	10%	10%	10%	11%	11%	11%	10%	10%	10%
	Open Cell	14%	18%	21%	18%	25%	30%	21%	27%	33%	22%	28%	35%	28%	37%	43%	27%	37%	43%	35%	43%	46%
	Closed Cell <sup>3</sup>	14%	15%	17%	14%	18%	21%	16%	20%	23%	16%	20%	23%	16%	21%	26%	20%	25%	27%	24%	28%	29%
Spray Polyurethane Foam (SPF)	2" SPF	13%	14%	14%	12%	13%	13%	11%	12%	12%	10%	11%	11%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	12%	12%	12%
	+3.5"FG <sup>1</sup>	12%	13%	13%	11%	12%	13%	10%	12%	12%	10%	11%	12%	10%	11%	14%	12%	13%	14%	13%	14%	14%
	3.5" SPF in 3.5/5.5"	12%	13%	13%	12%	12%	12%	10%	11%	11%	9%	10%	10%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
Wood Stud <sup>2</sup>	3.5" or 5.5"	7%	7%	7%	7%	7%	7%	5%	6%	6%	5%	5%	5%	6%	7%	7%	7%	7%	7%	5%	5%	6%
Other Applicable Locations (Heating Degree Days below 18°C)		Vancouver (2926) Abbotsford (2881) Victoria (3040)			Windsor (3524) Niagara Falls (3661) Kelowna (3869) Ostawa (3917) Hamilton (4012) Halifax (4030) London (4057) Toronto (4065)			Kitchener-Valerico (4288) Kingston (4289) Montreal (4518) Moncton (4585) Ottawa (4602) Charlottetown (4715)			St. John's (4881) Trois-Rivières (4929) Calgary (5108) Prince George (5132) Sherbrooke (5151) Québec City (5202) Sudbury (5343)			Regina (5650) Edmonton (5708) Thunder Bay (5717) Winnipeg (5777) Saskatoon (5852) Whitehorse (6811)			Yellowknife (8256)			Inuvik (9757) Igaliit (10117) Resolute (12526)		

Résultats sommaires de la nécessité d'un pare-vapeur

**General Notes:**

- a. Walls are residential wood frame with light-colored, thin cladding facing north; this is a worse-case scenario for cold-weather diffusion wetting
- b. Results are for OSB sheathing. Plywood sheathing values will be equal or lower. OSB permeance is always over 60 ng/Pa·s·m<sup>2</sup> in exterior sheathing applications.
- c. Sheathings of DensGlas, FiberBoard, and Gypsum Board are all very vapor permeable and hence will have lower moisture contents
- d. Thicker foam will always result in lower wintertime sheathing moisture contents
- e. Effective Air Barrier is assumed to be installed, as is proper rain control

**Specific notes:**

- 1. Apply SPF directly onto back of exterior sheathing
- 2. MC values are for outer 1/2" of wood stud
- 3. Closed Cell SPF should be applied in total thicknesses of more than 2" (50 mm), usually in lifts of no more than 2" (50 mm)

# 1 Introduction

La mousse de polyuréthane giclée (MPG) est un produit isolant de mousse de plastique hermétique installée sur place par une application giclée. Le produit est utilisé dans les murs, planchers et toitures autant dans les constructions d'édifices commerciaux que résidentiels. Il y a deux grandes classes de MPG; celle à densité basse de  $8 \text{ kg/m}^3$  (0.5 pcf), c'est une mousse à cellules ouvertes et très flexible, et celle à densité haute de  $32 \text{ kg/m}^3$  (2 pcf) qui est une mousse rigide à cellules fermées. Ces deux classes de mousse ont été analysées dans la présente étude.

Une question typique à laquelle font face les installateurs de la MPG, les designers d'édifices et le officiels du code du bâtiment, est le besoin d'un pare vapeur additionnel ou retardateur de vapeur. L'expérience de plusieurs entrepreneurs et de quelques consultants suggère que des couches à basse perméabilité spéciale, tel que le polyuréthane, sont rarement nécessaires dans plusieurs types de murs. La théorie indique que la mousse à cellules fermées est suffisamment imperméable à la vapeur pour contrôler la diffusion de condensation et que les applications de mousse à cellules ouvertes de densité basse pourraient avoir besoin de contrôle additionnel de la diffusion de vapeur dans certains environnements extrêmes. Cependant, le besoin et le type de contrôle par des couches additionnelles demeurent incertains pour plusieurs constructeurs, designers et officiels du bâtiment.

L'objectif de ce projet de recherche est de fournir des recommandations basées sur des preuves scientifiques solides, de la nécessité de contrôle additionnel de la vapeur concernant les deux classes de MPG installées dans des murs avec encadrements de bois d'une grande variété de types d'édifices d'occupation résidentielle ou commerciale et de conditions climatiques froides.

## 1.1 Historique

Dans l'industrie de la construction, on a bien compris que d'augmenter l'isolation est un moyen économique de réduire la consommation énergétique étendue sur la vie utile de la structure, tout en réduisant l'impact environnemental et économique dû à la consommation d'énergie par l'opération des systèmes de l'édifice. Cependant, ce qui n'a pas été aussi bien compris, c'est que la quantité d'énergie économisée dépend du choix du système d'isolation, de quelle façon celui-ci est installé et où il est situé dans l'assemblage de l'édifice. Un design qui laisse à désirer et une main d'œuvre non qualifiée peuvent réduire l'efficacité de l'isolation et produire une enceinte qui transfère beaucoup plus de chaleur que ce qui est prévu dans la valeur théorique du produit isolant. De plus, si les faiblesses de l'enceinte telles que les ponts thermiques ne sont pas traitées de façon appropriée, le transfert de la chaleur contournera l'isolation, ce qui réduira l'efficacité de la couche de contrôle de la chaleur dans son ensemble.

Les types de matériaux isolants les plus disponibles sont : la fibre de verre, la laine minérale, la cellulose et les mousses de plastiques. Chaque classe de produit comporte des caractéristiques différentes, telles : la résistance au feu, les coûts, la perméabilité à la vapeur, la facilité d'installation, etc. L'une des caractéristiques la plus souvent notée est celle de la résistance au flux de la chaleur par unité d'épaisseur.

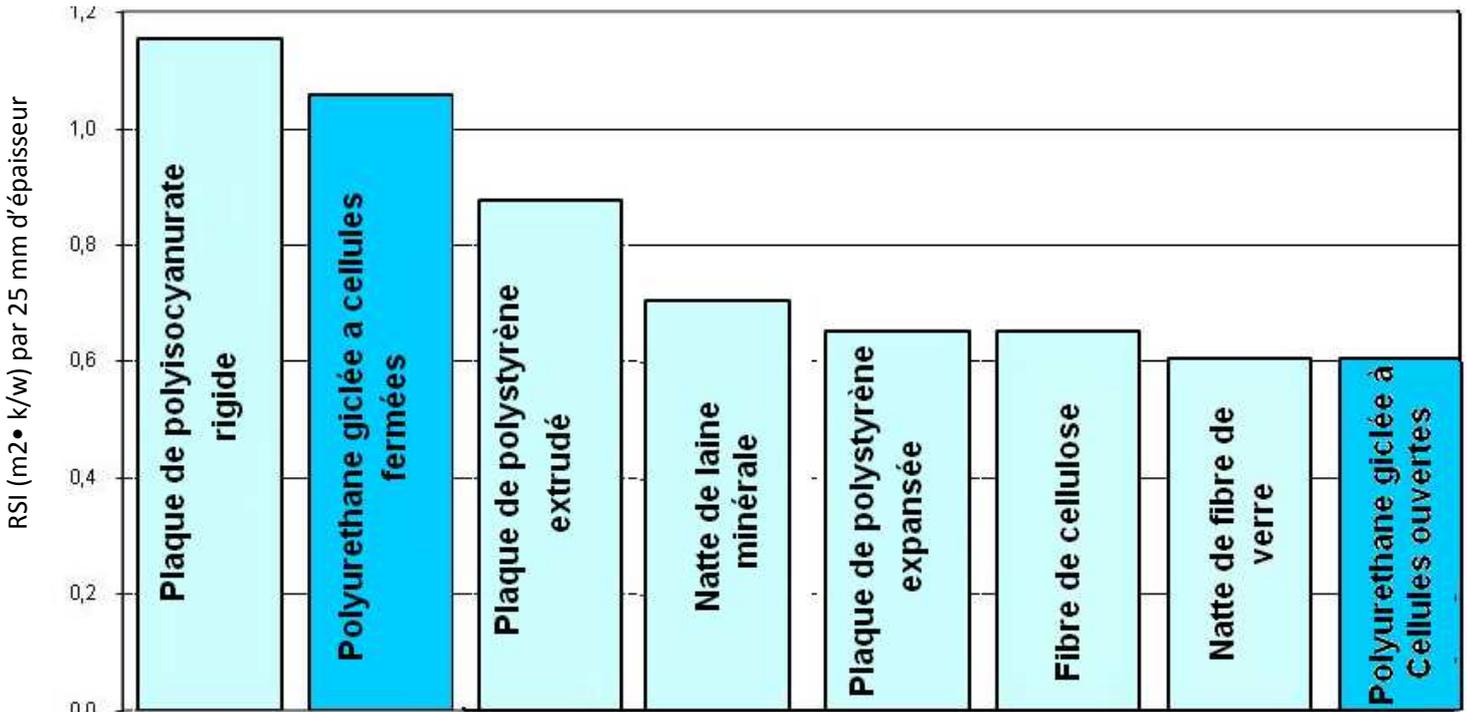


Schéma 1.1: Valeurs RSI moyennes des types d'isolants communs (Straube & Burnett 2005)  
RSI [m²,K/W] par 25mm d'épaisseur

Quelques matériaux isolants disposent de l'avantage additionnel de fournir une résistance significative à l'infiltration d'air ou à la diffusion de la vapeur ou des deux à la fois. Par exemple, certains types de mousse de plastique ont une grande résistance au flux de la chaleur, de l'air et de la vapeur, ce qui fait qu'elles ont le potentiel de remplir la fonction de couches de contrôle de la chaleur, de l'air et de l'humidité. À l'autre bout du spectre, un matériau comme la natte de fibre de verre offre une bonne performance à titre de couche de contrôle de la chaleur seulement. Dans une enceinte qui utilise la fibre de verre à titre de couche de contrôle de la chaleur, les couches de contrôle de l'air et de l'humidité doivent faire l'objet d'un autre design et être composées de façon indépendantes avec d'autres matériaux.

La mousse de polyuréthane giclée (MPG) est un type de mousse de plastique qui suscite un intérêt marqué dans le design des enceintes d'édifices car elle offre une très bonne performance à titre de couches de contrôle multiples. La MPG fournit l'une des plus grande résistance à la chaleur de tous les produits isolants généralement disponibles. La mousse est créée et appliquée sur les lieux à partir du mélange de deux composés liquides alors que ceux-ci sont giclés d'un fusil à pression. Les deux liquides subissent une réaction chimique qui produit des bulles, le produit prend de l'expansion et le liquide est transformé en plastique cellulaire. L'avantage du processus de l'application sur le chantier consiste en ce que le liquide pénètre dans les fissures, les trous et les cavités irrégulières donc tous ces endroits difficiles d'accès sont remplis au fur et à mesure que le produit prend son expansion. Après avoir séché, la MPG crée une couche semi-rigide thermique et pare air, lisse et sans démarcations. Les mousses giclées de densité moyenne et haute fournissent aussi considérablement plus de résistance à la vapeur que les autres matériaux isolants traditionnels. Ceci aura pour résultat que dans certaines applications, la MPG de densité moyenne et haute pourra servir de couche de contrôle de la vapeur. Malheureusement, il existe souvent une confusion de la part des designers,

des constructeurs et des officiels du code à savoir si et quand ces situations sont présentes. Si ces situations pouvaient être identifiées et codifiées, l'industrie de la construction pourrait bénéficier de l'élimination d'une étape qui demande temps et argent lors d'une construction.

## 1.2 Pare vapeur et pare air

L'air possède une capacité limitée à contenir la vapeur d'eau: sa capacité maximum diminue considérablement au fur et à mesure que la température baisse. La condensation se produit lorsque la capacité de l'air est dépassée sur une surface et la vapeur d'eau se change en liquide. La vapeur d'eau se transforme en condensation sur des surfaces potentielles par deux mécanismes :

1. la diffusion de la vapeur, le flux de la vapeur seulement des régions qui ont un contenu élevé de vapeur vers les régions où le contenu de vapeur est plus bas, et
2. la convection (communément appelé déplacement d'air), le flux de l'air des régions de haute pression vers les régions de basse pression qui transporte avec elle la vapeur d'eau.

Les pare vapeur ou retardateurs de la diffusion de vapeur s'adressent seulement au flux de vapeur par diffusion. Les pare air contrôlent le flux de vapeur par le flux de l'air.

Le flux d'air transporte beaucoup plus de vapeur que la diffusion dans la plupart des cas. Les systèmes de pare air sont toujours requis dans les édifices (et ils sont aussi requis par les codes du bâtiment canadiens), ils sont souvent fournis en polythène de 6 millimètres hermétiques, continus et supportés, en cloisons sèches hermétiques et continues, ou en produits de membrane pare air hermétiques et continues, etc. Les pare air assurent aussi une bonne performance thermique, réduisent les transmissions de bruit et aident à assurer une bonne qualité de l'air à l'intérieur. Les deux types de mousse de polyuréthane giclée peuvent faire partie d'un système de pare air. La continuité est obligatoire lorsque la MPG n'est pas complètement collée à un substrat hermétique. La mousse giclée entre les poteaux de cloison fournit un excellent pare air. Cependant, les joints de bois contre bois dans les poteaux de cloison doubles, les lisses d'assises contre le papier goudronné du plancher ainsi que les joints autour des fenêtres exigent d'être scellés afin de fournir un pare air continu.

La diffusion de vapeur peut transporter une quantité suffisante de vapeur pour produire une condensation dans certains cas. Afin de contrôler la quantité de vapeur transportée par la diffusion, les pare vapeur (exemple, le polythène de 6 millimètres) sont requis. Le Code National du Bâtiment du Canada spécifie que les pare vapeur ne sont pas requis lorsque:

“On peut démontrer que la diffusion de la vapeur non contrôlée n'aura pas d'effets négatifs sur, (a) la santé et la sécurité des usagers de l'édifice, (b) l'utilisation prévue de l'édifice, ou (c) l'opération des services de l'édifice.”

La présente recherche a vérifié l'habileté qu'ont les murs typiques avec encadrement de bois à satisfaire à ces exigences, lorsqu'on utilise l'isolation de mousse de polyuréthane giclée avec ou sans les couches additionnelles de pare vapeur. Dans tous les cas, un système de pare air fonctionnel fut fourni (sous la forme de cloison sèche hermétique ou d'une chaîne continue de MPG et de bois),

car ceci est une exigence dans tous les édifices.

### 1.3 Programme expérimental

La recherche était constituée de trois phases :

- Mesurer la performance de la MPG sur le terrain ainsi que celle des murs isolés avec des nattes de fibre de verre dans un vrai mur exposé à l'environnement du Sud Ouest de l'Ontario. Le modèle ordinateur a été validé dans cette phase.
- Mesurer le degré d'humidité créé par la diffusion de la vapeur dans une chambre climatique dans des conditions stables. Différentes marques de MPG ont été vérifiées dans cette phase.
- Modélisation par ordinateur de la performance sur un grand éventail de conditions climatiques canadiennes, d'occupations intérieures et de matériaux.

Chacune des phases de la recherche est décrite dans les chapitres suivants.

## 2 Mesures sur le terrain

### 2.1 Introduction

Ce chapitre présente les préparatifs et les résultats d'une vérification pleine échelle sur le terrain de la nécessité de couches additionnelles de retarder la vapeur dans les deux types de MPG, dans les murs avec encadrements. Huit murs de tests furent construits et installés à l'intérieur du local de tests du BEGHUT de l'Université de Waterloo, lequel est maintenu à un niveau d'humidité relative intérieure élevé, (50%RH). Le contenu d'humidité du revêtement extérieur en bois et des poteaux de cloison en bois a été surveillé pour une période de plus de deux ans et les résultats ont été utilisés pour en déterminer la performance.

Un modèle hygrothermique a ensuite été produit et comparé aux résultats observés afin de valider le modèle. En utilisant le modèle hygrothermique validé, les recommandations pour l'utilisation de couches additionnelles de contrôle de la vapeur en fonction du type de MPG, de l'assemblage des murs et du climat (intérieur et extérieur) font l'objet de discussion.

### 2.2 Préparatifs expérimentaux

#### 2.2.1 Description du local de test

Le BEGHUT de l'Université de Waterloo, situé à Waterloo, Ontario, est conçu pour la vérification de la performance des assemblages de murs pleine échelle dans des conditions naturelles dans ce climat. Ce local est constamment maintenu à 20°C et 50% HR l'année durant. Il s'agit d'un niveau élevé pour un bureau ou un édifice résidentiel dans des températures froides, mais c'est représentatif des musées, des hôpitaux et de piscines intérieures. Les niveaux d'humidité relative intérieure pour les maisons dans cette zone climatique sont typiquement de l'ordre de 30 à 40% pendant l'hiver et de 50 à 60% pendant l'été.

**2.2.2 Les murs de test**

Les quatre types d'assemblages (nord et sud sont identiques; huit murs de test de 2' de largeur totale) ont été installés en novembre 2005 dans le local de test de l'Université de Waterloo (voir le tableau 2.1). Une grande attention fut portée à l'utilisation des techniques développées depuis les 20 dernières années afin de pouvoir isoler la performance individuelle de chaque panneau de tests voisins les uns des autres. Chaque panneau de test est entouré par un encadrement isolé, hermétique, imperméable à l'eau et à la vapeur (voir le schéma 2.3). Des illustrations du local de test et de la disposition des fentes qui servent à recevoir les panneaux typiques de 4' x 8' amovibles sont démontrées au schéma 2.2.

<u>Assemblage N6/S6</u>	<u>Assemblage N7/S7</u>	<u>Assemblage N8/S8</u>	<u>Assemblage N9/S9</u>
Brique	Brique	Brique	Brique
Cavité ventilée (11/2")	Cavité ventilée (11/2")	Cavité ventilée (11/2")	Cavité ventilée (11/2")
Barrière résistante à l'eau (Tyvek)	Barrière résistante à l'eau (Tyvek)	Barrière résistante à l'eau (Tyvek)	2" de 2 pcf mousse de mousse de polyuréthane giclée à cellule fermée (Couleur orange pâle)
1/2" recouvrement OSB	1/2" recouvrement OSB	1/2" recouvrement OSB	1/2" recouvrement de gypse avec façade de fibre de verre
Poteaux de cloison 2"x6" remplis de 5 1/2" de 1/2pcf de mousse de polyuréthane giclée à cellule ouverte (couleur beige)	Poteaux de cloison 2"x6" remplis de 4 1/2" à 5 1/2" de 2 pcf de mousse de polyuréthane giclée à cellule fermée (couleur vert pâle)	Poteaux de cloison 2"x6" remplis de 4 1/2" à 5 1/2" de 2 pcf mousse de polyuréthane giclée à cellule fermée (couleur orange pâle)	Poteaux de cloison 2"x4" en acier remplis avec des nattes isolantes de fibre de verre R 12
1/2" cloison sèche	1/2" cloison sèche	1/2" cloison sèche	1/2" cloison sèche
1 couche d'apprêt et 2 couches de peinture au latex	1 couche d'apprêt et 2 couches de peinture au latex	1 couche d'apprêt et 2 couches de peinture au latex	1 couche d'apprêt et 2 couches de peinture au latex

**Tableau 2.1: Assemblages de murs à pleine échelle (de l'extérieur à l'intérieur)**

Pour ce projet, la configuration typique du mur du BEGHUT a été modifiée. Deux murs de 4' de largeur ont été utilisés, quatre murs de 2' de largeur ont été utilisés dans ce projet. Tel que démontré dans le schéma 2.1, les murs de tests de MPG sont situés aux fentes des panneaux 6 et 7 sur le côté nord et 20 et 21 sur le côté sud. Il est important de noter que pour ce projet MPG, la convention d'attribution de noms pour les murs est : Nord et Sud sont les murs 6, 7, 8 et 9. Les murs de 1 à 5 sont utilisés pour d'autres expériences mais ils incluent aussi quatre murs de données qui furent utilisés pour comparer les murs de MPG avec des constructions plus traditionnelles. Les murs de données sont construits avec de l'encadrement de bois 2x6 similaires, mais ils sont isolés avec des nattes de fibre de verre et le contrôle de la vapeur est obtenu avec et sans pare vapeur de polyéthylène et des cloisons sèches peintes. Les murs de données furent installés dans les orientations nord et sud approximativement au même moment que les murs de MPG. Tous les encadrements et l'OSB étaient du même type et provenaient du même fournisseur.

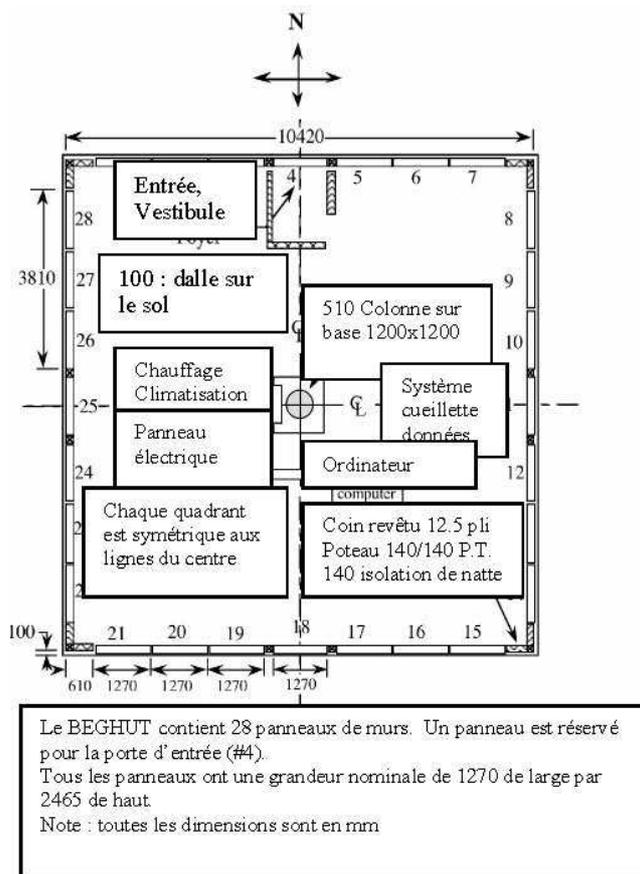


Schéma 2.1: Vue du plan du BEGHut, qui montre l'orientation et où sont situés les panneaux

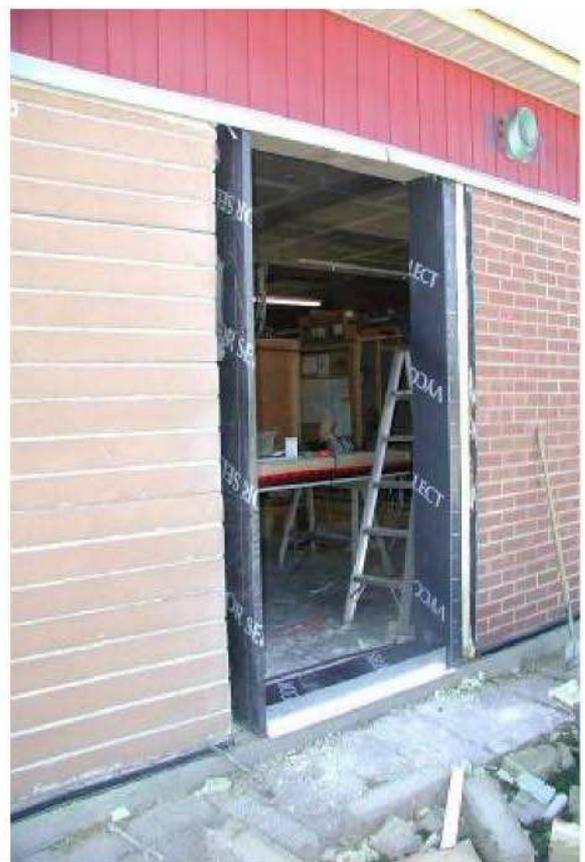


Schéma 2.2: Périmètre d'ouverture pour les murs de test amovibles

La dimension totale des quatre murs de MPG est approximativement de 2400 mm sur la largeur par 2400 mm sur la hauteur. Chaque mur de test est approximativement 600 mm sur la hauteur avec des poteaux de cloison en bois espacés au 400 mm centre. Le mur de parement de brique est ventilé par 10 x 80 mm de joints ouverts à la base et au sommet du mur espacés à toutes les deux briques (pour un total de 5 événements à la base et 5 événements au sommet). Les techniques d'herméticité furent utilisées lors de la construction afin de s'assurer qu'un déplacement d'air accidentel ne vienne pas causer un impact sur les résultats. Les deux types de MPG sont résistants au flux de l'air, et font partie du système de pare air dans ces murs. Des capteurs mesurent la température, l'humidité relative et le contenu d'humidité du bois; de plus, les conditions intérieures et extérieures du local de test sont mesurées, incluant les températures, les humidités relatives, la vitesse et la direction du vent, les radiations solaires et les quantités de pluie tombée. La même disposition des capteurs fut utilisée dans tous les murs (autant que possible), de façon à permettre des comparaisons directes entre les murs. Tous les capteurs démontrés dans les schémas suivants sont installés à la ligne verticale du centre du mur; une section de ce plan est utilisée pour montrer les emplacements des capteurs.

Les détails de la disposition des capteurs et de la construction du mur sont montrés au schéma 2.3 au Schéma 2.9. Veuillez noter que ces schémas n'incluent pas le solin ni les détails d'herméticité du système des assemblages de murs.

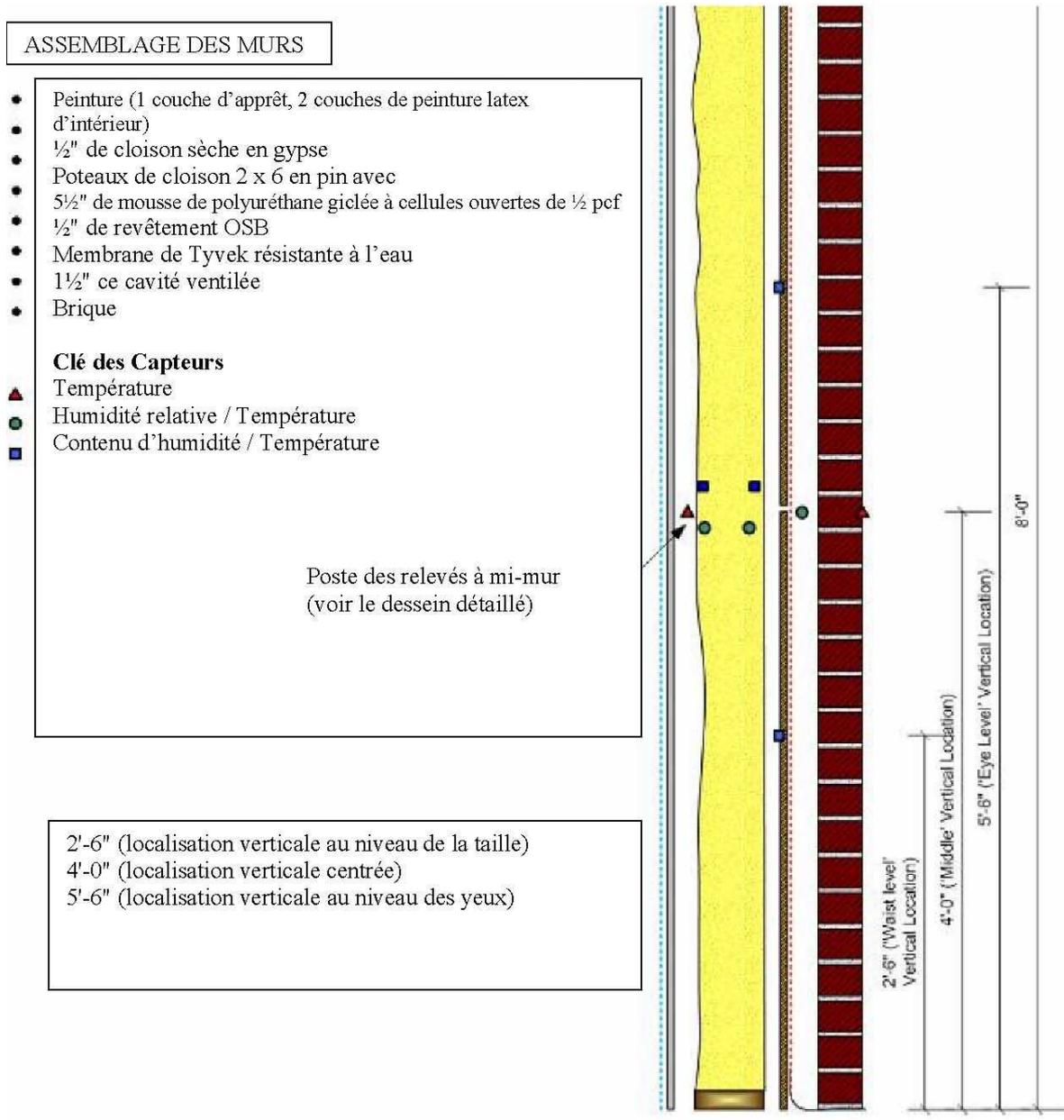


Schéma 2.3: Assemblage du mur 6 (1/2 pcf de MPG à cellules ouvertes)

Mur 7 : Poteaux de cloison en bois – mousse de polyuréthane giclée à cellules fermées 2 pcf

Assemblage du mur :

- Peinture (1 couche d'apprêt, 2 couches de peinture latex intérieur
- ½" de cloison sèche en gypse
- Poteaux de cloison 2 x 6 en pin avec
- 4½" - 5½" de mousse de polyuréthane giclée à cellules fermées de ½ pcf
- ½" de revêtement OSB
- Membrane de Tyvek résistante à l'eau
- 1½" de cavité ventilée
- Brique

**Clé des Capteurs**

- ▲ Température
- Humidité relative / Température
- Contenu d'humidité / Température

Poste des relevés à mi-mur  
(voir le dessein détaillé)

2'-6" (localisation verticale au niveau de la taille)  
4'-0" (localisation verticale centrée)  
5'-6" (localisation verticale au niveau des yeux)

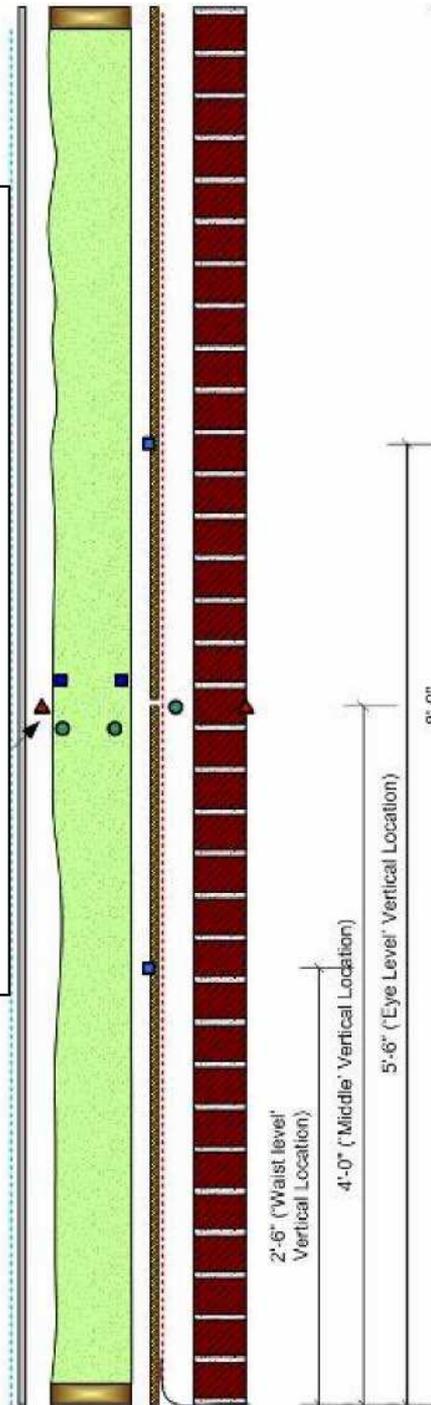


Schéma 2.4: Assemblage du mur 7 (2 pcf de MPG à cellules fermées – vert pâle)

Mur 8 : Poteaux de cloison en bois – mousse de polyuréthane giclée à cellules fermées 2 pcf

Assemblage du mur :

- Peinture (1 couche d'apprêt, 2 couches de peinture latex intérieur
- ½" de cloison sèche en gypse
- Poteaux de cloison 2 x 6 en pin avec
- 4½" - 5½" de mousse de polyuréthane giclée à cellules fermées de ½ pcf
- ½" de revêtement OSB
- Membrane de Tyvek résistante à l'eau
- 1½" ce cavité ventilée
- Brique

**Clé des Capteurs**

- ▲ Température
- Humidité relative / Température
- Contenu d'humidité / Température

Poste des relevés à mi-mur  
(voir le dessin détaillé)

2'-6" (localisation verticale au niveau de la taille)  
 4'-0" (localisation verticale centrée)  
 5'-6" (localisation verticale au niveau des yeux)

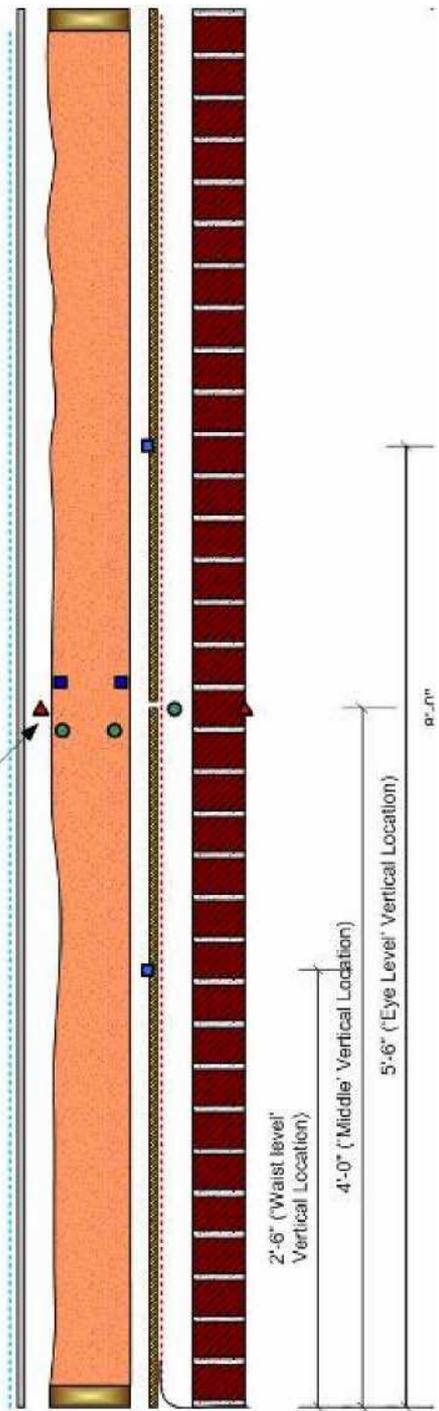


Schéma 2.5: Assemblage du mur 8 (2 pcf de MPG à cellules fermées – rouge pâle)

Mur 9 : Poteaux de cloison en acier – mousse de polyuréthane giclée à cellules fermées 2 pcf sur l'extérieur  
 Assemblage du mur

- Peinture (1 couche d'apprêt, 2 couches de peinture latex intérieure)
  - ½" de cloison sèche en gypse
  - Poteau d'acier de faible épaisseur 2 x 4 avec
  - 3½" d'isolation de natte de fibres de verre (R-12)
  - ½" revêtement de gypse extérieur avec face de fibres de verre
  - 2" de mousse de polyuréthane giclée 2 pcf à cellules fermées
  - 1½" de cavité ventilée
  - Brique
  -
- Clé des Capteurs**
- ▲ **Température**
  - **Humidité relative / Température**
  - **Contenu d'humidité / Température**
  - ▣ **Bloc de contenu d'humidité**
- Poste des relevés à mi-mur  
 (voir le dessin détaillé)

4'-0" (localisation verticale centrée)

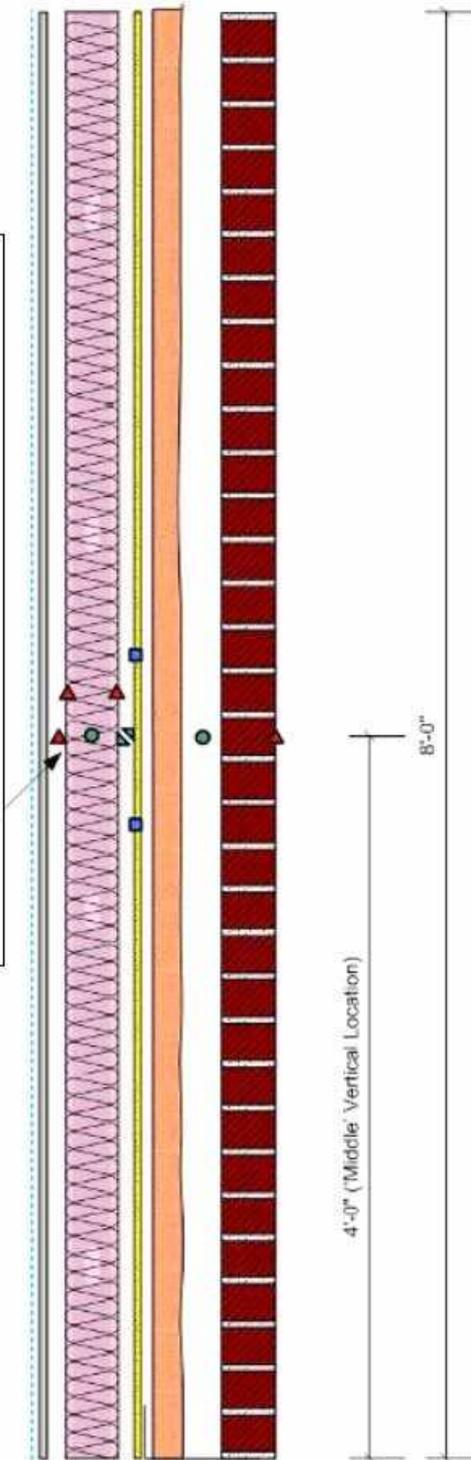


Schéma 2.6: Assemblage du mur 9 (Poteaux de cloison en acier/Isolation de Natte de fibre de verre, 2 pcf extérieur à cellules fermées – rouge pale)

Légende des capteurs :  
 Température  
 Humidité relative/température  
 Contenu d'humidité/température  
 Contenu d'humidité/température mince  
 Réglette de raccordement

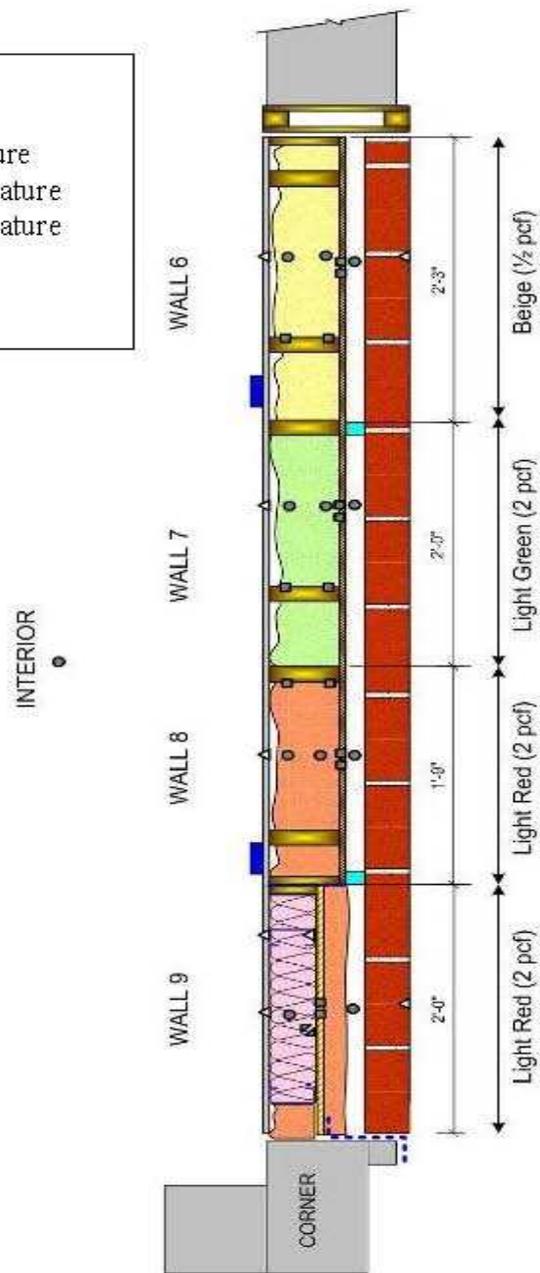
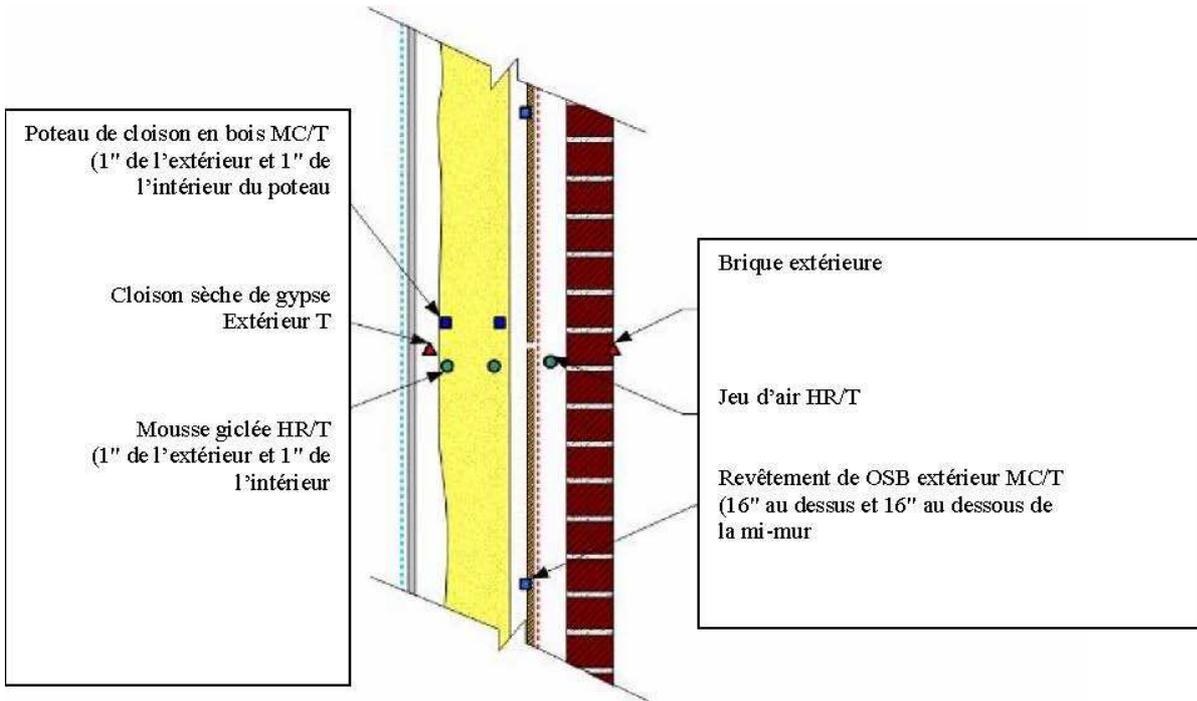


Schéma 2.7: Assemblage de l'installation de mur du BEGhut (vue du plan)



**Schéma 2.8: Assemblage de murs avec poteaux de cloison en bois (Murs 6, 7, 8) vue rapprochée des capteurs**

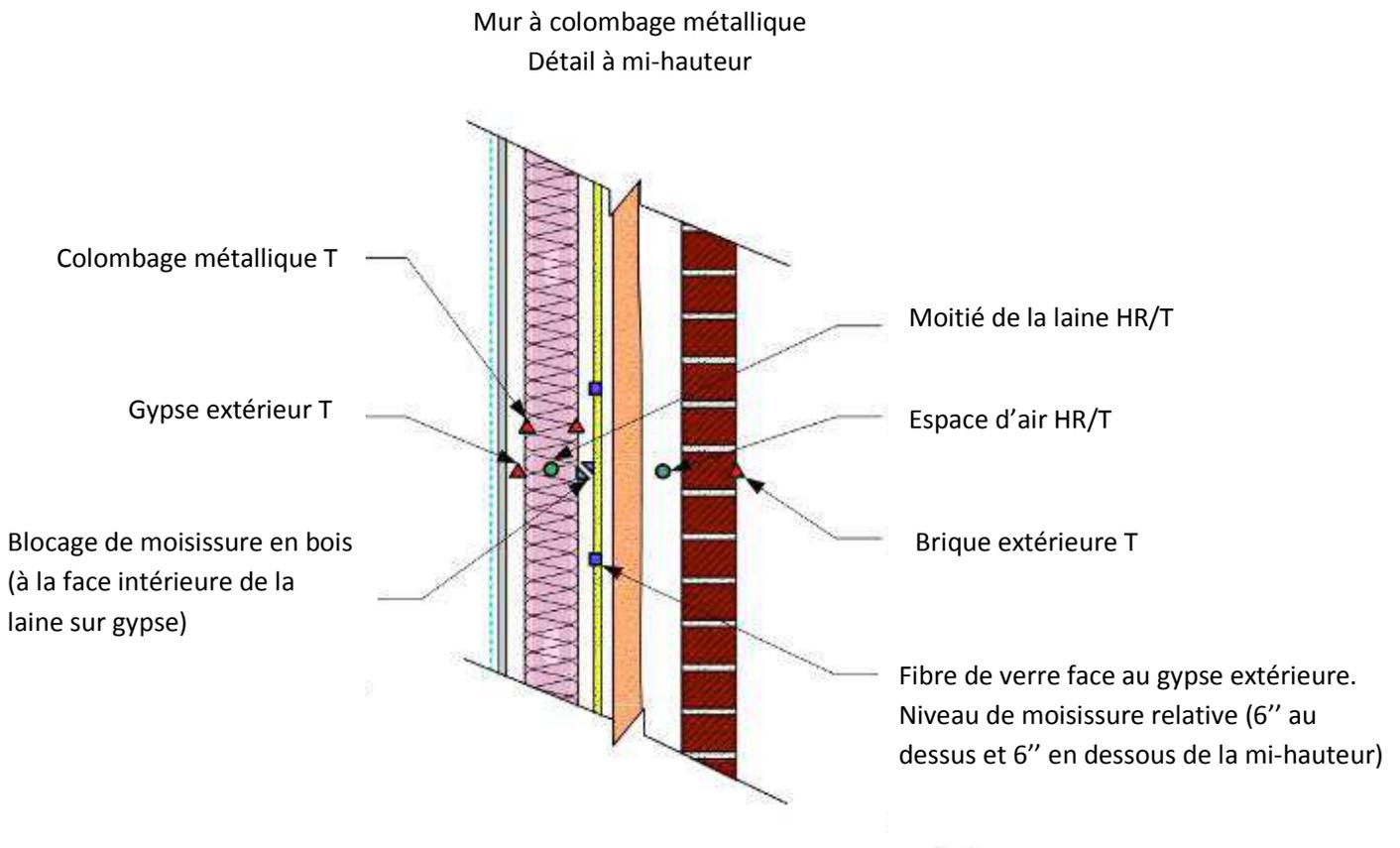
La température extérieure, l'humidité relative et les conditions environnementales incluant les quantités de pluie tombée, la vitesse et la direction du vent et les radiations solaires sont mesurés à la toiture du BEGHut et ce sont des mesures usuelles pour tous les projets du BEGHut.

Des capteurs de température, d'humidité relative et du contenu d'humidité du bois furent installés dans les panneaux de test le long de la ligne du centre des cavités des poteaux de cloison. Des capteurs furent installés à mi-mur, approximativement à 1200 mm du niveau du plancher. La même disposition de capteurs fut utilisée dans tous les murs de façon à permettre des comparaisons directes entre les assemblages. La température des briques est mesurée à la face extérieure; les capteurs sont incrustés dans le mortier.

Les conditions de l'air sont mesurées avec des capteurs à la fois de température et d'humidité relative; les capteurs sont suspendus librement dans l'air des cavités des cloisons. La température dans les cavités des cloisons ainsi que l'humidité relative sont mesurées à deux endroits incrustés dans la MPG; situés à 25 mm du revêtement extérieur et à 25 mm de la cloison sèche de l'intérieur. Dans les murs avec poteaux de cloison de bois (6, 7, et 8) le contenu d'humidité et les températures sont mesurés du côté intérieur et extérieur des poteaux de cloison en bois (approximativement 10 mm ou 3/8" des faces); ces mesures peuvent être utilisées pour révéler les poussées d'humidité vers l'intérieur ou vers l'extérieur de l'assemblage et démontrer que les poteaux de bois sont résistants à la vapeur.

Le contenu d'humidité et la température du revêtement en bois sont mesurés dans le revêtement OSB extérieur (murs 6, 7 et 8). Les capteurs sont situés à 400 mm (16") au dessus et à 400 mm (16") au dessous de mi-mur, "au niveau des yeux" et "de la taille" pour en faciliter la lecture. La brèche de construction entre les feuilles de revêtement d'OSB est située à la hauteur mi-mur, et il faudrait noter que même si l'OSB provient du même lot, le haut et le bas du revêtement d'OSB dans le mur correspond à une feuille de bois différente. Le contenu d'humidité du revêtement reflète les poussées et les gradients qui traversent l'assemblage; la température est utilisée pour corriger le contenu d'humidité des mesures.

La température intérieure et l'humidité relative sont mesurées à l'aide d'un capteur pour l'intérieur suspendu dans l'espace à l'intérieur du local de test du BEGhut.



**Schéma 2.9: Assemblage de mur avec des poteaux de cloison en acier (mur 9) vue rapprochée des capteurs**

Le niveau d'humidité relative du gypse et sa température sont mesurés dans la face extérieure en fibre de verre de la planche de gypse (mur 9). Des capteurs épinglés sont situés à 150 mm (6") au dessus et 150 mm (6") au dessous de mi-mur. Le revêtement de gypse est une feuille continue d'approximativement 2' sur la largeur par 8' sur la hauteur. La même feuille fut coupée en deux

moitiés égales, l'une pour le mur nord et l'autre pour le mur sud. Le niveau d'humidité relative du revêtement de gypse reflète les poussées et les gradients à travers l'assemblage; la température est utilisée pour corriger la mesure du contenu d'humidité. En plus des capteurs épingle enfoncés dans le revêtement de gypse, un bloc de bois pour l'humidité fut installé sur la partie intérieure du revêtement de gypse. Le contenu d'humidité du bois est utilisé pour correspondre avec le niveau d'humidité relative du gypse. Dans les cavités de cloison des murs de tests avec poteaux de cloison en bois, la température et l'humidité relative sont mesurées à deux endroits situés à 1" de l'extérieur du revêtement et à 1" de l'intérieur de la cloison sèche. Ces capteurs sont utilisés pour ces mesures importantes typiquement pour démontrer les caractéristiques des murs entre eux et d'en quantifier les performances.

Dans le mur (9) muni de poteaux de cloison en acier la température entre les poteaux et l'humidité relative sont mesurés à mi-épaisseur dans les nattes isolantes. Ces capteurs sont utilisés pour ces mesures importantes qui sont typiquement utilisés pour caractériser les murs entre eux et en vérifier la performance.

Dans le mur muni de poteaux de cloison en acier deux capteurs additionnels furent installés à l'intérieur et à l'extérieur des rebords des poteaux de cloison. Les capteurs mesurent les différences de températures à travers les poteaux d'acier afin de vérifier l'effet de pont thermique des poteaux d'acier à travers l'isolation de nattes. À l'interface entre le côté extérieur de la cloison sèche et la cavité de la cloison, un capteur de température peut être utilisé, par exemple, pour enregistrer l'humidité relative à la cloison sèche, étant donné le point de rosée dans la cavité de la cloison (à partir du capteur Tem/HR).

Les capteurs de contenu d'humidité, de température et d'humidité relative prennent automatiquement une lecture à toutes les cinq minutes et la moyenne de ces lectures est calculée à toutes les heures par un système CR1000 de système Campbell Scientific. De plus, la vitesse moyenne et la direction du vent, les radiations solaires et la quantité nette de la pluie tombée sont enregistrées à toutes les heures. La corrélation des détails de l'instrumentation typique et le contenu d'humidité du bois se retrouvent dans Straube & Schumacher (2002). Les lectures du contenu d'humidité des poteaux de cloison en bois sont corrigées pour tenir compte de la température et des espèces de bois alors que l'OSB a été corrigé pour tenir compte seulement de la température. Les corrections pour l'OSB Canadien sont seulement disponibles à partir d'un groupe de donnée limité, le (Onysko 2006). Toutes les données sur l'OSB MC mises de l'avant dans ce document ne comportent pas de corrections par rapport aux espèces. Les données présentement disponibles démontrent un contenu d'humidité gravimétrique réel d'environ 2% plus bas que le MC non corrigé présenté ici pour l'échelle de 15%MC à plus de 30%MC.

### 2.2.3 Propriétés du matériel MPG

Trois produits de MPG différents furent choisis pour utilisation dans cette étude. Les deux classes distinctes de MPG généralement utilisées en construction, les mousses de densité haute (2 pcf) à cellules fermées ou de densité basse (0.5 pcf) à cellules ouvertes, étaient représentées. Les produits choisis pour cette étude furent fournis par un grand manufacturier; cependant, les propriétés des matériaux sont représentatives de d'autres produits disponibles dans l'industrie qui rencontre la norme du CAN/ULC 705.1. Les études de la chambre climatique dont il est question au chapitre 3

démontrent que les produits dans chaque classe performant de façon très similaires.

Toutes les mousses giclées furent installées par un installateur licencié dans des conditions d'intérieur normales. Les propriétés de matériaux recueillies à partir de données publiées concernant les propriétés de matériaux pour les trois types de MPG sont présentées et résumées au Tableau 2.2.. Les valeurs appartiennent toutes au cœur du produit. Une pellicule se forme lorsque la mousse à cellules fermées est appliquée sur certaines surfaces, mais la pellicule n'est pas très importante par rapport à la perméabilité de la mousse dans des couches plus épaisses.

La mousse à cellules ouvertes (Type C) fut giclée de façon à remplir complètement la cavité de la cloison à une profondeur de 140 mm. L'excédent de mousse fut enlevé afin de permettre l'installation de la cloison sèche. La pellicule de surface fut enlevée. Notez que la pellicule de surface fournit peu de résistance pour les mousses à cellules ouvertes (tel que démontré dans les tests de la chambre climatique chapitre 3). Les mousses à cellules fermées (Types A et B) furent giclées à une profondeur moyenne de 130 mm à l'intérieur de la cavité de la cloison de 140 mm afin de permettre la pose de la cloison sèche par-dessus et sans toucher à la surface inégale de la mousse. Cette méthode permet de maintenir l'intégrité de la pellicule de surface de la mousse à cellules fermées.

**Tableau 2.2: Propriétés du matériel MPG (Provient d'articles des manufacturiers & d'évaluations du CCMC)**

Propriétés du matériel	Type A – rouge	Type B – vert	Type C – jaune
Type	Cellules fermées	Cellules fermées	Cellules ouvertes
Densité	32 kg/m <sup>3</sup> (2.0 pcf)	32 kg/m <sup>3</sup> (2.0 pcf)	8 kg/m <sup>3</sup> (0.5 pcf)
Conductivité Thermique (Valeur du Design à long terme)	0.024 W/m K	0.024 W/m K	0.042 W/m K
Valeur isolante (Valeur du Design à long terme)	RSI 1.06 par 25.4mm R 6.0 par pouce	RSI 1.06 par 25.4mm R 6.0 par pouce	RSI 0.6 par 25.4mm R 3.4 par pouce
Perméabilité à la vapeur	1.8 ng/Pa•s•m <sup>2</sup>	2.2 ng/Pa•s•m <sup>2</sup>	33.0 ng/Pa•s•m <sup>2</sup>
Perméance à la vapeur pour l'épaisseur installée	14ng/Pa•s•m <sup>2</sup> pour 130 mm	17ng/Pa•s•m <sup>2</sup> pour 130 mm	236ng/Pa•s•m <sup>2</sup> pour 140 mm

### 2.3 Résultats

L'analyse se concentre sur les résultats pour la période des huit mois d'hiver du début novembre 2005 à juillet 2006. Les conditions environnantes intérieures et extérieures pour l'expérience sont présentées et suivies d'une discussion concernant les résultats des murs de MPG à cellules ouvertes et à cellules fermées.

#### 2.3.1 Conditions environnantes

Les conditions de la température et de l'humidité relative intérieure et extérieure sont montrées au schéma 2.10 pour la période de surveillance de huit mois du 10 novembre 2005 au 10 juillet 2006.

##### 2.3.1.1 MPG à cellules ouvertes (Mur 6)

La température, l'humidité relative, le contenu d'humidité, la pression de la vapeur et la température du point de rosée des emplacements furent analysés pour les murs de MPG à cellules ouvertes (N6 et S6). La performance reliée à la durabilité des matériaux, principalement le contenu d'humidité du revêtement OSB et des poteaux de cloison en bois est discutée.

Selon le manufacturier et les fiches de données du CCMC, la MPG à cellules ouvertes détient une perméabilité à la vapeur d'environ  $33.0 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ . Alors, 140 mm de ce matériau comporte une perméabilité d'approximativement  $236 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ . La cloison sèche de gypse et la peinture au latex avec couche d'apprêt fournissent une perméabilité à la vapeur de l'ordre de 2000 et 300  $\text{ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$  respectivement. Si on fait la somme de la perméabilité en série, la perméabilité totale de l'assemblage sur le côté intérieur du revêtement est approximativement de  $124 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ . Un mur résidentiel typique avec un pare vapeur de polyéthylène aurait une perméabilité à la vapeur de  $<5 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ , à l'intérieur du revêtement peu importe le type d'isolation.

Les murs typiques avec encadrement de bois construits avec un pare vapeur de polyéthylène ne présente généralement pas de problème pendant l'hiver résultant de la diffusion de la vapeur vers l'extérieur, étant donné que le polyéthylène est imperméable à la source de la vapeur d'eau intérieure. Cependant, l'expérience a démontré que ces murs peuvent présenter des problèmes lorsque d'autres sources d'humidité incluant l'infiltration d'air froid par les températures froides, la condensation et l'infiltration de l'eau de pluie, ou à cause qu'un flux de vapeur poussé par le soleil ne peut pas sécher de l'intérieur pendant les températures chaudes.

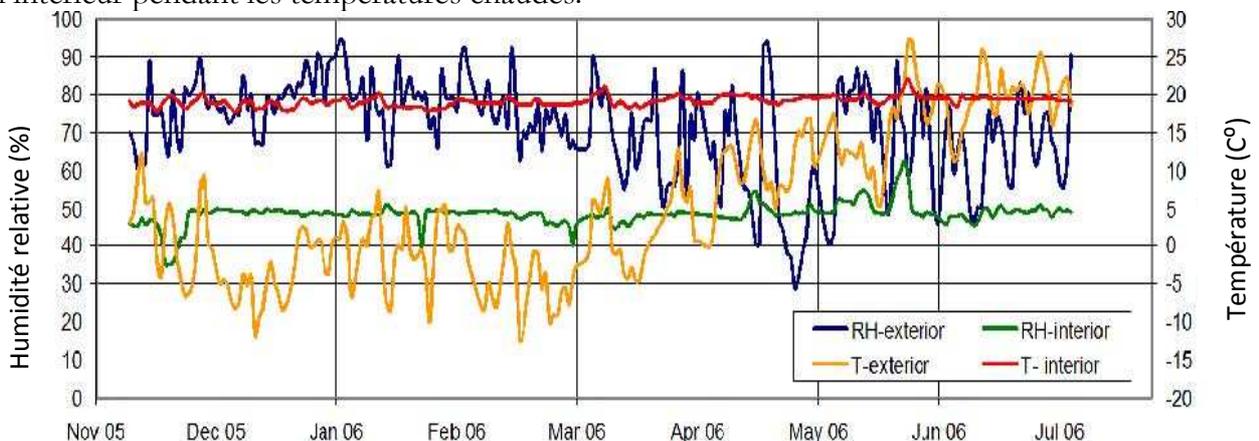
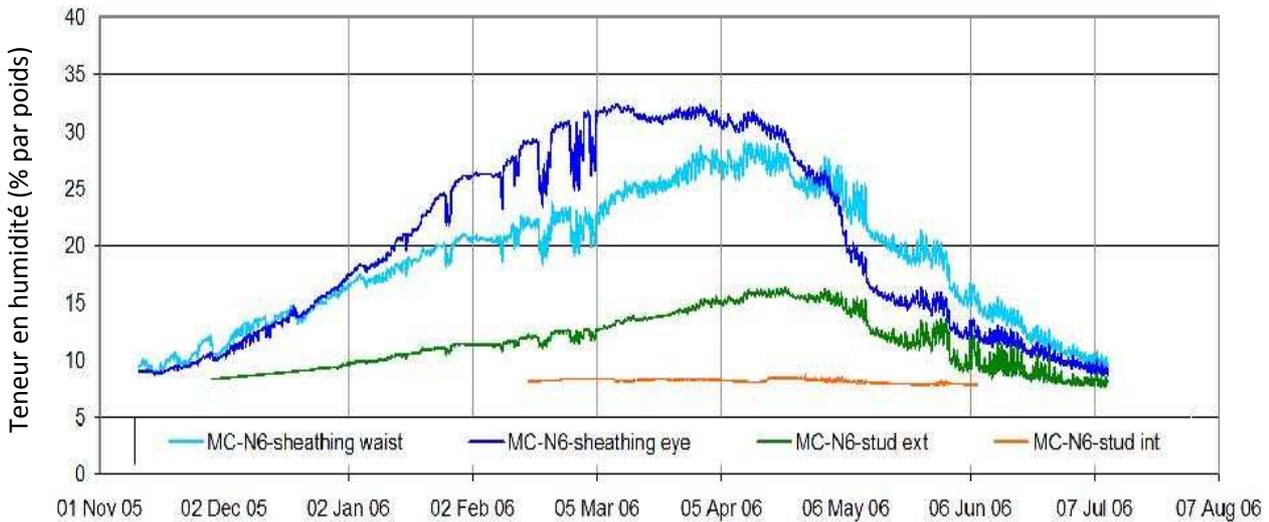


Schéma 2.10 : Température et humidité relative intérieure et extérieure

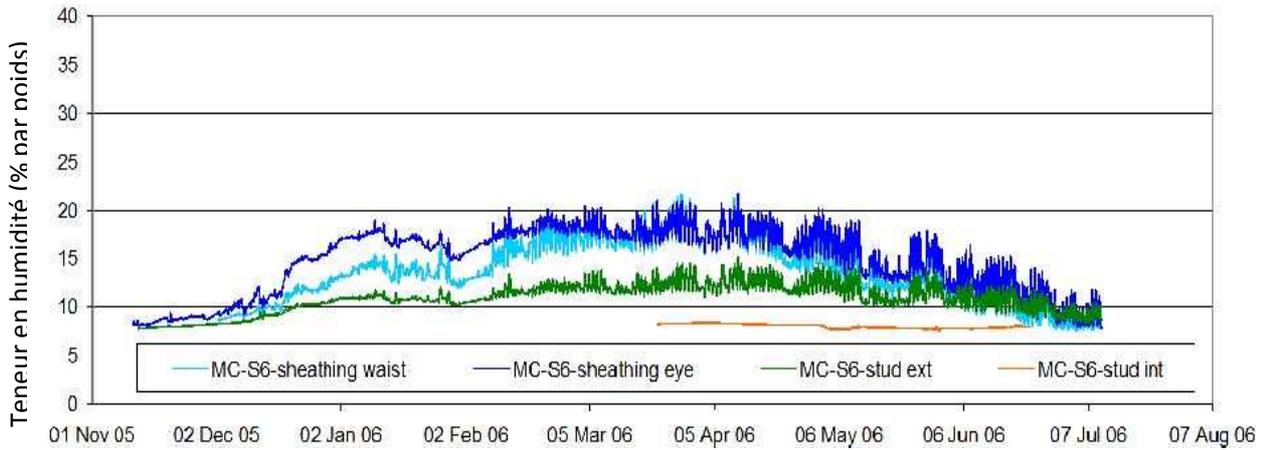
De façon à déterminer par expérimentation si une résistance à la vapeur additionnelle est requise pour le MPG à cellules ouvertes et quelle quantité de résistance est requise, les murs à cellules ouvertes étaient instrumentés afin de déterminer la quantité d’humidité qui s’accumulerait au niveau du revêtement, poussée par la diffusion de vapeur en l’absence d’un pare vapeur. Avant le début de l’expérience il avait été prédit que les murs de MPG à cellules ouvertes feraient l’objet d’une certaine quantité de condensation due à la diffusion de vapeur hivernale ce qui augmenterait le contenu d’humidité du revêtement. Les résultats de ces tests démontrent que les murs d’orientation nord et sud ont tous deux fait l’objet de diffusion de vapeur hivernale avec des sommets de niveaux d’humidité à l’intérieur du revêtement et des poteaux de cloison vers la fin de l’hiver. Cette augmentation du contenu d’humidité au niveau du revêtement et des poteaux de cloison est démontrée au schéma 2.11 pour le mur N6 et au schéma 2.12 pour le mur S6.

Le revêtement OSB dans le mur nord avait un contenu d’humidité dépassant 30% MC pendant environ 2 mois et de 20% pendant près de 4 mois continus. Il s’agit d’un niveau dangereux d’humidité. Le contenu d’humidité du revêtement était beaucoup plus bas dans le mur S6 avec un excédent de 20% MC seulement pendant quelques semaines. Les différences semblent provenir du fait que le revêtement du mur sud bénéficie d’une température plus élevée où une plus grande concentration de radiations solaires a été observée, à comparer au mur nord, ce qui réduirait la quantité de condensation par diffusion de vapeur. Un revêtement plus chaud équivaut à un revêtement plus sec. Le contenu d’humidité des poteaux de cloison est demeuré à des niveaux sécuritaires pour la durée du test, il a atteint un sommet de 16% dans le mur N6 du côté extérieur.



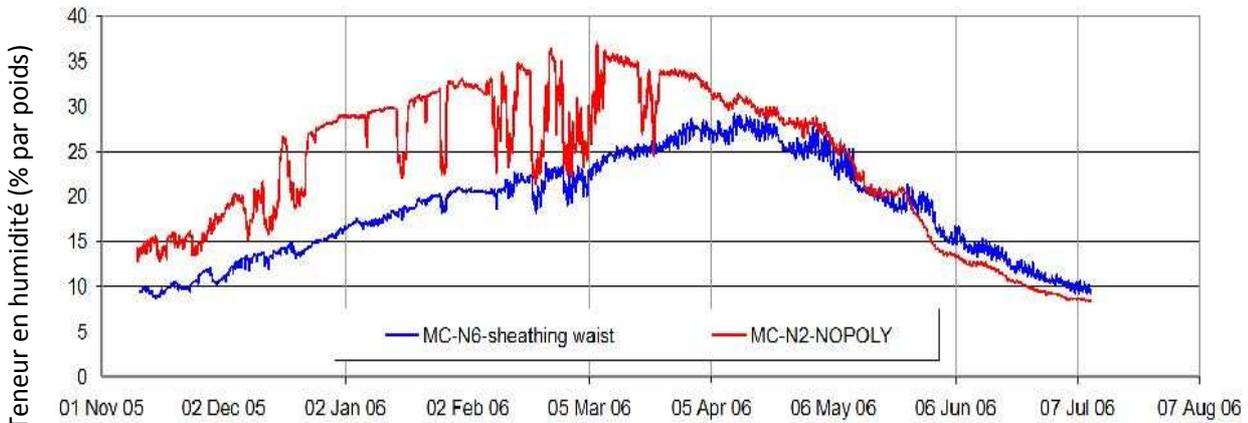
**Schéma 2.11 : Mur N6 - Contenu d’humidité (% au poids) revêtement et colombages (cellules ouvertes)**

En avril, quand la température extérieure a augmenté, les deux murs ont rapidement séché pour atteindre des niveaux sous 10% vers le début juillet.



**Schéma 2.12 : Mur S6 - Contenu d'humidité (% au poids) revêtement et colombages (cellules ouvertes)**

Basé sur ces résultats, on peut conclure que le niveau de contrôle de la vapeur est suffisant pour cet assemblage de mur dans une orientation nord sous ces conditions intérieures (50%HR niveaux hivernaux), mais pourrait aussi être représentatif d'un mur dans n'importe quelle orientation s'il est à l'ombre du soleil pendant l'hiver. Pendant l'été, les murs semblent bien performer. Le mur N6 est d'avantage comparé au mur N2 qui est essentiellement de la même construction sauf qu'ici on a utilisé l'isolant de nattes de fibres de verre au lieu de la MPG à cellules ouvertes. Le schéma 2.13 compare le contenu d'humidité du revêtement OSB pour ces deux murs.

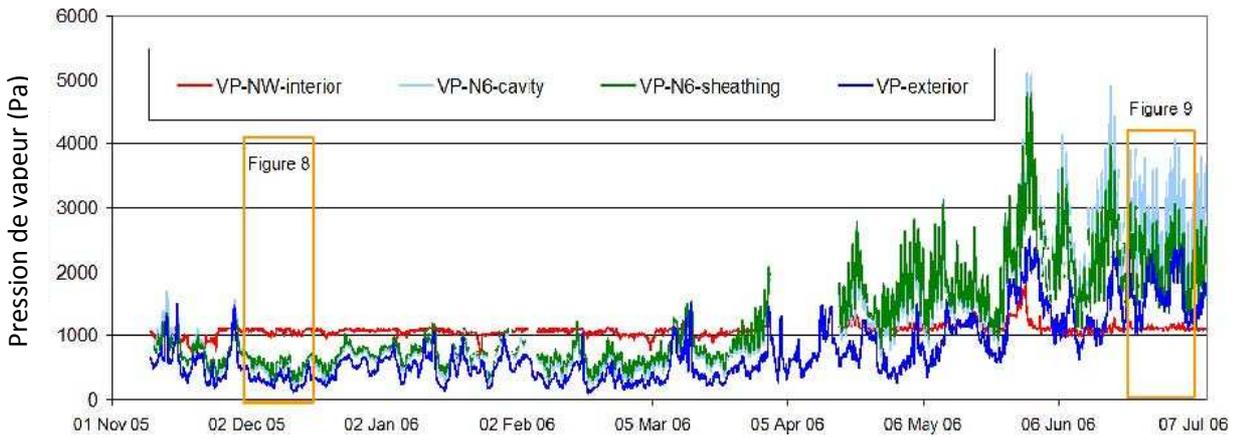


**Schéma 2.13 : Mur N6 - Contenu d'humidité (% au poids) revêtement et colombages (cellules ouvertes) versus mur de donnés avec polyéthylène**

Le contenu d'humidité du revêtement d'OSB dans le mur standard sans polyéthylène est plus élevé que dans le mur de MPG dans la même orientation, avec un contenu d'humidité au-delà de 30% pour des périodes de temps prolongées. Ceci démontre l'effet d'humidification relatif de la MPG, et l'impact d'une différence de perméance à la vapeur à l'intérieur d'approximativement  $124 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$  pour le mur de MPG versus  $215 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$  pour le mur de données avec les nattes de fibre de verre avec la même couche de peinture intérieure de la cloison sèche de gypse.

Le flux d'humidité à l'intérieur des murs de MPG à cellules ouvertes peut être analysé en utilisant les pressions de vapeur (niveaux d'humidité absolue) à l'intérieur de l'assemblage du mur. Le schéma

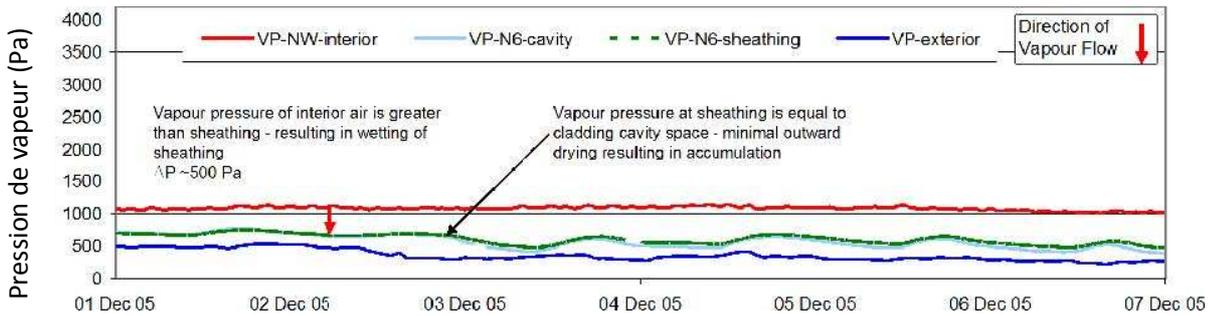
2.14 trace les pressions de vapeur de l'air intérieur, de l'air extérieur, l'air des cavités du bardage, et à la face intérieure du revêtement d'OSB de novembre à juillet. Une semaine typique d'hiver du 1<sup>er</sup> au 7 décembre est démontrée avec plus de détails au schéma 2.15 et une semaine typique d'été du 1<sup>er</sup> juillet au 7 juillet est démontré au schéma 2.16 afin de démontrer les différences de pressions de vapeur par saison.



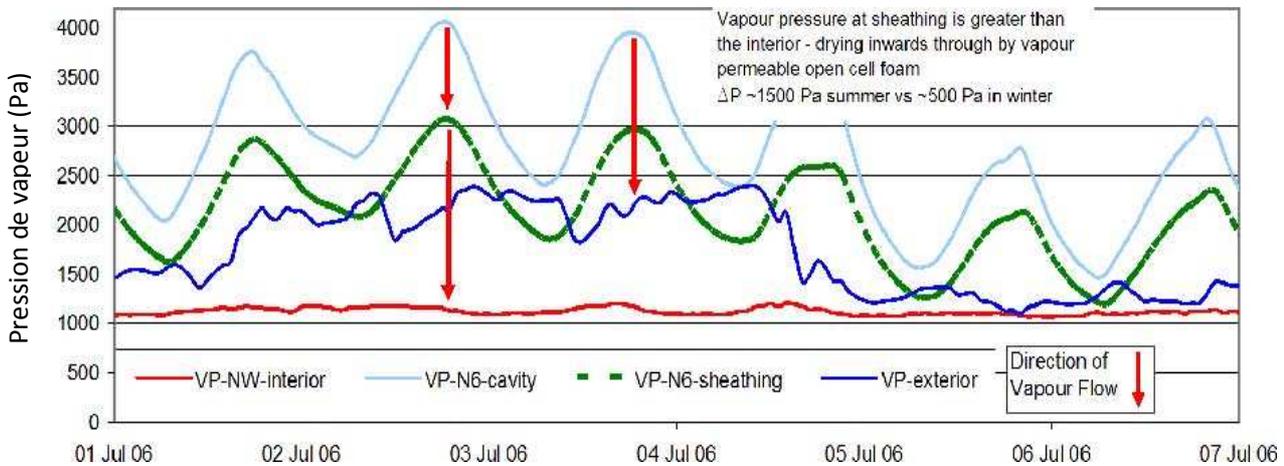
**Schéma 2.14: Mur N6 – Les pressions de vapeur dans les assemblages de murs avec la MPG à cellules ouvertes (Novembre à Juillet)**

Pendant les mois d'hiver, la pression à l'intérieur du local de test est en moyenne, 300-500 Pa plus élevée que dans le revêtement et que l'air extérieur, ayant pour résultat une petite mais consistante poussée de vapeur vers l'extérieur (Schéma 2.15). Au printemps, avec les températures plus élevées et des radiations solaires accrues, la pression de vapeur de l'air extérieur, du revêtement, et ces cavités de cloison augmentent de façon significative au dessus de la pression de vapeur intérieure et le flux de vapeur est renversé. Les différences de vapeur le printemps et à l'été sont de l'ordre de 1000-2000 Pa, beaucoup plus élevé qu'en hiver. La pression de vapeur des températures beaucoup plus chaudes explique pourquoi le séchage se produit à un taux plus rapide pendant les températures plus chaudes.

Une analyse des pressions de vapeur en été (Schéma 2.16) indique que la vapeur se dirige vers l'intérieur ce qui produit une humidité relative plus élevée à l'intérieur de la mousse et à l'interface entre la mousse et la cloison sèche du gypse. Cependant, dû au fait que la couche de peinture est relativement perméable, la vapeur peut se propager vers l'intérieur. L'humidité relative à l'interface entre la plaque de plâtre et la cloison sèche de gypse varie entre 60 à 80% pendant la période de l'été où ce séchage se produit. Si l'HR de l'intérieur était maintenue à un plus haut niveau (plus typiquement à 60%) pendant l'été, la différence de pression de vapeur diminuerait d'environ 10%, il en est de même pour le flux du taux de diffusion de vapeur vers l'intérieur.



**Schéma 2.15: Mur N6 - Gradient de la pression de vapeur pendant une semaine typique d'hiver (Du 1<sup>er</sup> au 7 déc. 2005)**



**Schéma 2.16: Mur N6 - Gradient de la pression de vapeur pendant une semaine typique d'été (Du 1<sup>er</sup> au 7 juil. 2006)**

Des conditions d'intérieur de 20°C et 50% HR résultent en une pression de vapeur d'approximativement 1200 Pa, ce qui produit une grande poussée de diffusion de vapeur hivernale vers l'extérieur. Si les conditions intérieures étaient plutôt réglées à 20°C et 30% HR, ce qui serait plus typique des valeurs de températures froides de l'hiver, la pression de vapeur serait significativement moins élevée (approximativement 700 Pa), ce qui aurait pour résultat des poussées de vapeurs significativement plus petites. Ceci produirait moins d'accumulation d'humidité au revêtement. Ceci est davantage modélisé et discuté dans la section suivante sur la modélisation hygrothermique.

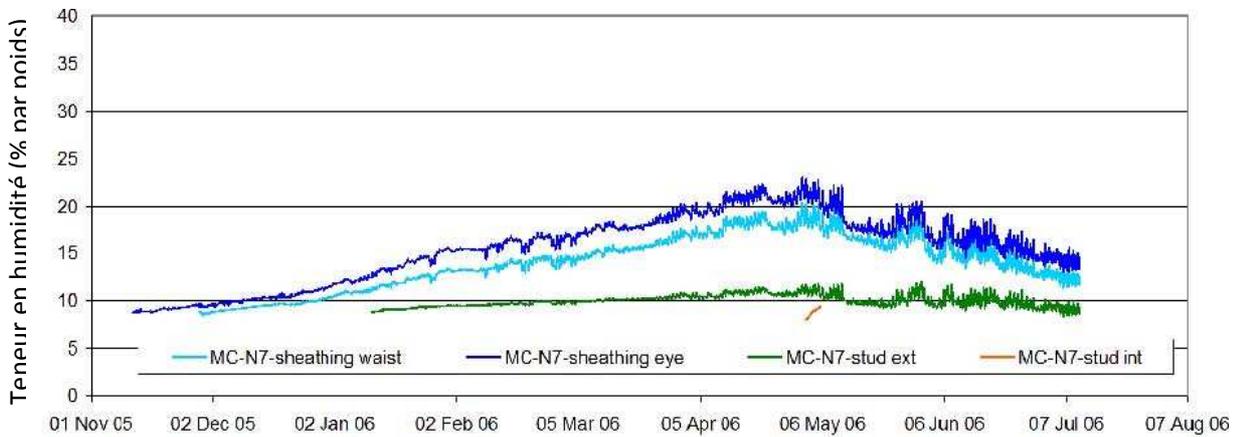
**2.3.2 MPG à cellules fermées (Mur 7 & 8)**

La performance et le contenu d'humidité du revêtement OSB et de poteaux de cloison en bois sont analysés pour les murs de MPG 7 et 8. Les deux produits de MPG à cellules fermées sont utilisés pour cette expérience ont une perméabilité d'approximativement 2ng/Pa.s.m, donc pour 130 mm la perméance est approximativement de 15 ng/Pa.s.m<sup>2</sup>. Si on totalise la perméance de la cloison sèche et de la peinture en série, la perméance nette est approximativement à 14 ng/Pa.s.m<sup>2</sup> à l'intérieur du revêtement, beaucoup plus bas que la mousse à cellules ouvertes à 125 ng/Pa.s.m<sup>2</sup> et se compare bien au polyéthylène à <5 ng/Pa.s.m<sup>2</sup>. On pourrait alors s'attendre à ce que le revêtement des murs de MPG à cellules fermées ait un contenu d'humidité hivernal moins élevé

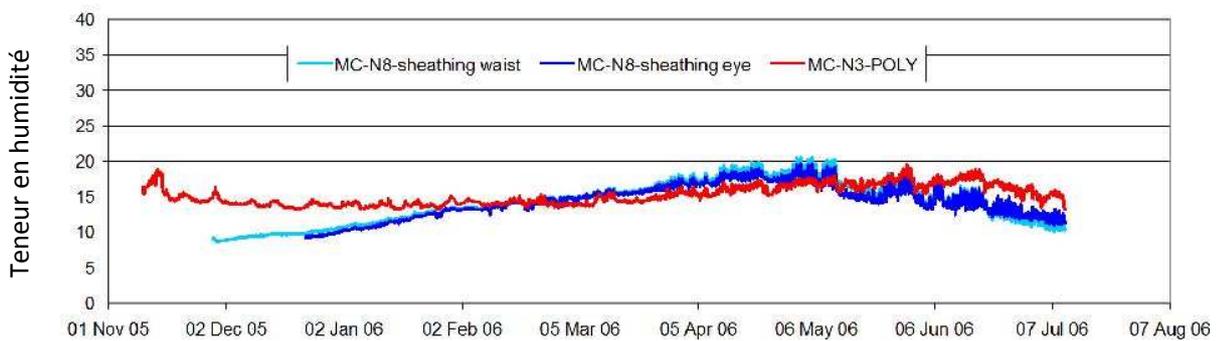
que celui dans les murs de MPG à cellules ouvertes.

Les résultats de tests démontrent que les murs 7 et 8 dans les orientations nord et sud ont tous deux fait l'objet d'un sommet d'humidité allant jusqu'à 20% à l'intérieur du revêtement et <15% dans les poteaux de cloison à la fin de l'hiver, plus bas que les murs de MPG à cellules ouvertes. Le schéma 2.17 trace le contenu d'humidité du revêtement et des poteaux de cloison dans le mur N7. Les murs N8, S7 et S8 démontrent des résultats similaires.

Les murs du côté sud ont tracé les mêmes niveaux d'humidité que du côté nord, avec un sommet de contenu d'humidité allant jusqu'à 20% et qui devient plus sec pendant l'été (mais pas aussi sec que les murs de MPG à cellules ouvertes). Les murs du côté sud ont fait l'objet de plus de pointes au niveau du contenu d'humidité, correspondant aux poussées de radiations solaires. Les murs de MPG sont comparés au mur de données N3 qui est construit avec de l'isolation en nattes au lieu de la MPG avec un pare vapeur de l'intérieur.



**Schéma 2.17: Mur N7 – Contenu d'humidité du revêtement et des poteaux de cloison avec la MPG à cellules fermées**



**Schéma 2.18: Contenu d'humidité du revêtement du mur N8 (cellules fermées) versus le mur de données avec le polyéthylène**

Le mur de MPG à cellules fermées offre une performance avec des traits similaires au mur avec le polyéthylène du (schéma 2.18), cependant, le mur avec le polyéthylène a débuté avec un contenu d'humidité plus élevé dû à la température plus chaude au moment de sa construction (ce mur a été construit 2 mois plus tôt). Le mur de MPG pourrait aussi faire l'objet d'une très légère poussée de

vapeur de l'intérieur, ce qui ferait augmenter le contenu d'humidité hivernal, similaire au mur de MPG à cellules ouvertes et de là le sommet atteint quelques mois auparavant. Aussi le séchage semble être amélioré avec la MPG à cellules fermées tel que démontré en juin et juillet.

À la suite d'un examen plus approfondi, la source de l'humidité dans les murs à cellules fermées semble **provenir majoritairement de l'extérieur**, exemple, d'une humidité relative élevée dans la cavité derrière la brique. Le contenu d'humidité du revêtement est moins affecté par les conditions intérieures que par les conditions derrière le bardage. L'humidité relative à l'intérieur de la cavité du bardage ventilé est une fonction de la température extérieure, le dépôt d'humidité dans le bardage, et le taux de ventilation du bardage. La brique a la capacité d'entreposer des grandes quantités d'humidité provenant de la pluie et de les relâcher par la suite sous forme de vapeur. La ventilation de ces murs est fournie par les événements au sommet et à la base des murs de façon similaire à ce que nous avons vu pour les tests du BEGHut qui ont démontré que ces événements étaient suffisants pour permettre des taux significatifs de séchage du revêtement (Straube et al. 2004). Les murs du BEGHut sont typiques d'une maison d'un étage avec 600 mm de porte-à-faux, et les expériences passées ont démontré qu'un facteur de pluie battante (DRF) d'approximativement 0.2 peut être utilisé pour prévoir la quantité de pluie battante (Straube et al. 2005).

Basé sur ces résultats, on peut conclure que le niveau de contrôle de la vapeur fourni par la MPG à cellules fermées est suffisant pour prévenir un haut niveau de contenu d'humidité pendant les mois d'hiver.

### 2.3.3 Performance des poteaux de cloison en bois

Même si la MPG à cellules fermées a une perméance à la vapeur suffisamment basse (en épaisseur d'environ 2") afin d'agir à titre de retardateur de vapeur, les entrepreneurs, les designers et les officiels du bâtiment croient quelques fois que la vapeur se diffusera à travers les poteaux de cloison de bois vers l'extérieur, en outrepassant la résistance à la vapeur de la MPG à cellules fermées.

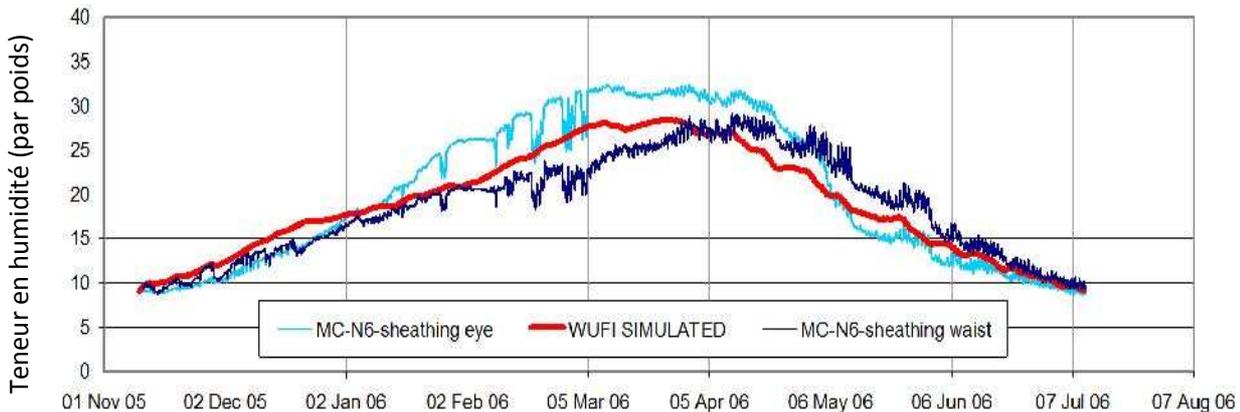
La perméabilité à la vapeur du bois massif est d'approximativement 1.4 ng/Pa.s.m, qui pour un poteau de cloison de 89 mm représente un perméance de 16 ng/Pa.s.m<sup>2</sup> donc un poteau de cloison de 140 mm une perméance de 10 ng/Pa.s.m<sup>2</sup>. Ces perméances sont très basses et se comparent à la perméance de 140 mm de MPG à cellules fermées, qui est d'environ 14-17 ng/Pa.s.m<sup>2</sup>.

Le contenu d'humidité mesuré des poteaux de cloison dans les tests sur le terrain était plus bas que celui de l'OSB derrière la mousse. Ce résultat ne devrait surprendre personne, car le bois est sensé avoir une perméance similaire à celle de la MPG à cellules fermées, mais avec une bien plus grande capacité d'entreposage. Il va sans dire qu'en se basant sur la théorie et sur les mesures, on peut conclure que les poteaux de cloison en bois ne requièrent aucune couche additionnelle de contrôle de la diffusion de la vapeur.

## 2.4 Validation du modèle hygrothermique

Le programme ordinateur du WUFI 4.0 Pro a été utilisé pour créer le modèle des murs de tests. Le WUFI est un programme avancé disponible commercialement qui sert à créer un modèle hygrothermique de l'humidité utilisé par de nombreux praticiens. Sa précision a été vérifiée contre de nombreuses études à pleine échelle de la performance des enceintes sur le terrain (les toits, les murs, les fondations, les étages de stationnement, etc.) depuis un certain nombre d'années (Kuenzel 1995, Kuenzel & Krus 1997, Kuenzel 1998, Hens et al 1996). C'est un des rares modèles qui peut efficacement tenir compte de l'absorption de la pluie (Straube 2003). Si on lui fournit les données des matériaux, le WUFI calcule le flux de la chaleur et de l'humidité à toutes les heures sous l'influence du soleil, de la pluie, de la température et de l'humidité.

Un modèle ordinateur WUFI fut conçu pour chaque système de mur de test system utilisant les matériaux disponibles dans la base de données du WUFI. Les propriétés du matériau de MPG à cellules fermées ont été modifiées pour les rendre semblables à celles fournies par les manufacturiers là où elles étaient différentes de celles présentées dans la base de données du WUFI. Les données environnementales réelles de l'intérieur et de l'extérieur du BEGHut (la pluie, les radiations solaires, le vent, la température, l'humidité relative) ont été insérées dans le modèle du WUFI comme conditions de base du modèle. Les premières simulations effectuées avec les données de la température réelle ont fourni une excellente corrélation avec les résultats mesurés. D'autres simulations furent effectuées et les variantes furent systématiquement ajustées afin de calibrer les résultats du modèle versus les données mesurées. Une simulation de la température, du point de rosée et du contenu d'humidité fut comparée aux données mesurées afin d'en assurer la précision. Cette comparaison a fourni une grande confiance dans l'habileté du modèle à interpoler et extrapoler à d'autres situations. Pour le besoin de comparaison le résultat du contenu d'humidité dans le revêtement du mur N6 avec la mousse à cellules ouvertes est démontré au schéma 2.19.



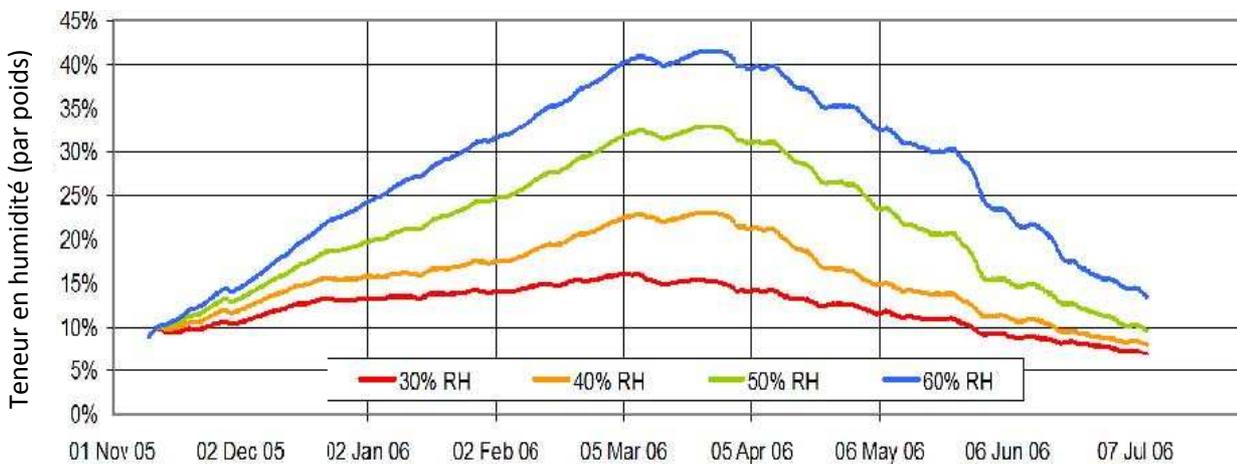
**Schéma 2.19: Mur N6 – Contenu d'humidité relative mesuré comparativement aux résultats simulés du WUFI**

Un nombre de simulations paramétriques furent effectuées et sont présentées ici, pour la période des huit mois de données du BEGHut afin de déterminer l'impact de l'humidité relative de l'intérieur, de l'orientation et des couches de contrôle de la vapeur. D'autres extrapolations sur d'autres climats sont effectuées utilisant les données climatiques de la base de données du WUFI pour plus de 8 mois.

**2.4.1.1 L'humidité relative intérieure**

Les conditions intérieures du BEGHut sont relativement constantes à 20°C et 50%HR l'année durant. Une humidité relative hivernale de 50% est élevée pour des édifices résidentiels et commerciaux typiques dans ce climat, mais est typique pour un musée ou un hôpital. Une analyse paramétrique a été effectuée en utilisant le WUFI afin de démontrer l'impact qu'une humidité relative de 50% a sur les résultats mesurés pour les murs de MPG à cellules ouvertes. Le schéma 2.20 montre l'impact d'une humidité relative intérieure de 30%, 40%, 50%, et 60% pendant l'hiver quand la température est maintenue à 21°C pour un mur dans l'orientation nord (en utilisant une peinture au latex avec une unité de perméance de 300 perm.).

Ce tracé démontre l'importance d'une humidité relative intérieure modérée et l'impact de celle-ci sur la performance du revêtement OSB. Une humidité relative intérieure plus grande que 35-40% résultera en des niveaux d'humidité dangereux dans le revêtement de cet assemblage de mur sous ces conditions extérieures. Une humidité relative de 60% ou plus serait représentative d'une piscine intérieure ou d'une pièce avec une source d'humidité constante significative, où un mur avec la MPG à cellules ouvertes et sans une couche de retarder vapeur aurait très certainement une mauvaise performance. Aussi selon ce que nous avons vu des résultats sur le terrain, pour des murs exposés à une plus grande radiation solaire on peut s'attendre d'avoir un contenu d'humidité moins élevé. L'orientation nord est le pire cas pour la diffusion en température froide. Des simulations sur plusieurs années furent aussi effectuées utilisant les données de températures de la région de Toronto avec des tendances et résultats similaires.

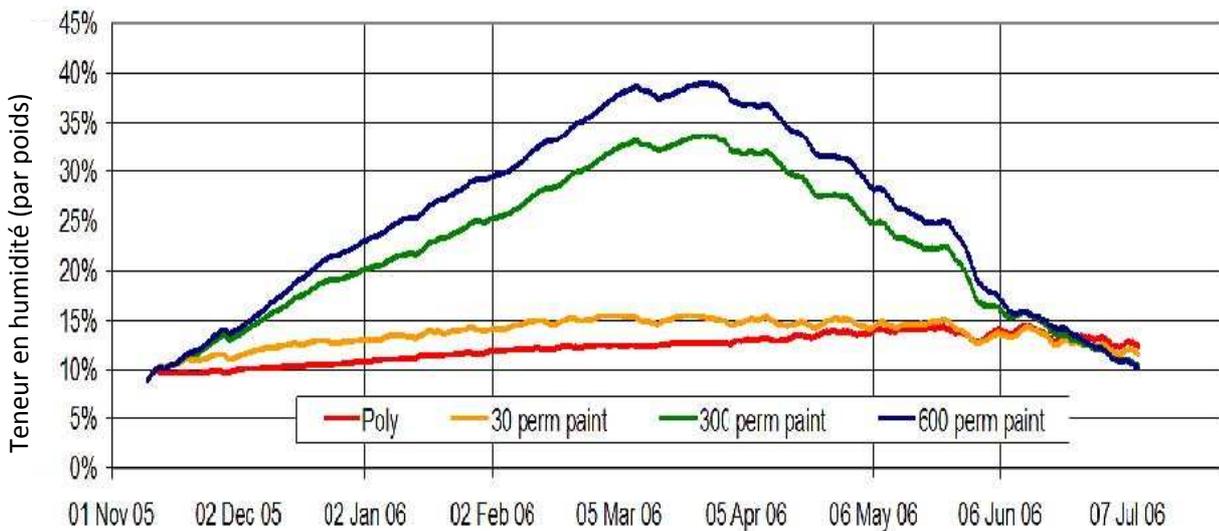


**Schéma 2.20: N6 MPG à cellules ouvertes – Impact de l'humidité intérieure relative sur l'humidité contenue dans le revêtement d'OSB (climat de Toronto)**

Les résultats de la MPG à cellules fermées ne sont pas montrés étant donné que la modélisation a confirmé qu'elle était suffisamment résistante à la vapeur et de ce fait le contenu d'humidité du revêtement ne subit pas d'impact significatif causé par l'humidité relative de l'intérieur. Ceci est valide même quand une humidité relative intérieure de 50% a été prise en considération pour une année typique à Edmonton.

### 2.4.1.2 Stratégie du contrôle de la vapeur

La stratégie actuelle pour le contrôle de la vapeur consiste en l'utilisation de peinture au latex disponible commercialement sur la cloison sèche de gypse ajoutée à la MPG à cellules ouvertes ou fermées. La peinture a une perméance à la vapeur d'approximativement  $300 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ . Une modélisation hygrothermique a été utilisée pour déterminer l'effet de cette couche de peinture et a démontré qu'une peinture résistante à la température et à la vapeur avec une perméance de  $30 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$  produirait un contrôle suffisant de la vapeur pour le mur de MPG à cellules ouvertes. Ceci a été comparé à un mur avec un pare vapeur de polyéthylène et avec un mur avec une peinture plus perméable, de  $600 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ . Les résultats sont comparés au schéma 2.21 pour un mur orienté nord avec des conditions intérieures de  $21^\circ\text{C}$  et 50% HR.



**Schéma 2.21: Mur N6 – Impact de différents pare vapeur sur l'humidité contenue dans le revêtement d'OSB (Climat de Toronto)**

Ce tracé du contenu d'humidité (Schéma 2.21) démontre qu'avec une peinture retarde vapeur ou un polyéthylène on peut contrôler la vapeur pendant les mois d'hiver avec la MPG à cellules ouvertes. Même dans des cas d'humidité relative très élevée, on peut obtenir des niveaux sécuritaires de contenu d'humidité hivernal dans le revêtement simplement par l'utilisation d'une peinture retarde vapeur. Des simulations de plusieurs années furent également effectuées en utilisant les données de la température de la région de Toronto avec des tendances et des résultats similaires.

Étant donné que la MPG à cellules fermées est suffisamment résistante à la vapeur, la modélisation a démontré que la performance de l'OSB n'a pas subi d'impact des couches additionnelles de contrôle de la vapeur à l'intérieur.

## 2.5 Conclusions & Recommandations

Ce chapitre a présenté les préparatifs et les résultats d'une investigation expérimentale de la nécessité de couches supplémentaires de retarde vapeur à la fois pour la MPG à cellules ouvertes et à cellules fermées dans les murs avec poteaux de cloison en bois que l'on utilise dans les édifices d'occupation résidentielle et commerciale. Des résultats représentatifs de tests et de validation de

modèles d'un hiver complet furent présentés.

Les murs de MPG à cellules ouvertes présentaient une résistance insuffisante à la vapeur pendant l'hiver dans le climat du sud de l'Ontario dans des conditions intérieures de 20°C et 50% HR pour que le contenu d'humidité du revêtement demeure en dessous de 20%, particulièrement dans l'orientation nord qui montrait des contenus d'humidité au dessus de 30% pendant quelques mois. Cependant, les murs de MPG à cellules fermées présentaient pour leur part une résistance suffisante à la vapeur pour maintenir les contenus d'humidité du revêtement sous 20% dans les mêmes conditions intérieures difficiles.

Une modélisation hygrothermique fut effectuée et comparée aux résultats observés afin de valider le modèle. Il a été démontré que le modèle du WUFI 4 était capable de prédire la performance mesurée d'un nombre de murs différents. En utilisant le modèle hygrothermique validé, on peut développer des recommandations préliminaires pour l'utilisation de couches additionnelles de retard de vapeur comme fonction de type MPG, d'assemblage de murs et du climat.

Les mesures sur le terrain ont démontré, que pendant l'hiver les contenus d'humidité de l'OSB et des poteaux de cloison en bois des murs de MPG à cellules ouvertes subissaient un impact significatif de l'humidité relative intérieure et de la perméance des couches de contrôle de la vapeur. En utilisant de la peinture normale au latex (de l'ordre de  $300 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ ) avec une humidité relative de plus de 40% pendant l'hiver dans un climat froid (au dessus d'environ  $4000 \text{ DJC } ^{1/4}\text{C}$ ) on peut avoir comme résultat des contenus d'humidité dangereusement élevés du revêtement à cause de la diffusion de vapeur. Pendant l'hiver, il est recommandé de maintenir une humidité relative intérieure à moins de 40%. Cependant, à cause de la sensibilité du mur aux changements d'humidité relative intérieure, un contrôle additionnel de la vapeur est recommandé avec la MPG à cellules ouvertes dans les climats de plus d'environ  $4000 \text{ DJC } ^\circ\text{C}$ . Une peinture retarde vapeur (de l'ordre de  $30 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ ), "smart retarder", ou une feuille de polyéthylène sont des meilleurs choix pour le contrôle de la vapeur dans de tels climats froids.

Le contenu d'humidité mesuré et modélisé de l'OSB et des poteaux de cloison dans les murs de MPG à cellules fermées fut peu affecté par les variations d'humidité relative intérieure ou de la perméance des couches de contrôle de la vapeur. La modélisation a démontré que même dans des climats aussi froids qu'à Edmonton (environ  $6500 \text{ DJC } ^{1/4}\text{C}$ ), des niveaux d'humidité relative de 50% peuvent s'accommoder sans couches additionnelles de contrôle de la vapeur.

Les poteaux de cloison en bois ont suffisamment de résistance inhérente à la vapeur qu'ils ne requièrent pas de couche supplémentaire de contrôle de la vapeur. Les poteaux de cloison de bois sont demeurés secs à la fois pendant l'hiver et l'été sans avoir besoin de recourir à une feuille de polyéthylène comme retardateur de diffusion de la vapeur. Les mesures sur le terrain ont démontré et la modélisation a confirmé, que quand la MPG est installée à l'intérieur d'un revêtement hygroscopique, une accumulation d'humidité peut se produire à cause de l'humidité contenue dans le parement de brique poussé par le soleil spécialement si une MPG relativement imperméable à la vapeur est utilisée. La physique de base de la construction suggère que si cette augmentation d'humidité est excessive, elle peut être contrôlée en installant une mousse à cellules fermées du côté

extérieur du revêtement pour augmenter à la fois la température du revêtement et fournir une résistance contre le flux de vapeur.

## 3 Tests de la chambre climatique

### 3.1 Introduction

Les tests sur le terrain rapportés au chapitre 2 fournissaient une démonstration de performance à pleine échelle sur le terrain dans une application spécifique de même que certaines informations concernant la validité de la modélisation hygrothermique. Beaucoup plus de détails sont disponibles dans Smith (2009). Un grand nombre de marques de MPG sont disponibles, ainsi que des nouveaux types proposés pour usage future (exemple HCFC-245 agents d'expansion). Afin de fournir des mesures de performance parallèle d'un groupe de produits de MPG différents, on a entrepris une expérimentation en laboratoire moins coûteuse et plus contrôlée.

### 3.2 Étendue de l'expérience et design

L'objectif de l'expérience en laboratoire était de déterminer quel niveau de résistance à la diffusion de vapeur d'eau était offert par les divers types de produits isolants de mousse de polyuréthane giclée installés dans les assemblages de murs représentatifs, sujets à des conditions de gradient de température et d'humidité élevés.

L'étendue de l'expérience consistait à tester les types les plus communs de mousses isolantes de polyuréthane giclées à cellules fermées utilisées dans les constructions résidentielles et commerciales au Canada. L'isolant de nattes de fibre de verre fut inclus dans les tests à titre de cas de référence.

### 3.3 Préparatifs pour les tests

Un cadre de 8'x8' fut subdivisé en compartiments afin de permettre les tests simultanés de tous les échantillons. Ce cadre fut inséré dans la chambre climatique.

Un côté de la chambre climatique était équipé pour simuler la température d'une pièce avec une grande charge d'humidité et des températures élevées (25 C et 50%HR); l'autre côté était équipé pour simuler une température extérieure froide d'environ -10 C et 60%HR. Les boîtes de tests furent soumises à des gradients de températures et d'humidité relative élevés et constants pour une période de plus de 57 jours. Ces conditions sont plutôt sévères, et non représentatives des applications résidentielles. L'intention, comme c'était le cas dans le local de tests, était de stresser les échantillons et d'observer la performance dans des conditions exigeantes pour aider à la compréhension et non de tenter d'imiter la performance d'un mur ou d'une toiture de maison.

Une accumulation d'eau a été observée à travers des mesures grandissantes de masses périodiques et des lectures de contenu d'humidité dans les panneaux de revêtement de grandes particules orientés vers l'extérieur (OSB) de chaque boîte de test. Des échantillons de vingt murs de test différents, chacun de 16" de largeur par 16" de hauteur, furent testés dans une chambre climatique sous des conditions de températures froides constantes. Les échantillons de murs étaient originalement composés d'assemblage de cadres en bois de 2x6 avec un revêtement d'OSB. Huit types et épaisseurs de combinaisons de mousse furent testés, alors que chaque combinaison comportait une boîte de test munie d'un pare vapeur de polyéthylène (la série A) et une boîte de

test sans pare vapeur de polyéthylène (la série B). Une neuvième combinaison de boîtes de test A et B étaient munies d'isolant de natte de fibre de verre. La fibre de verre agissait à titre de cas de référence pour les constructions de murs avec encadrement de bois. Deux autres boîtes de tests furent construites, une pour vérifier la performance de la mousse à densité haute et l'autre pour vérifier une mousse retardatrice de flamme sur le gypse extérieur et les poteaux de cloison en acier. Le schéma 3.1 montre les détails de chaque combinaison et sont utilisés.

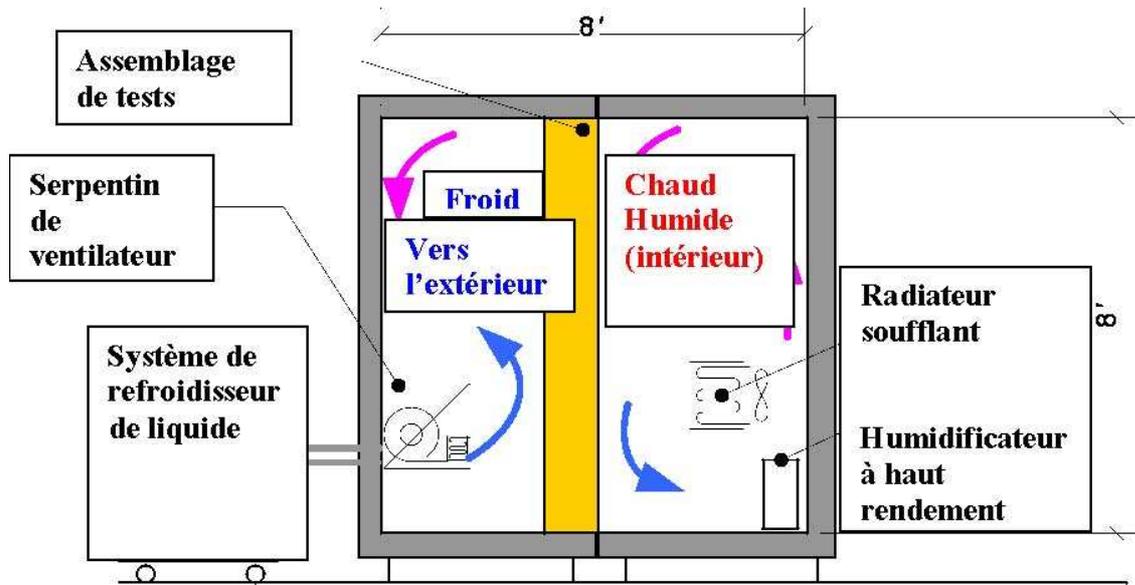


Schéma 3.1: Disposition de la chambre climatique

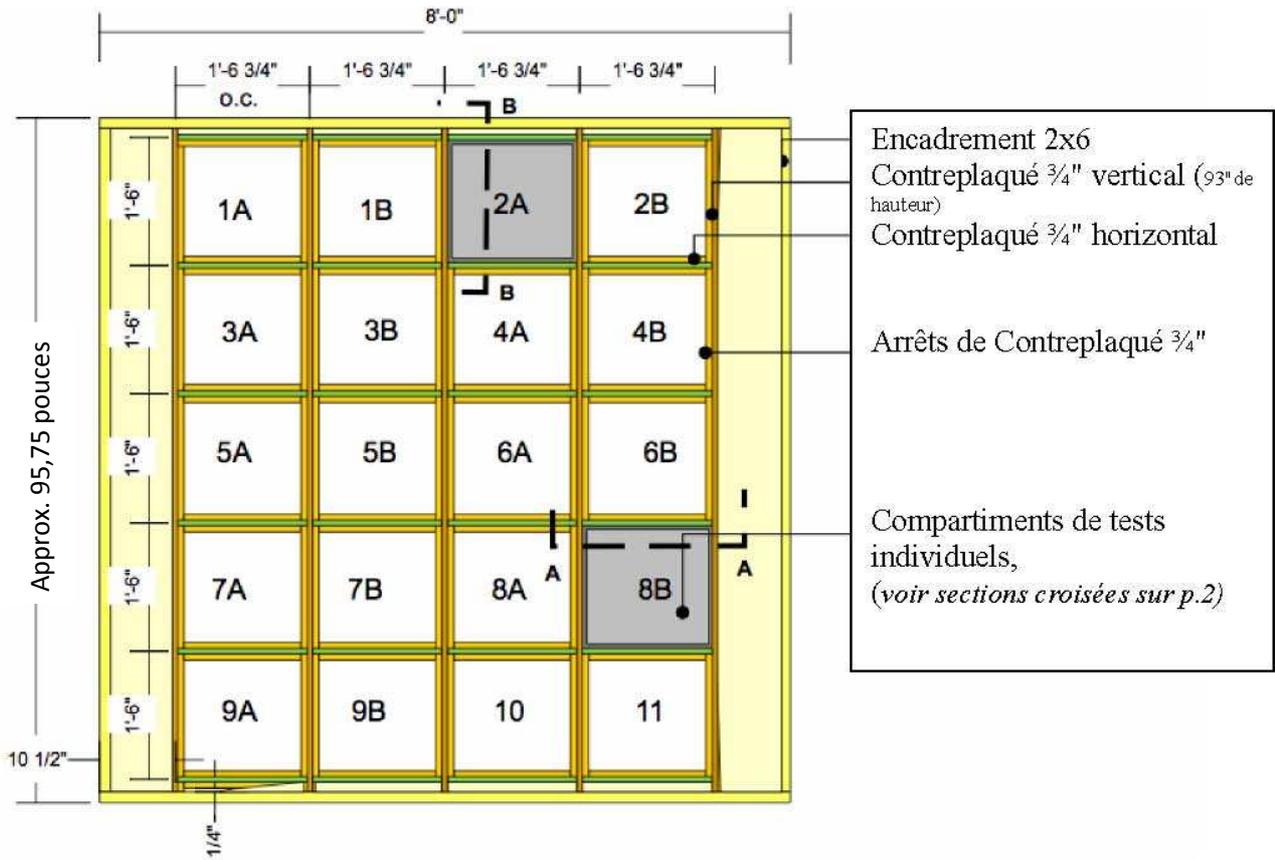


Schéma 3.2: Élévation du cadre de test

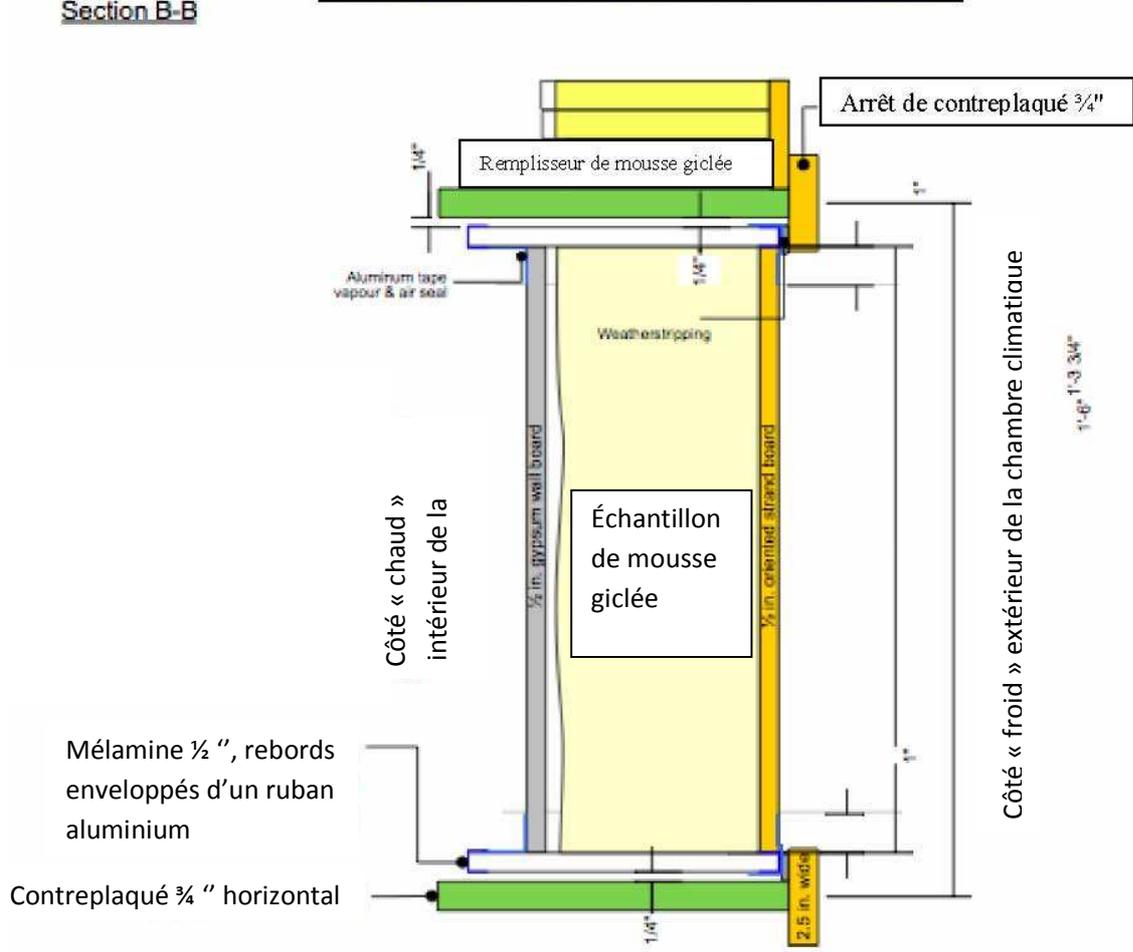
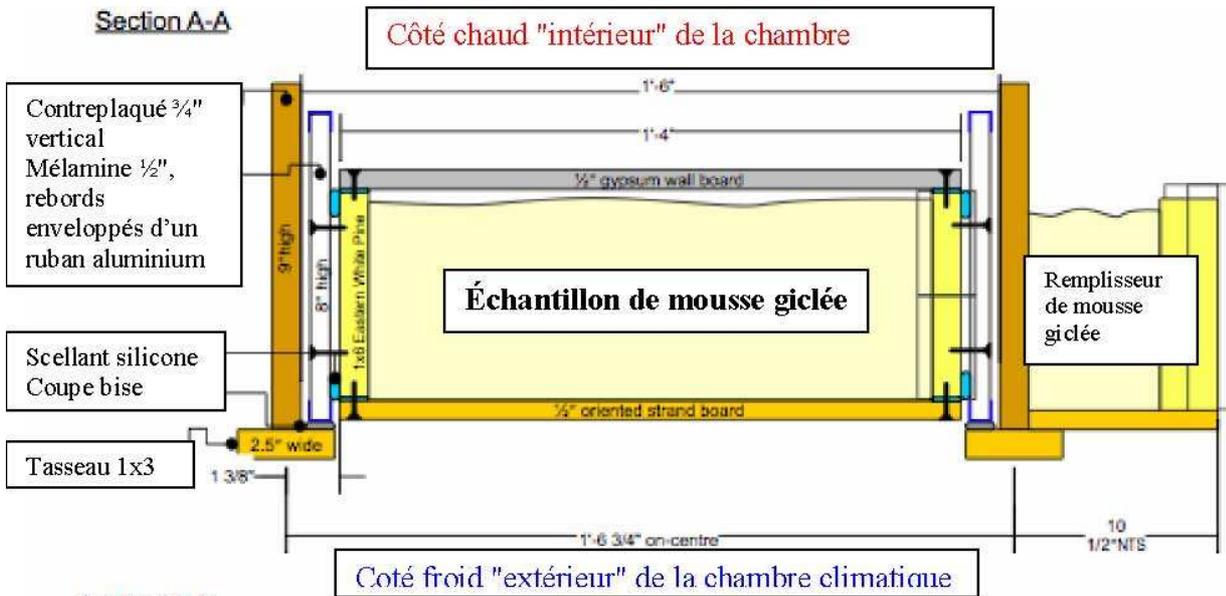


Schéma 3.3: Sections à travers les boîtes de test

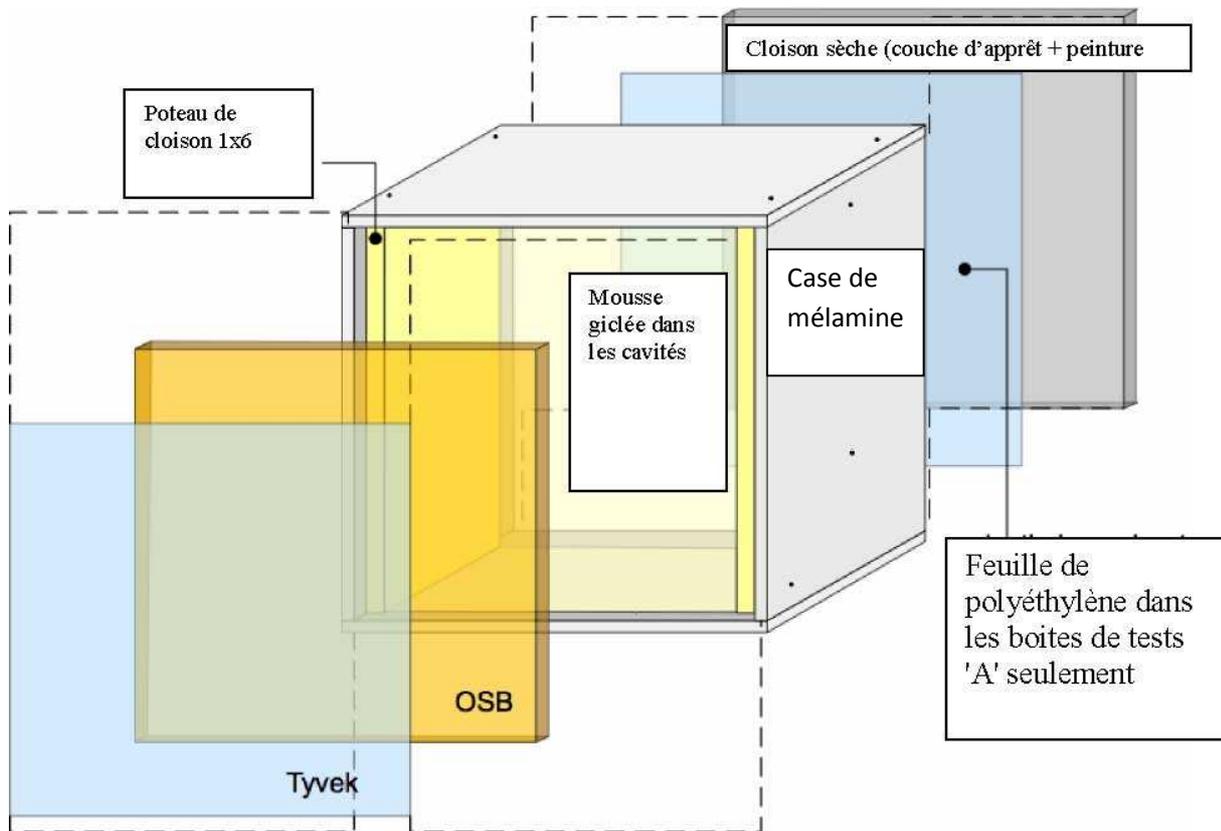


Schéma 3.4: Isométrique éclaté des boîtes de test

Isolation	Boîtes de test avec polyéthylène	Boîtes de test sans polyéthylène	But du test	
<b>Polyuréthane à cellules fermées</b>				
BASF 3.5"	1A	1B	± poly	± mfgr
DOW 3.5"	2A	2B	± poly	
PF7300 3.5"	3A	3B	± poly	± profondeur
PF7300 3.5"	4A	4B	± poly	
Demilec Soya 3.5"	5A	5B	± poly	± profondeur
Demilec Soya 4.5"	6A	6B	± poly	
<b>Polyuréthane à cellules ouvertes</b>				
Demilec 5.5"	7A	7B	± poly	± mfgr
Icynene 5.5"	8A	8B	± poly	
<b>Autre</b>				
Laine de verre	9A	9B	data	
<b>Autres polyuréthanes à cellules fermée</b>				
Polar Foam Classe un 2" min.	-	10	Démonstration commerciale	
Polar Foam 3 pcf densité 2"±	-	11	Rôle de densité	

Tableau 3.1: Sommaire des spécimens de tests

### 3.3.1 Contenu d'humidité et mesures des masses

Les mesures de masse de l'assemblage entier de test furent effectuées avec une balance Sartorius Modèle FBC6CCE-H. Les compartiments devaient fournir une séparation entre les côtés chauds et froids quand les boîtes de test ont été enlevées, autrement, l'air chaud et humide se serait déplacé dans le côté froid, ce qui aurait rendu encore plus difficile le maintien des conditions sous le point de congélation de façon constante. Les boîtes de tests comme telles n'ont pas pu être retirées de la chambre froide afin d'être pesées parce que les conditions de l'air ambiant, dans le laboratoire, auraient immédiatement mené à la formation de condensation sur toutes les surfaces froides de la boîte de test, ce qui aurait eu un effet sur la précision des mesures de masse.

La solution à ces contraintes fut d'enlever les échantillons de l'assemblage de test. Avant qu'une boîte puisse être retirée de l'assemblage, tout le côté chaud de l'assemblage fut recouvert d'un rideau fabriqué à partir d'une feuille de polyéthylène, par-dessus laquelle une planche de polyisocyanurate recouverte sur un côté avec un papier aluminium fut fixée avec des pinces. Cette mesure a servi à minimiser le transfert d'air et de chaleur du côté chaud vers le côté froid lorsqu'une boîte de test était retirée de l'assemblage de test. La boîte de test fut pesée à l'intérieur de la chambre froide en utilisant une balance déposée sur le toit de la chambre (ce qui a permis à la balance de conserver son niveau de température d'opération désiré). Un petit trou fut perforé avec une mèche à travers le plafond et le toit. Une chaîne fut attachée au crochet situé sous la balance. La chaîne descendait directement par le trou perforé à environ un mètre sous le niveau du plafond. Un crochet au bout de la chaîne pouvait supporter le poids d'une boîte de test à l'aide de sa poignée en broche. La chaîne était retirée et le trou recouvert au fur et à mesure que les mesures de masse étaient effectuées.

Après que les mesures de masse aient été complétées, toutes les boîtes de test furent mesurées pour leur contenu d'humidité. Chaque boîte contenait trois paires d'épingles qui avaient été installées sur la face de la boîte pour mesurer le contenu d'humidité. Les épingles fabriquées à partir de clous de laiton ont été insérées de l'extérieur de façon à ce que les pointes non isolées se trouvent sur le côté intérieur du panneau de OSB, ceci étant la surface où on avait prévu qu'un contenu d'humidité serait plus élevé, (Schéma 3.6). Les épingles furent installées en paires espacées de 1 pouce. Un humidimètre DelmhorstJ-4 pour le bois fut attaché aux broches conductrices, lesquelles étaient soudées au bout exposé des épingles pour prendre la lecture du contenu d'humidité.



Schéma 3.5 : Trois épingles installées sur le panneau test d'OSB à travers le Tyvek.

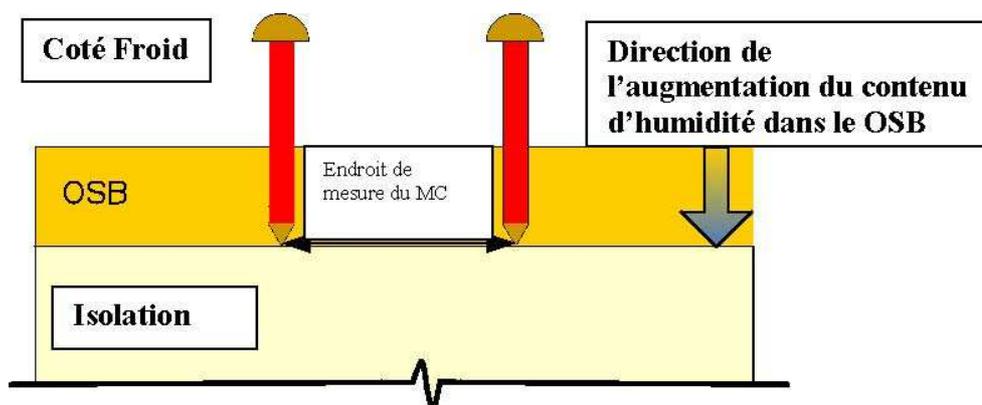


Schéma 3.6: Schéma des épingles d'humidité dans le OSB

### 3.4 Procédure expérimentale

Les lectures du contenu d’humidité et des masses étaient prises et enregistrées environ tous les dix jours. Les mesures de masse furent prises avant le début des tests et à six autres intervalles jusqu’à et incluant le jour final 57. Toutes les boîtes de test furent pesées au début et à la 57<sup>ième</sup> journée et à au moins quatre des six périodes de mesures intercalaires. Généralement, les boîtes qui prédisaient avoir un changement de masse relativement grande pour une certaine période de temps, étaient pesées plus fréquemment. La température dans le côté froid fut maintenue à l’aide de deux refroidisseurs pour liquides. Au jour 47, un des refroidisseurs a fait défaut et la température du côté froid a monté à environ 0 C.

### 3.5 Résultats

#### 3.5.1 Mesures gravimétriques

Le schéma 3.7, montre la masse d’accumulation d’eau dans la série A des boîtes de test qui contenaient un pare vapeur complet de polyéthylène entre la plaque de plâtre et l’isolation. Les gains de masse dans les boîtes de test étaient dans un rayon de 100 g pour la période des 57 jours de tests.

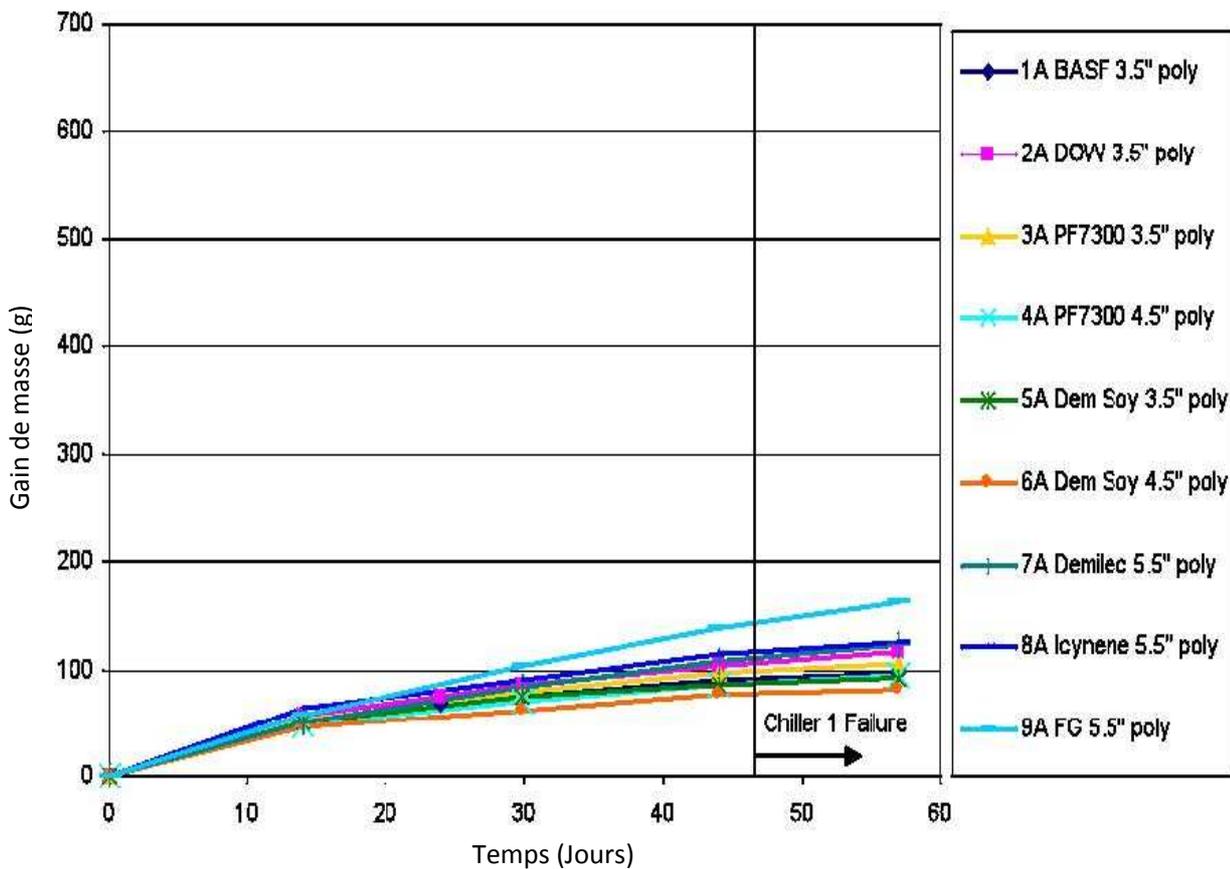


Schéma 3.7 : Masse d’accumulation d’eau de la série A des boîtes de test avec pare vapeur polyéthylène

Le deuxième tableau, schéma 3.8, montre les résultats des boîtes de test pour la série B qui n'avaient pas de pare vapeur de polyéthylène. Les échantillons de fibre de verre (9B) et de MPG à cellules ouvertes (7B et 8B) ont les plus hautes valeurs de perméance à la vapeur et les plus importants gains de masse pour la période de test. La moyenne des gains de masse pour les boîtes de test avec la plus basse perméance étaient dans un rayon de 200 g, presque le double des gains notés dans les boîtes de la série A.

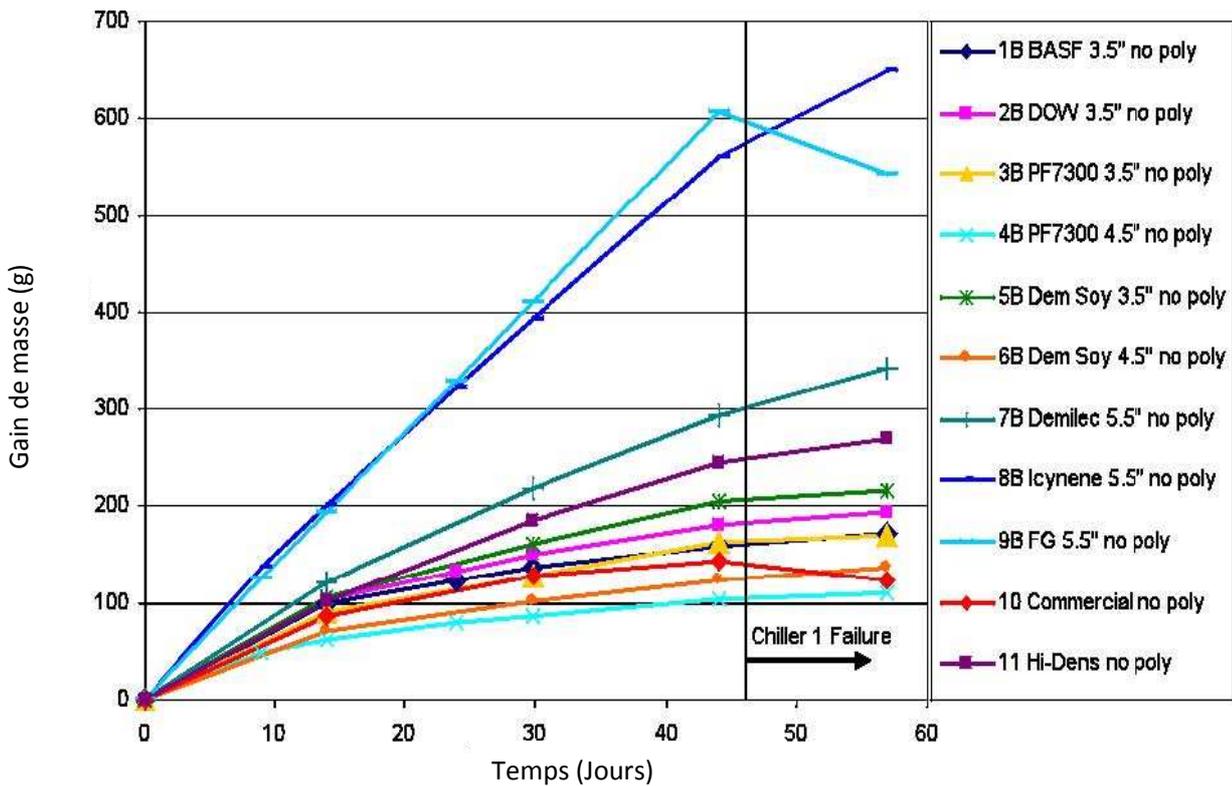


Schéma 3.8 : Masse d'accumulation d'eau de la série B des boîtes de test sans pare vapeur polyéthylène

### 3.6 Mesures du contenu d'humidité

L'humidimètre Delmhorst pour mesurer l'humidité du bois fait passer un léger courant électrique à travers le bois et mesure la résistance électrique du bois entre les deux épingles. L'eau a une résistance inférieure au bois sec et le courant électrique suit le chemin qui présente le moins de résistance, c'est pourquoi la mesure se produit à la partie la plus trempée du OSB (schéma 3.6). Dans le cas présent, le OSB est plus trempé sur le côté intérieur ce qui correspond au point d'intérêt principal de l'expérience. Le revêtement des épingles tend à isoler davantage la lecture du côté intérieur au cas où il y aurait eu des anomalies dans le dépôt d'eau ou dans la structure de l'OSB.

L'humidimètre Delmhorst est calibré de façon à baser toutes les lectures de contenu d'humidité en termes du sapin de Douglas à 70°F. Chaque lecture MC fut corrigée pour les espèces et la température étant donné que le matériau était du OSB et que la température était typiquement de -10°C lors de la prise de mesures. L'équation 3-1 de Garrahan (1988) calcule la température corrigée à partir de la mesure MC non corrigée, la température au moment où elle a été prise par le MC et deux espèces-facteurs de régression dépendants. Les produits de bois d'ingénierie tel que le

contreplaqué et l'OSB peuvent faire partie d'espèces difficiles à identifier, c'est pourquoi les coefficients génériques pour ces produits ont été développés. Straube, Onysko and Schumacher (2002) ont publié les valeurs pour les coefficients de régression de  $a = 1.1114$  et  $b = 0.366$  pour l'OSB.

$$MC_c = \frac{\left( \frac{MC_u + 0.567 - 0.0260t + 0.000051t^2}{0.881(1.0056^t)} \right) - b}{a} \quad \text{Equation 3-1}$$

- $MC_c$  [%] Contenu d'humidité corrigé
- $MC_u$  [%] Lecture du contenu d'humidité non corrigé
- $t$  [°C] Température du bois
- $b = a, b$  [-] Espèces –coefficients de régression dépendants:  $a = 1.1114, 0.366$

Les mesures moyennes corrigées du MC du OSB dans chaque échantillon de test du OSB sont présentées aux schémas 3.9 et 3.10.

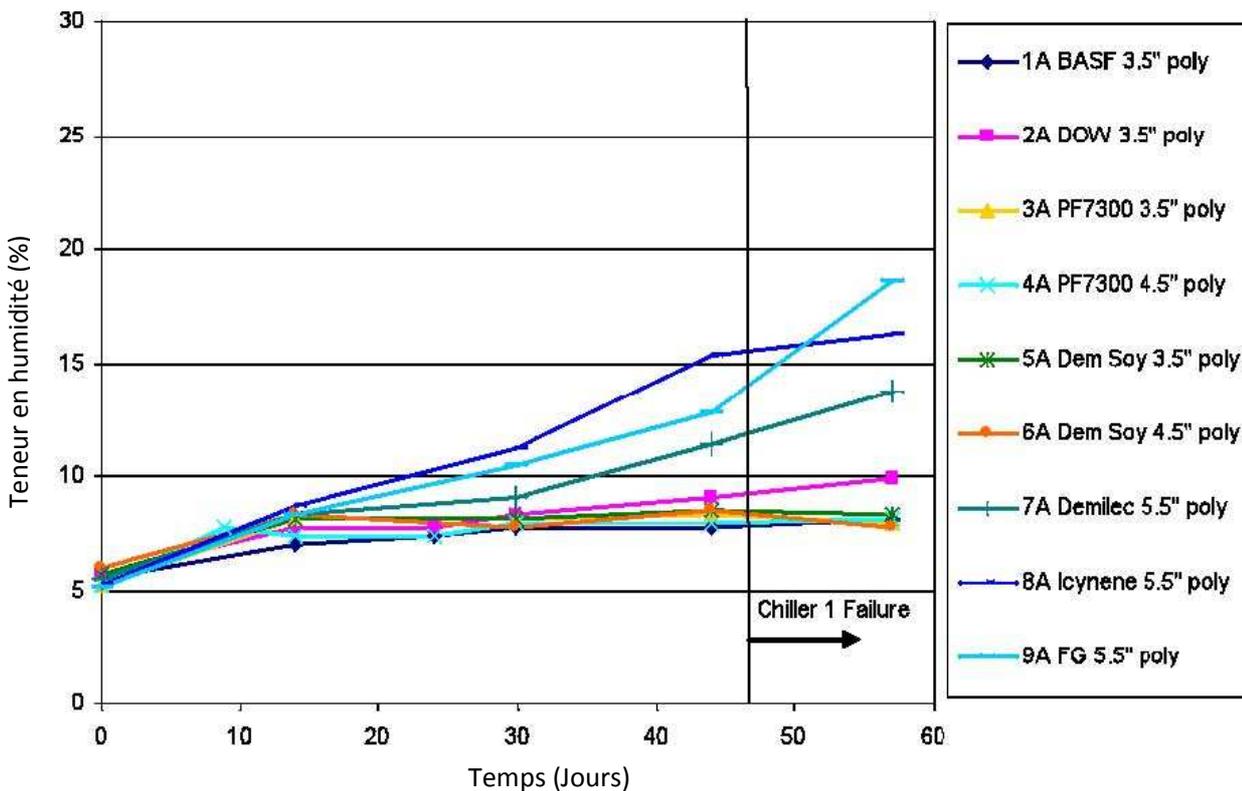


Schéma 3.9 : MC corrigés du OSB de la série A des boîtes de test avec pare vapeur polyéthylène

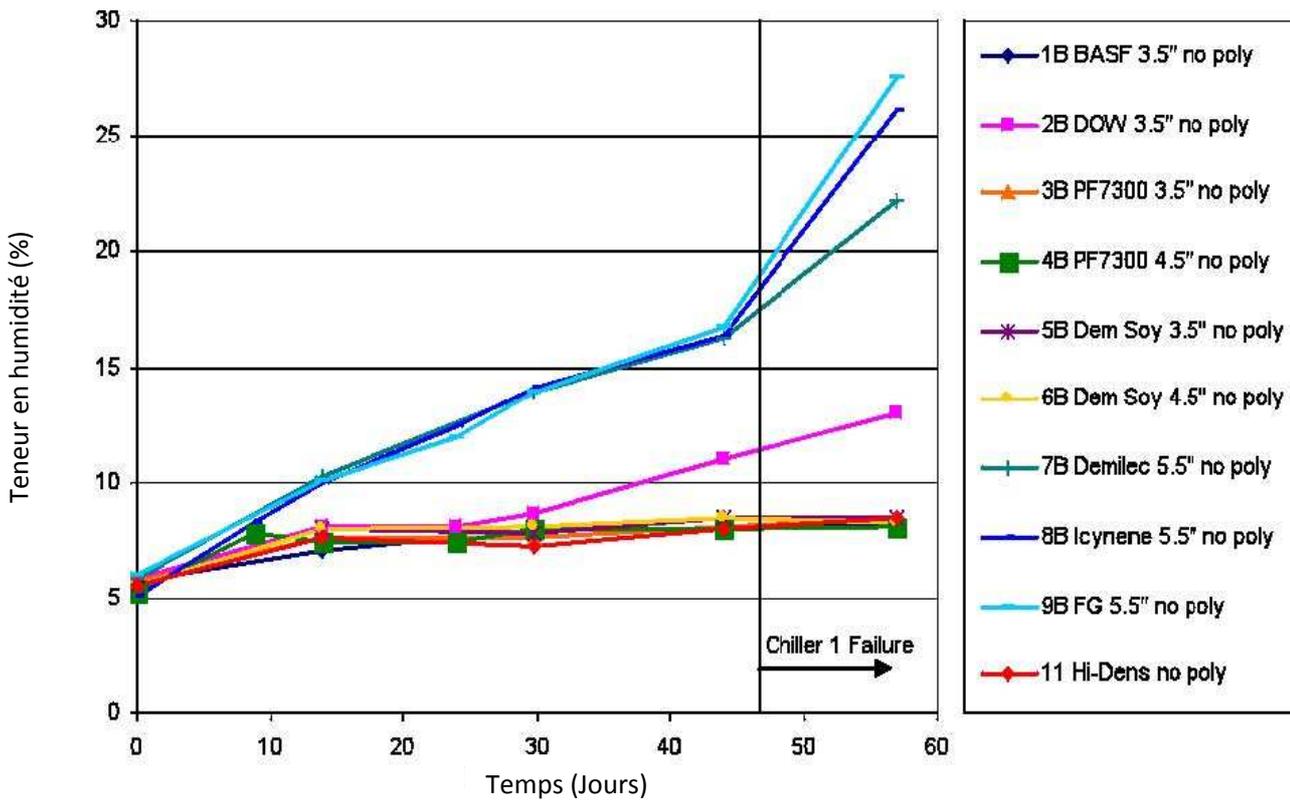


Schéma 3.10 : MC corrigés du OSB de la série B des boîtes de test sans pare vapeur polyéthylène

### 3.7 Analyses

La première conclusion que l'on peut tirer des ces tests est que l'utilisation de pare vapeur de polyéthylène ne présente pas l'augmentation de contenu d'humidité du revêtement ou de l'ensemble de l'augmentation d'humidité des échantillons de test. Ceci est dû à l'absorption de vapeur d'eau dans l'OSB provenant du côté froid de la chambre climatique vers l'OSB.

Le contenu d'humidité de l'OSB est demeuré dans un rayon sécuritaire même après 50 jours de conditions extrêmes pour tous les échantillons de murs de MPG à cellules fermées. La présence ou l'absence de polyéthylène n'a pas eu d'effet notable sur le contenu d'humidité du revêtement d'OSB. Le mur avec la fibre de verre a montré un gain de masse très significatif et une augmentation du MC dans le OSB lorsque le pare vapeur de polyéthylène n'était pas utilisé. Les deux murs de MPG à cellules ouvertes ont aussi montré une absorption d'humidité accrue, cependant, un peu moins que la fibre de verre. Même si les murs avec la fibre de verre et la mousse à cellules ouvertes ont performé avec et sans polyéthylène, ils ont absorbés significativement plus d'humidité dans le OSB même avec le polyéthylène que ceux avec la MPG à cellules fermées. Une observation intéressante notée dans les tests de la chambre climatique pour le sous-système du matériau est que le HCFC-245 de la mousse giclée s'est essentiellement comporté de la même façon que le produit "legacy HCFC-141b". La perméance à la vapeur de la nouvelle génération semble être un peu inférieure à la précédente.

## 4 Modélisation

Les mesures sur le terrain présentées au chapitre 2 ont démontré qu’une application prudente du modèle hygrothermique du WUFI permettait de prédire la performance de vrais murs. Les mesures de la chambre climatique sont venues appuyer le résultat attendu, à l’effet que chacun des échantillons de produit des deux classes de polyuréthane giclé (2 pcf et 1/2 pcf) se comportaient de façon similaire aux autres produits de même classe. Ce chapitre du rapport démontre que les résultats du programme expérimental s’appliquent à un grand éventail de types de murs et de climats.

### 4.1 Approche de modélisation

Sept assemblages de murs, contenant différents types de MPG furent modélisés de façon paramétrique pour différents climats canadiens, (basé sur les résultats des tests physiques décrits ci-dessus). Basé sur les premières modélisations, et les résultats des études sur le terrain, il était clair que le pire scénario pour la diffusion d’humidité dans les températures froides provenait toujours d’une orientation face au nord (à cause du manque de radiations solaires pour réchauffer cette orientation). De façon similaire, les parements légers et de couleurs claires absorbent les dernières radiations solaires, ont les températures les plus froides au niveau du revêtement, et de ce fait sont sujets à un plus grand taux d’humidité hivernal dû à la diffusion. Sept types de murs furent considérés. Le mur 7 considère la performance du mur à travers un encadrement d’éléments solides tels que : poteau de cloison, solives, plaques ou linteaux.

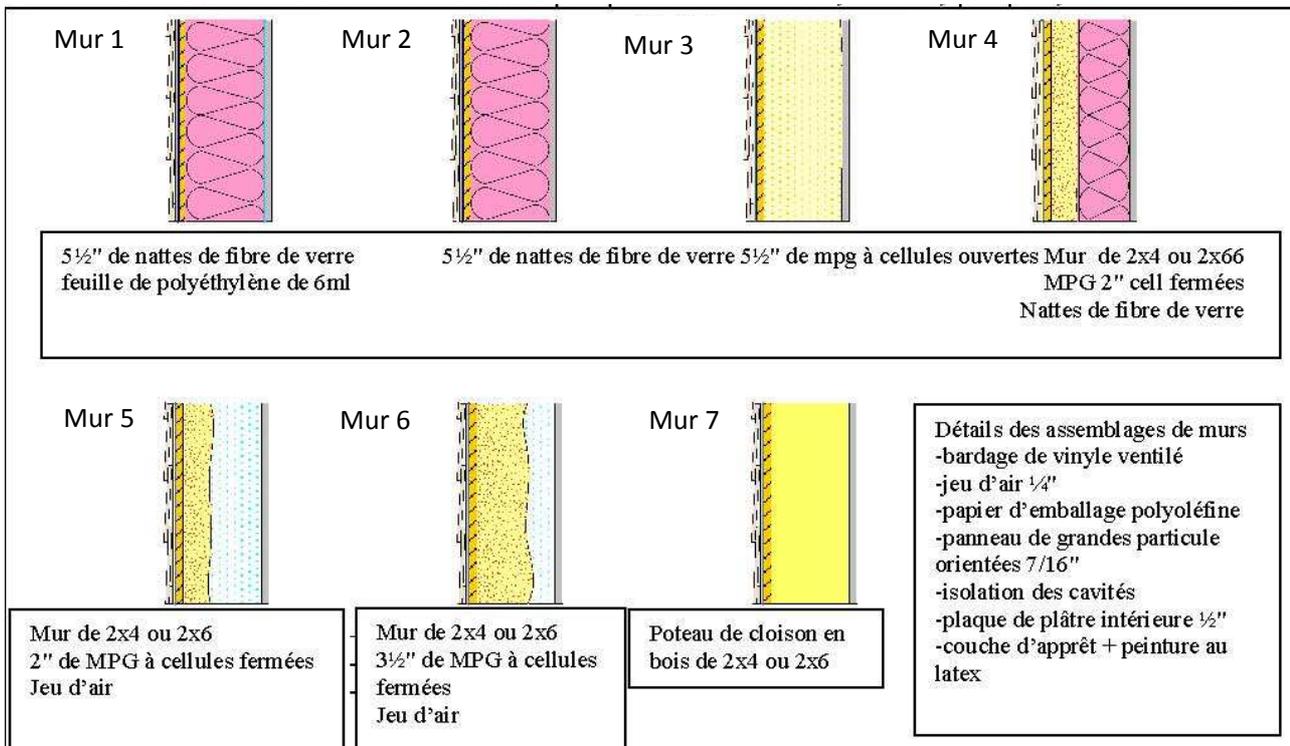
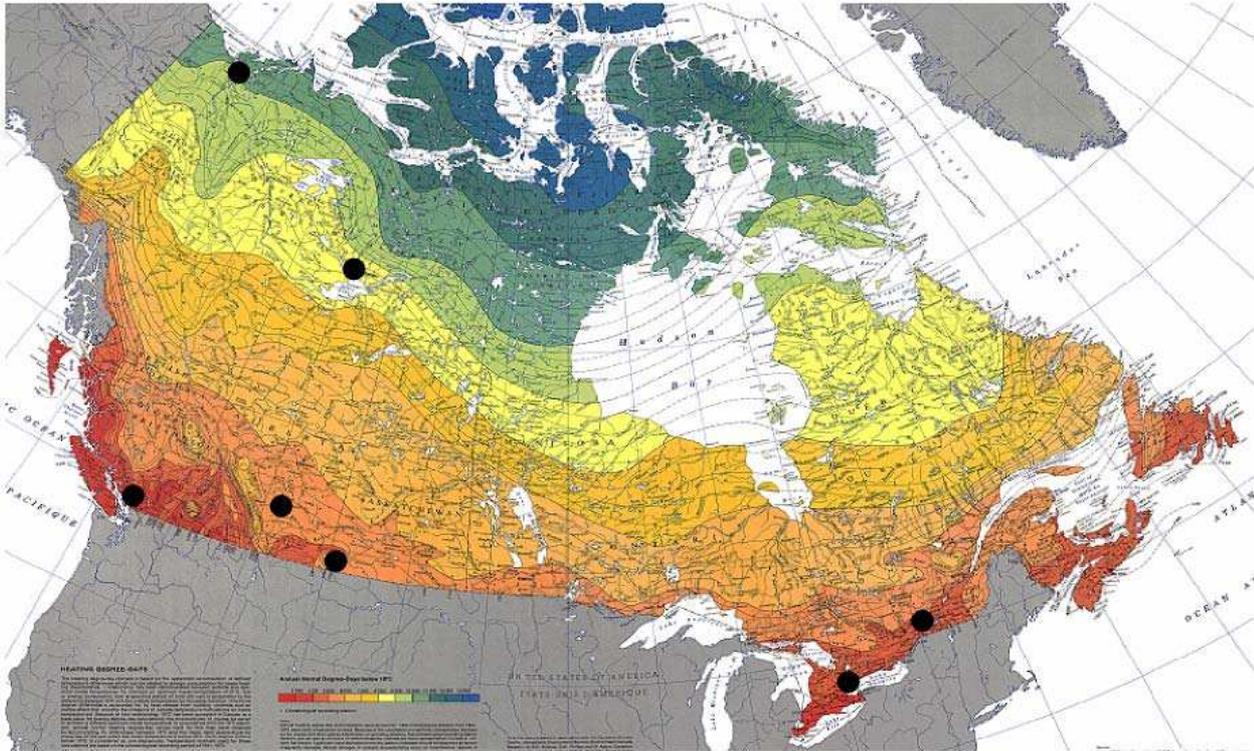


Schéma 4.1: Sections transversales de types de murs modélisés

## 4.2 Climat extérieur

Tous les cas de simulations furent effectués pour sept climats canadiens différents. Les climats furent catégorisés selon les degrés jours de chauffage qui se retrouvaient sous 18°C. Les degrés jours de chauffage (DJC) sont calculés en faisant la somme de degrés moyens de chaque jour où la température est sous 18°C pour un historique de données de températures d’une année complète. Le total de ce calcul équivaut à la mesure de combien de chaleur annuelle est requise dans un endroit particulier (Schéma 4.2).



**Schéma 4.2 : Degrés jours de chauffage au Canada et villes de simulation (Atlas national du Canada 5<sup>e</sup> édition)**

Au Canada, les endroits les plus peuplés sont dans un rayon de 3000 à 6000 DJC, cependant les communautés de la partie nord sont dans un rayon de 6000 à 10,000 DJC, tableau 4.1. Les données de degrés de chaleur proviennent de la base de données en ligne d’Environnement Canada pour les *Climats Canadiens Normaux 197 1-2000* (Environnement Canada, 2008). La ville associée à chaque catégorie de climat est un endroit représentatif seulement (voir les points noirs sur la carte schéma 4.2). Les résultats des simulations dans une catégorie donnée s’appliquent aux autres endroits géographiques dont les valeurs DJC sont dans un même rayon. Le cœur des populations urbaines des villes listées au tableau 4.1 représente plus de 60% de la population canadienne, basé sur les données du recensement de Statistiques Canada de 2006.

Les sept endroits climatiques utilisés dans ces simulations sont listés au tableau 4.2 avec un DJC nominal pour la catégorie et le DJC réel, relevé du fichier climatique utilisé dans la simulation du WUFI pour cet endroit en particulier. Prendre note que les valeurs DJC du fichier WUFI et ceux des climats normaux d’Environnement Canada ne sont pas les mêmes. Les deux valeurs sont

dérivées de deux groupes de données différentes, cependant elles se retrouvent à l'intérieur d'un rayon de DJC prescrits pour la catégorie. Le tableau liste aussi les conditions générales pour la température, l'humidité relative et les chutes de pluie afin de présenter un aperçu de combien les climats diffèrent les un des autres.

Chaque fichier climatique du WUFI contient un groupe de données pour un an d'informations sur les températures horaires, l'humidité relative, la vitesse du vent, la direction du vent, les quantités de pluie tombée, la pression de l'air, les couvertures nuageuses, les radiations solaires et les radiations à grandes ondes.

**Tableau 4.1: Villes Canadiennes par catégorie de climat**

<b>DJC Catégorie de climat (avec rayon)</b>	<b>Endroit représentatif (avec DJC )</b>	<b>Quelques villes dans ce rayon (avec DJC)</b>
<b>DJC 3000</b> (à 3500)	Vancouver (2926)	White Rock (2782) Abbotsford (2981) Victoria (3040)
<b>DJC 4000</b> (3501 à 4250)	Toronto (4065)	Windsor (3524) Niagara Falls (3661) Kelowna (3869) Oshawa (3917) Hamilton (4012) Halifax (4030) London (4057)
<b>DJC 4500</b> (4251 à 4750)	Ottawa (4602)	Kitchener-Waterloo (4288) Kingston (4289) Montréal (4518) Moncton (4585) Charlottetown (4715)
<b>DJC 5000</b> (4751 à 5500)	Calgary (5108)	St. John's (4881) Trois-Rivières (4929) Prince George (5132) Sherbrooke (5151) Québec City (5202) Sudbury (5343)
<b>DJC 6000</b> (5501 à 7000)	Winnipeg (5777)	Regina (5660) Edmonton (5708) Thunder Bay (5717) Saskatoon (5852) Whitehorse (6811)
<b>DJC 8000</b> (7001 à 9000)	Yellowknife (8256)	Dawson (8166)
<b>DJC 10,000</b> (900 1+)	Inuvik (9767)	Iqaluit (10117) Resolute (12526)

**Tableau 4.2: Statistiques de climat sommaire pour les simulations de villes du WUFI**

Endroits représentatifs	Vancouver	Toronto	Ottawa	Calgary	Winnipeg	Yellowknife	Inuvik
Degré de chaleur journaliers nominal (<18°C)	3000	4000	4500	5000	6000	8000	10,000
DJC<18°C du fichier climatique du WUFI	3056*	4022*	4874*	5384*	6377*	8243**	9935**
Température moyenne °C	9.1	6.7	5.2	2.5	1.2	-4.5	-9.2
Température max. °C	27.2	32.8	36.1	30.6	33.9	27.8	28
Température min. °C	-11.1	-23.3	-28.3	-36.7	-45.0	-42.8	-47.2
Humidité relative moyenne %	78	76	67	63	73	66	67
Humidité relative max. %	100	100	100	100	100	100	100
Humidité relative min. %	14	21	18	14	19	17	24
Quantité de pluie normale, mm/année	1169	606	586	304	309	161	114

\*Fichiers climatiques du WUFI dérivés de ASHRAE International Weather for Energy Calculations (IWEC). Tous

les fichiers sont en versions "années froides".

\*\*Fichiers climatiques du WUFI dérivés d'une année météorologique typique (TMY2) groupe de données du National Solar Radiation Data Base 1961 -1990.

### 4.3 Climat intérieur

La température pour les conditions intérieures dans toutes les simulations était réglée à 22°C avec une variation annuelle de 1°C, schéma 4.3. Chaque catégorie de climat fut modélisée à partir de trois conditions de climats intérieurs – Humidité relative basse, moyenne et haute (Tableau 4.3). Le chiffre réellement utilisé pour le réglage de la température intérieure dépendait de la catégorie de climat. Par exemple, une humidité relative intérieure basse de (30%) dans un climat plus chaud et pluvieux comme Vancouver est plus haut que ce qui serait considéré comme une humidité relative intérieure basse (20%) dans un climat nordique froid comme Yellowknife.

**Tableau 4.3: Catégories pour l’humidité relative intérieure**

<b>Catégories de climat</b>	<b>HR Basse *</b>	<b>HR Moyenne*</b>	<b>HR Élevée</b>
DJC 3000 Vancouver DJC 4000 Toronto DJC 4500 Ottawa DJC 5000 Calgary DJC 6000 Winnipeg	30% to 55%	40% to 60%	50%
DJC 8000 Yellowknife DJC 10,000 Inuvik	20% to 50%	30% to 55%	50%
Description des conditions possibles dans cette catégorie d’HR	-constructions plus vieilles avec courants d’air -édifices plus récents avec ventilation mécanique -peu d’activité d’occupation contribue à la charge d’humidité – il y a rarement de condensation sur aux fenêtres ordinaires pendant une vague de froid	-construction plus hermétique -humidificateur mécanique en opération -charges d’humidité élevées dû à beaucoup de cuisson, lavage, et entreposage de bois de chauffage -la condensation se forme souvent sur les fenêtres ordinaires pendant les vagues de froid	-niveaux d’HR généré mécaniquement sont constamment élevés l’année durant -des exemples sont : les piscines intérieures, les hôpitaux, les musés -la condensation se forme constamment sur les fenêtres ordinaires pendant les vagues de froid

\*Échelle de Variation saisonnière – en bas de l’échelle en hiver, en haut de l’échelle en été

Les variations saisonnières des catégories d’HR basses et moyennes suivent une formation d’onde sinusoïdale qui mène au sommet de l’échelle, ce qui se produit le 1<sup>ier</sup> Août, sélectionné comme étant le point culminant de l’été. Le bas de l’échelle se produit six mois plus tard le 1<sup>ier</sup> février, le point le plus bas de l’hiver. Les conditions climatiques intérieures pour la catégorie de basse HR qui sont de 30 à 50% sont montrées dans le portrait de l’écran du WUFI, voir le schéma 4.3.

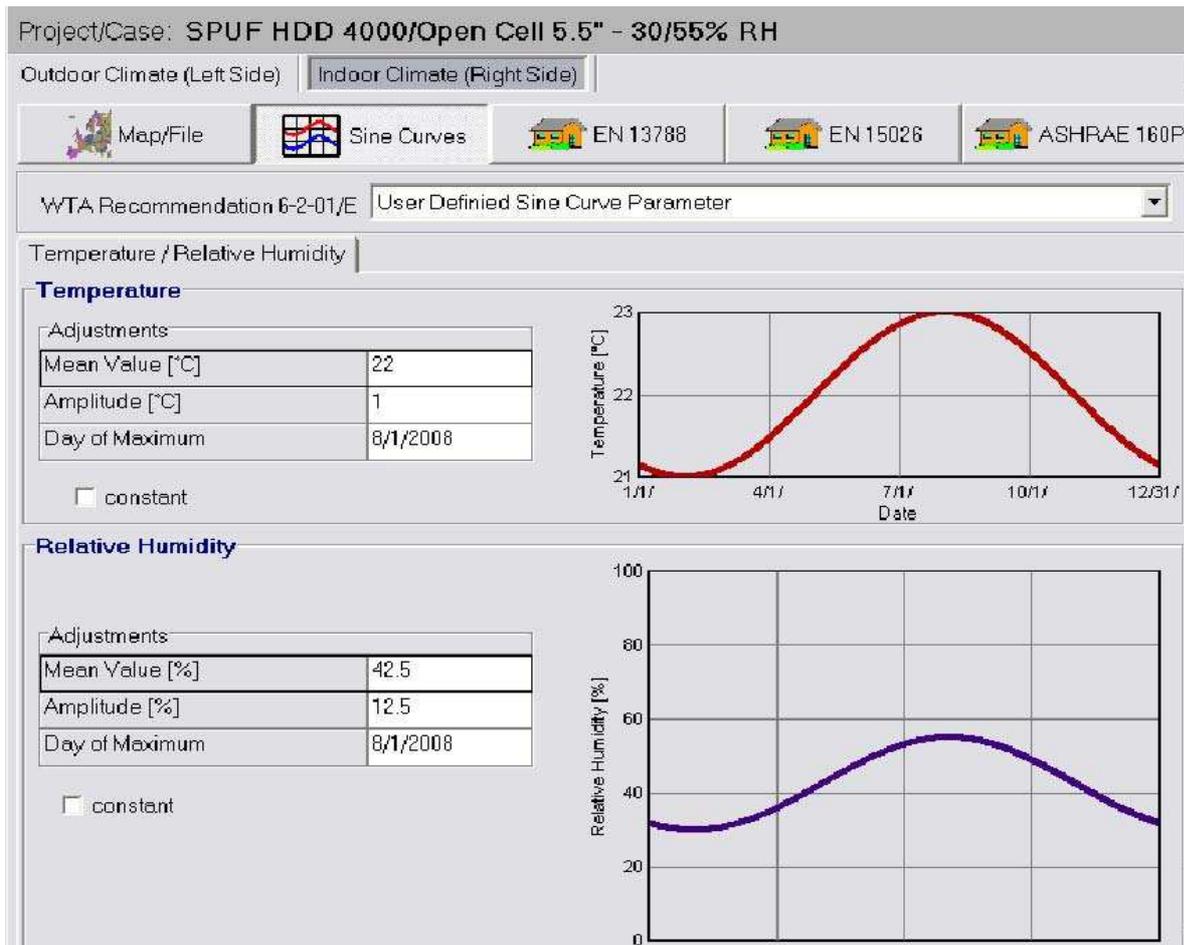


Schéma 4.3 : Exemple de WUFI catégorie basse HR 30-50%

#### 4.4 Procédures de simulations

Toutes les simulations pour les murs ont débuté à partir d’une température constante de 22°C à travers toutes les composantes. Les seules couches qui contenaient initialement une humidité appréciable étaient celles de l’OSB (à 55 kg/m<sup>3</sup> ou 8.5% de contenu d’humidité en état de masse sèche) et les poteaux de cloison en bois (à 30 kg/m<sup>3</sup> ou 6% de contenu d’humidité en état de masse sèche). Ces réglages correspondent à l’échelle typique de 4% à 10% de contenu d’humidité pour les matériaux de bois dans des conditions de pré construction (Morris 1998).

La période de modélisation représentait une année du 01 août 2007 au 01 août 2008 en épisodes d’une heure. Le mois d’août fut choisi comme mois de départ car il représente typiquement une année complète dans les tracés de valeurs de contenu d’humidité pour le revêtement extérieur en bois. Une date de départ en août permet aux sommets de contenu d’humidité annuel hivernal d’être tracés au milieu du graphique, ce qui s’avère utile étant donné qu’ils sont le point d’intérêt de l’étude. Les simulations ont pris place jusqu’à ce qu’un niveau d’équilibre ou état statique soit atteint. Ceci a été défini comme le point où le contenu d’humidité du revêtement était égal au contenu d’humidité de l’année précédent.

Propriétés Thermiques	Materiaux variés avec le type d'assemblage				Materiaux dans chaque assemblage			
	Laine de verre	Polyuréthane à cellules fermées*	Polyuréthane à cellules ouvertes*	Polyéthylène Pare-vapeur	Panneau de gypse	Panneau de particules (OSB)	Pare-air	Déclin de vinyle ventilé
Conductivité Thermique, Sec W/m•k	0.14	0.09	0.14	0.001	0.013	0.011	0.0002	0.004
Résistance thermique - métrique, m²• K/W	5.5	3.5	5.5	6 mil	0.5	11/17	1/128	1/64
Résistance thermique - impériale, hr•ft²•° F/Btu	22.7	14.6	18.9	0.0	0.4	0.7	0.0	0.0
Propriétés pare-vapeur								
Facteur de résistance de diffusion de vapeur d'eau	1.30	1.30	5.80	50000	8.3	812.8	328.4	0.05
Épaisseur de diffusion de vapeur	0.2	0.1	0.8	50.0	0.1	9.0	0.1	0.0002
Perméabilité, ng/Pa•s•m	142.3	142.3	31.9	0.004	22.3	0.2	0.6	3700
Perméance, ng/Pa•s•m²	1016	1581	228	4	1755	20	2817	925000
Autres propriétés								
Densité en vrac, kg/m³	30	39	7.5	130	850	650	448	2400
Porosité, m³/m³	0.99	0.99	0.99	0.001	0.6	0.95	0.001	0.01
Capacité spécifique de chaleur, J/kg•K	840	840	1470	2300	850	1880	1500	1000

\*Valeurs moyennes pour BASF, Demilec Airmetric Soya, Dow et Polar Foam  
 \*\*Valeurs moyennes pour Demilec Sealection 500 et Icynene Gold Seal  
 † Déclin de couleur clair

Schéma 4.4

Moisture Content (MC) in Wood Exterior Sheathing Subjected to Various Canadian Climates and Interior Relative Humidities																	
Chart values are %MC by dry mass of wood and represent a predicted maximum annual value																	
		= MC < 20%, no mold growth		= MC is 20 to 28%, potential for mold growth		= MC > 28%, moisture problems expected, this design is NOT recommended											
		Vancouver		Toronto		Ottawa		Calgary		Winnipeg		Yellowknife		Inuvik			
		HDD 3000		HDD 4000		HDD 4500		HDD 5000		HDD 6000		HDD 8000		HDD 10000			
Wall Construction		Low RH 30/55%	Med. RH 40/60%	High RH 50%	Low RH 30/55%	Med. RH 40/60%	High RH 50%	Low RH 30/55%	Med. RH 40/60%	High RH 50%	Low RH 30/55%	Med. RH 40/60%	High RH 50%	Low RH 20/50%	Med. RH 30/55%	High RH 50%	
Contents of Cavity		Type of Vapour Control		Type of Vapour Control		Type of Vapour Control		Type of Vapour Control		Type of Vapour Control		Type of Vapour Control		Type of Vapour Control		Type of Vapour Control	
Fiberglass (FG)	5.5"	12%	12%	11%	10%	10%	10%	9%	9%	10%	10%	11%	11%	10%	10%	10%	10%
	5.5"	14%	18%	21%	10%	27%	33%	22%	28%	35%	27%	37%	43%	35%	43%	46%	46%
	5.5"	14%	15%	17%	16%	20%	23%	16%	20%	22%	21%	25%	27%	24%	28%	29%	29%
Open Cell	Spray Polyurethane Foam (SPF)	2'SPF +3.5'FG <sup>1</sup>	13%	14%	12%	11%	12%	10%	11%	13%	13%	13%	13%	12%	12%	12%	12%
		2'SPF in 3.5/5.5"	12%	13%	11%	10%	12%	12%	10%	11%	12%	13%	13%	12%	12%	12%	12%
		3.5" SPF in 3.5/5.5"	12%	13%	13%	10%	11%	11%	9%	10%	10%	12%	12%	12%	11%	11%	12%
Wood Stud <sup>2</sup>	3.5" or 5.5"	7%	7%	7%	5%	6%	6%	5%	5%	5%	6%	7%	7%	7%	7%	5%	6%
Other Applicable Locations (Heating Degree Days below 18°C)		Vancouver (2926) Abbotsford (2981) Victoria (3040)		Windsor (3524) Niagara Falls (3661) Kelowna (3869) Ostawa (3917) Hamilton (4012) Halifax (4030) London (4057) Toronto (4065)		Kitchener-Waterloo (4288) Kingston (4289) Montreal (4518) Moncton (4585) Ottawa (4602) Charlottetown (4715)		St. John's (4881) Trois-Rivières (4929) Calgary (5108) Prince George (5132) Sherbrooke (5151) Quebec City (5202) Sudbury (5343)		Regina (5662) Edmonton (5708) Thunder Bay (5717) Winnipeg (5777) Saskatoon (5852) Whitehorse (6811)		Yellowknife (8256)		Inuvik (9767) Iqaluit (10117) Resolute (12526)			
From Environment Canada's Canadian Climate Normals 1971-2000																	

Schéma 4.5 : Modèle des résultats

**General Notes:**

- a. Walls are residential wood frame with light-colored, thin cladding facing north; this is a worse-case scenario for cold-weather diffusion wetting
- b. Results are for OSB sheathing. Plywood sheathing values will be equal or lower. OSB permeance is always over 60 ng/Pa·s·m<sup>2</sup> in exterior sheathing applications.
- c. Sheathings of DensGlas, FiberBoard, and Gypsum Board are all very vapor permeable and hence will have lower moisture contents
- d. Thicker foam will always result in lower wintertime sheathing moisture contents
- e. Effective Air Barrier is assumed to be installed, as is proper rain control

**Specific notes:**

- 1. Apply SPF directly onto back of exterior sheathing
- 2. MC values are for outer 1/2" of wood stud
- 3. Closed Cell SPF should be applied in total thicknesses of more than 2" (50 mm), usually in lifts of no more than 2" (50 mm)

## 5 Conclusions et Recommandations

L'objectif de ce projet de recherche était de fournir des recommandations basées sur des preuves scientifiques sérieuses et sur la nécessité de contrôle additionnel de la vapeur, à la fois pour la MPG à cellules ouvertes de densité basse et de la MPG à cellules fermées de densité moyenne installées dans les encadrement de murs d'une grande diversité de types d'occupations et de climats froids.

Le Code National du Bâtiment du Canada spécifie que les pare vapeur ne sont pas requis quand : « On peut démontrer que la diffusion non contrôlée de la vapeur n'aura pas d'effet nocif sur, (a) la santé ou la sécurité des usagers de l'édifice, (b) l'utilisation prévu de l'édifice, ou (c) sur l'opération des services de l'édifice ».

La recherche a démontré l'habileté des murs typiques avec encadrement en bois utilisant la mousse de polyuréthane giclée à titre d'isolation, avec et sans couches additionnelles de pare vapeur, de rencontrer ses exigences dans au moins quelques un des climats Canadiens pour des murs munis de couches de revêtement extérieur, de membranes, de parement et d'autres couches avec une perméance de plus d'approximativement  $60 \text{ ng/Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$ .

La mousse giclée à cellules fermées (environ 2 livres de densité par pied cube ou plus) appliquée à une épaisseur de plus de 2" (50 mm) contrôlera la diffusion de vapeur à des niveaux sécuritaires dans tous les climats jusqu'à 10000 DJC et une humidité relative intérieure hivernale jusqu'à et au dessus de 50%HR. Au fur et à mesure que l'épaisseur augmente, le niveau de contrôle augmente également. Le contrôle de la diffusion était égal ou meilleur que dans les murs avec les traditionnelles nattes de fibre de verre et de polyéthylène.

La mousse à cellules ouvertes (1/2 livre de densité par pied cube) peut contrôler la diffusion dans des climats qui ne sont pas trop froids (exemple à moins de 4500 DJC<sup>18</sup>) lorsque le niveau d'HR hivernal intérieur est contrôlé par une ventilation appropriée à moins d'environ 40%HR. La mousse à cellules ouvertes n'a pas suffisamment de contrôle sur la vapeur dans les climats très froids (4500 DJC et plus) à moins que l'humidité relative hivernale intérieure soit strictement contrôlée (à moins d'environ 30%HR).

Pour l'un ou l'autre des types de mousse, l'encadrement de bois fournit suffisamment de résistance inhérente à la vapeur pour maintenir le contenu d'humidité à l'intérieur d'un niveau sécuritaire même dans des climats extérieurs très froids (10 000 DJC) et des conditions d'humidité intérieures très élevées (50%HR en hiver).

Quant aux murs fabriqués de toute sortes de matériaux, un assemblage de pare air fonctionnel doit être présent, de même qu'un contrôle pour la pluie, du feu, d'une suffisance structurale, etc.

Le programme de modélisation hygrothermique du "one-D WUFI" fut validé comme un outil efficace et précis pour prédire le contenu d'humidité du revêtement dans les tests sur le terrain. Il peut être utilisé pour prédire la performance de d'autres assemblages de murs dans d'autres climats

si l'on prend soin de définir les propriétés des matériaux et les conditions environnantes. Les tests de diffusion de la vapeur de la chambre climatique sur une variété de produits différents furent menés sous un gradient de température.

Ces tests ont confirmé la performance notée dans les tests sur le terrain et ont démontré que différents produits commerciaux de la même classe (cellules fermées ou cellules ouvertes) performaient de façon très similaire. Une observation intéressante notée dans les tests de la chambre climatique pour le sous-système des matériaux est que la mousse giclée HCFC-245 se comportait essentiellement comme les produits "legacy HCFC-141b". La perméance à la vapeur de la nouvelle génération semble être un peu moins que la précédente, même si les variations peuvent être statistiquement insignifiantes.

Même si l'on peut poser le postulat que les mêmes conclusions s'appliqueraient au contrôle de la vapeur dans des assemblages de toits en pente ou plats, l'exposition différente (au soleil et aux radiations du ciel la nuit) ainsi que la basse perméance à la vapeur typique des revêtements de toits (tels que les bardeaux d'asphalte et l'acier) enseigne qu'une modélisation et des tests devraient être effectués pour des applications critiques.

## 6 Références

- La base de données en ligne d'Environnement Canada pour *Canadian Climate Normals 1971-2000* (Environnement Canada, 2008).
- Garrahan, P., "Moisture Meter Correction Factors", *Proceedings of In-Grade Testing of Structural Lumber*, USDA Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 1998.
- Hens, H., Ojanen, T., Künzl, H.M., Dow, G., Rode, C., Hagentoft, C-E. 1996. *Summary reports of common exercises in modeling*. IEA-Annex 24 final report, Vol. 1, Leuven.
- Künzel, H. M. 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components—One and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters*. IRB Verlag, Stuttgart.
- Künzel, H.M. & Kießl, K. 1997. "Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components". *Int. J. of heat and mass transfer* 40, V. 1, pp. 159-167.
- Künzel, H.M. 1998. "Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behaviour of exposed walls". *Materials and Structures* 31. V. 206, pp. 99-103.
- Morris, P.I., *Understanding Biodeterioration of Wood in Structures*, Forintek Canada Corporation, Vancouver, Canada, 1998.
- Onysko, D.M. 2006. Personal Communication, Re: OSB moisture content versus resistance curve for a limited sample of OSB.
- Smith, Rachel C., *Vapour Diffusion Control in Framed Wall Systems Insulated with Spray Polyurethane Foam*. M.A.Sc. Thesis, Civil Engineering Dept, University of Waterloo, 2009.
- Straube, J., Onysko, D., & Schumacher, C. 2002. "Methodology and design of field experiments for monitoring the hygrothermal performance of wood frame enclosures". *J. Thermal Insulation and Building Envelopes* 26(2), pp. 123-151.
- Straube, J., van Straaten, R., Burnett, E. 2004. "Field Studies of Ventilation Drying" 2004. *Proc. of Buildings IX*. Clearwater Beach, Florida. December.
- Straube, J.F., and Schumacher, C.J, 2003. "Hygrothermal Enclosure Models: A Comparison with Field Data", *Proc. of 2nd Int. Conf. on Building Physics, Leuven, Belgium*, Sept. 14-18, pp. 319-326.