

**Caractérisation hygro thermique, par une approche multi
échelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration
énergétique et de valorisation environnementale**

Thèse présentée par

Saed RAJI

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

DE

L'UNIVERSITE BORDEAUX I

Spécialité : SCIENCES DU BOIS

Soutenu le 21 décembre 2006 devant le jury d'examen

MM. G. ACHARD, Professeur, Université SavoiePrésident
F. ROUGER, HDR Centre Technique du Bois et de l'AmeublementRapporteur
R. MARCHAL, Professeur, ENSAM Cluny Rapporteur
S. GRELIER, Professeur, Université Bordeaux 1 Examineur
P. LAGIÈRE, Maître de Conférences, Université Bordeaux 1..... Co-directeur thèse
J.-R. PUIGGALI, Professeur, Université Bordeaux 1Directeur thèse

Après avis de MM.

R. MARCHAL, Professeur, ENSAM Cluny
F. ROUGER, HDR Directeur de CTBA, Bordeaux

Cette thèse a été effectuée au sein du laboratoire :



Transferts Écoulements Fluides Énergétique UMR 8508
Laboratoire inter établissements CNRS, ENSAM, ENSCPB, Université Bordeaux 1

Esplanade des Arts et Métiers
33405 Talence Cedex
France



Remerciement

Je voudrais exprimer ici ma gratitude à tous ceux qui, sous une forme ou sous une autre, m'ont aidé tout au long de ce travail, et plus particulièrement :

Messieurs J.R. PUIGGALI et Ph. LAGIERE pour leur encadrement et leurs enseignements précieux, Je veux ici les remercier pour avoir toujours su m'aider, me soutenir, m'orienter, me conseiller et surtout pour avoir su me laisser une grande liberté et beaucoup d'autonomie tout en gardant un œil bienveillant sur moi ;

Messieurs R. MARCHAL de l'ENSAM Cluny et F. ROUGER de CTBA, d'avoir accepté de rapporter cette thèse ;

Messieurs G. ACHARD, et S. GRELIER pour avoir accepté d'être membres du jury ;

Messieurs. Y. JANNOT, W. JOMAA, E. PALOMO, L. MORA, A. OCHSENHOFER et C. DEVEL pour leur considérable collaboration à ce travail ;

Messieurs M. BURLOT du laboratoire LEPTAB et A. LITVAK du CETE Sud-Ouest pour son aide précieuse et efficace lors des essais de perméabilité.

Messieurs F. Baeten, M. Pauly et l'équipe du Confort Bois.

Messieurs A. Pouget, J. Lego FFB, O. Liesniewsky COSTIC....

Les membres du laboratoire TREFLE, qui m'ont aidé à surmonter les difficultés de la langue et à apprécier mon séjour ;

Toutes les personnes (je préfère ne pas citer de noms car la liste est longue) qui ont croisé mon chemin au cours de ces quatre ans en France et dont le souvenir déclenche toujours chez moi un grand sourire aux lèvres ;

Mes Parents pour leur soutien, même à distance ;

Mes enfants, simplement, pour m'avoir toujours soutenu ;

Hayfa, pour son infinie patience et, surtout, pour le bonheur qu'elle a apporté à ma vie.

SAED

Hygrothermal characterization, by an approach multi scale, of a Log houses for energetic improvement and environmental evaluation

Abstract

The development of wood construction is a fundamental stake and an effective response for the reduction of environmental impacts related to building activities. Timber structures give the only solution of construction using a "natural mono constituent" and "dry construction" in the market. These techniques of construction are nowadays widely improved and industrialized, but some uncertainty remains concerning their energetic effectiveness as well as their real thermal qualities given by the models of calculations adopted by the regulations. Therefore, this work was held initially in bond with the professionals, to detail the thermal and energetic performances in a sample of 20 Log houses. In second place, starting from these measurements "in-site" and on the basis of hydrothermal characteristics of wood logs given in laboratory, we developed a model of transfer related to heat and mass that can be applied to walls made of laminated solid-wood planks. Finely, by digital simulation, we were able to show how to improve the hydrothermal behaviour and energetic performances of this type of construction.

Keywords: Building, Wood, Log, Laminated, Wall, Environment, Physical Property, energy consumption.

Caractérisation hygro thermique, par une approche multi échelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration énergétique et de valorisation environnementale

Résumé

Le développement de la construction bois constitue un enjeu fondamental et une réponse efficace pour la réduction des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment. Les maisons Bois Massif (notées MBM) par madriers empilés constituent la seule solution de construction « mono matériau » et par filière « sèche » sur le marché. Ces techniques de construction se sont aujourd'hui grandement améliorées et industrialisées mais une ambiguïté demeure toutefois sur l'efficacité énergétique et sur la prise en compte de leurs qualités thermiques réelles dans les modèles de calculs réglementaires. Ce travail a donc consisté en premier lieu et en lien avec les professionnels, à détailler les performances thermique et énergétique sur un échantillon de 20 maisons monitorées. En seconde lieu, à partir de ces mesures « in-situ » et partant de caractéristiques hygrothermiques des madriers bois déterminées en laboratoire, nous avons développé un modèle de transfert couplé de masse et de chaleur applicable aux parois formée de madriers BM contrecollés. Enfin, par simulation numérique, on montre comment améliorer le comportement hygro-thermique et les performances énergétiques de ce type de construction.

Mots clés : Construction, Bois, Madrier, Contre-collé, Mur, Environnement, Propriété physique, consommation d'énergie.

دراسة الخصائص الحرارية و الرطوبة للبناء الخشبي من وجهة نظر بيئية

من أجل التقليل من استخدام الطاقة

الخلاصة :

يُعدّ تطوير نظام البناء أمراً لازماً وحلاً ناجعاً من أجل التخفيف من الأضرار البيئية الناتجة عن هذا القطاع. هذا و يعتبر البناء الخشبي من أحد أهم الحلول المطروحة لهذا الهدف.

لقد تقدمت تقنيات البناء الخشبي تقدماً كبيراً في السنوات القليلة الماضية نتيجة للتطور الصناعي و استخدام الآلات الحديثة بالإضافة للتصاميم المتميزة التي تأخذ بعين الاعتبار التقليل من استخدام الطاقة في مرحلة استثمار البناء. و لكن تبقى هناك تساؤلات لم يُجب عنها تتعلق بالمردود الحقيقي لتوفير الطاقة مقارنة بالنتائج التي يمكن الحصول عليها باستخدام البرامج الحسابية المتوفرة لهذا الغرض في فرنسا.

من هنا تأتي أهمية هذا العمل و الذي تم بالتعاون مع الصناعيين في هذا المجال رغبة في توضيح الآثار الحقيقية لهذا النوع من البناء.

لقد قمنا في المرحلة الأولى بتقديم دراسة حول الخصائص الفيزيائية و البيئية واستهلاك الطاقة لعينة مؤلفة من عشرين منزلاً خشبياً منتشرة في مناطق بيئية مختلفة في فرنسا، ومن ثم تم التركيز على بنائين خشبيين لإتمام دراسة أعمق بغية تحديد نسبة تجدد الهواء و صلاحيته وتحديد مستوى الرفاهية تبعاً لطريقة استخدام البناء.

أما في المرحلة الثانية فقد طورنا نموذجاً رياضياً للخصائص الفيزيائية للألواح الخشبية المستخدمة في البناء و قومناه معتمدين الخصائص الفيزيائية التي انجزت مخبرياً و التجارب المنفذة على أرض الواقع، ثم وسّعنا مجال هذا النموذج فشمل التغيرات الفيزيائية و البيئية للبناء الخشبي كاملاً .

كلمات البحث: بناء خشبي، استهلاك الطاقة، بناء بيئي، خصائص فيزيائية، نموذج رياضي.



Sommaire

Introduction générale	11
Chapitre 1: Performances énergétiques des constructions en bois massif : Mesures et analyses	
1. Introduction	19
1.1. Evolution des réglementations thermiques	19
1.2. L'habitat bois massif : contraintes réglementaires en France et à l'étranger	20
2. Campagne de mesures sur 20 maisons AFCCBOIS	23
2-1- Choix des maisons bois massif (MEM)	23
2.2. Instrumentation	25
2.3. Installation des capteurs et suivi des relevés	26
3. Etude des consommations pour le chauffage des 20 maisons	27
3.1. Méthodologie préliminaire sur l'étude énergétique	27
3.2. Méthodes de calcul	29
3.2.1. Bilan thermique par pièce	29
3.2.2. Bilan thermique par étage	29
3.2.3. Bilan thermique par bâtiment	29
3.2.4. Bilan thermique par quartier	31
3.2.5. Bilan thermique par quartier : calculs et mesures	31



Sommaire

Introduction générale	11
Chapitre 1 : Performances énergétiques des constructions en bois massif : Mesures et analyses	
1. Introduction	19
1. 1. Evolution des réglementations thermiques	19
1. 2. L'habitat bois massif : contraintes réglementaires en France et à l'étranger	20
2. Campagne de mesures sur 20 maisons AFCOBOIS	23
2-1- Choix des maisons bois massif (MBM)	23
2. 2. Instrumentation	25
2. 3. Installation des capteurs et suivi des relevés	25
3. Etude des consommations pour le chauffage des 20 maisons	27
3. 1. Introduction générale sur l'étude énergétique	27
3. 2. Méthodes et démarches de calcul	29
3. 2. 1. Consommation d'énergie par poste	29
3. 2. 2. Données climatiques pour le chauffage	29
3. 2. 3. Energie primaire et rendement de chauffage	31
3. 2. 4. Besoins annuels pour le chauffage : calculs et mesures	31
3. 2. 5. Calculs réglementaires RT2000 : Coefficients $U_{\text{bat-MBM}}$, $U_{\text{bat-réf}}$ et consommations conventionnelles C_{MBM} , $C_{\text{réf}}$	32
3. 3. Résultats et discussions	34
3. 3. 1. Utilisation du chauffage et comportement des usagers	35
3. 3. 2. Analyse des indices de performances RT2000 « Enveloppe bâti » (PU) et « Consommation » (PC)	35
3. 3. 3. Analyse des consommations pour le chauffage	37
3. 3. 4. Comparaison entre consommations et besoins pour le chauffage	38
3. 3. 5. Analyse des ratios de besoins de chauffage	39
4. Analyse des niveaux de température intérieure et du confort thermique dans les maisons bois massif	40
4. 1. Démarche et critères de calcul du confort dans l'habitat	40

4. 1. 1. Mesures de température et humidité relative dans les MBM	40
4. 1. 2. Critères de confort	41
4. 1. 3. Critère de confort d'été dans la RT2000 : T_{ic}	43
4. 2. Résultats des mesures et discussions	45
4. 2. 1. Analyse des températures et humidités relatives mesurées.....	45
4. 2. 2. Analyse du confort dans les 20 MBM	46
4. 2. 3. Résultats des calculs de confort d'été	48
5. Conclusions	51

Chapitre 2 : Confort hygro-thermique et ventilation des constructions Bois Massif : Analyse et étude sur 2 bâtiments tests

1. Introduction	55
1. 1. Confort et règles de ventilation dans l'habitat	55
1. 2. Contexte et objectifs du projet « Confort Bois »	56
1. 3. Expérimentations sur 2 MBM à usage d'habitation et de bureaux	58
2. Méthodes et démarches expérimentales	59
2. 1. Le confort thermique dans des bâtiments à ventilation naturelle	59
2. 2. Analyse et prise en compte des variations d'humidité	61
2. 3. Suivi de la qualité d'air intérieur (QAI).....	64
2. 4. Etudes et techniques de mesure de la perméabilité des bâtiments	65
2. 4. 1. Mesures par la méthode de gaz traceur	67
2. 4. 2. Mesure de perméabilité par la méthode de dépression «Blowerdoor »	68
2. 4. 3. Influence du vent extérieur (vitesse et direction) sur le renouvellement d'air.	68
3. Résultats des mesures sur les 2 bâtiments tests et analyses	69
3. 1. Mesures et analyse du confort thermique	69
3. 2. Analyse des conditions et des variations d'humidité dans 2 bâtiments BM en ventilation naturelle	73
3. 2. 1. Niveaux d'humidité mesurés à l'intérieur des bâtiments	73
3. 2. 2. Évaluation des charges hydriques à l'intérieur des bâtiments	76
3. 2. 3. Analyse croisée entre niveaux de températures et d'humidité relative confort hygro-thermique.....	79
3. 3. Mesure du taux de CO ₂ dans les 2 bâtiments tests (QAI)	81
3. 3. 1. Evolution du CO ₂ dans le bâtiment B.HA « salle de séjour»	81
3. 3. 2. Evolution du CO ₂ dans le bâtiment B.BU « salle de réunion»	82
3. 3. 3. Evolution du CO ₂ dans le bâtiment B.BU « bureau comptabilité »	83

3. 4. Perméabilité des constructions en bois massif	85
3. 4. 1. Le taux de renouvellement d'air (N) dans le bâtiment «B.HA» « salle de séjour »	85
3. 4. 2. Le taux de renouvellement d'air (N) dans le bâtiment «B.BU» « bureau de comptabilité »	87
3. 4. 3. Etude de perméabilité à l'air par la méthode de dépression «Blowerdoor ou porte soufflante »	88
3. 4. 4. Influence du vent (vitesse et direction) sur le renouvellement d'air dans le bâtiment	88
4. Conclusion	91

Chapitre 3 : Caractérisation thermo physique multi échelle de parois en bois massif contrecollé

1. Introduction	95
2. Caractérisation hygro-thermique de parois bois massif empilé	98
2. 1. Matériels et méthodes	98
2. 1. 1. Isotherme de sorption	98
2. 1. 2. Masse volumique	100
2. 1. 3. Effusivité et conductivité thermique	102
2. 1. 4. Coefficient de diffusion	104
2. 2. Résultats et discussions	107
2. 2. 1. Isotherme de sorption	107
2. 2. 2. Masse volumique	108
2. 2. 3. Effusivité et conductivité thermique	109
2. 2. 4. Coefficient de diffusion	110
3. Quantification et qualification du caractère « perméable » de parois bois massif empilé	112
3. 1. Matériels et méthodes	114
3. 1. 1. Perméamètre TREFLE	116
3. 1. 2. Préparation des échantillons	118
3. 1. 3. Effet du contre collage et du joint de feutre sur la perméabilité	118
3. 1. 4. Effet de l'épaisseur de madrier et du type de joint sur le débit d'air à travers le joint	119
3. 2. Résultats et discussions	121

3. 2. 1. Influence du contre collage et du joint de feutre sur la perméabilité de paroi	121
3. 2. 2. Influence du profil et de l'épaisseur de madrier sur le débit d'air à travers le joint	122
3. 2. 3. Influence de joint entre madrier sur le débit d'air à travers la paroi	122
3. 2. 4. Etude comparative entre les résultats de perméabilité à l'échelle de laboratoire et à l'échelle de bâtiment.	123
4. Conclusions	125

Chapitre 4 : Transport couplé de masse et de chaleur dans des parois en bois massif

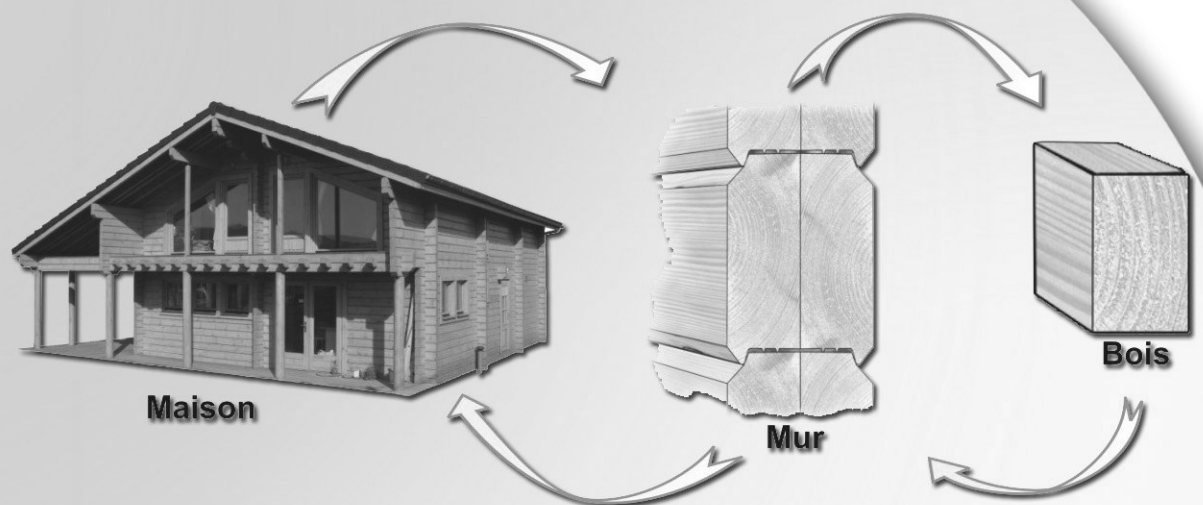
1. Introduction	129
2. Matériels et méthode	130
2. 1. Description de la paroi	130
2. 2. Evolution « in situ » de l'état thermo - hydrique de la paroi	130
3. Évolution thermo hydrique au sein de la paroi	133
3. 1. Modèle détaillé de transferts couplés de masse et de chaleur au sein de la paroi	133
3. 1. 1. Mécanismes et lois phénoménologiques de transfert	133
3. 1. 2. Equations de conservation	134
3. 1. 3. Paramètres et coefficients de transfert	136
3. 1. 4. Ecriture du modèle de transferts	138
3. 2. Validation expérimentale du modèle des transferts	140
3. 2. 1. Simulation de référence n°1	141
3. 2. 2. Simulation de référence n°2	143
3. 2. 3. Un regard critique sur la qualité des mesures d'humidité	144
3. 3. Modèles de transfert «dégradés» à précision semblable à celle du modèle complet	146
3. 3. 1. Découplage partiel des transferts de chaleur et d'humidité	147
3. 3. 2 Comparaison du MDF au modèle de référence	147
3. 4. Modèle de simulation du comportement hygrothermique réel	149
3. 4. 1. Représentation en modélisation 2D	153
3. 4. 2. Effet observé en régime permanent, du joint de colle interne aux madriers	154
3. 4. 3. Effet de la régulation hydrique de la paroi BM	154
4. Conclusion	156

Conclusions générales	159
Perspectives	163

Références	167
-------------------------	-----

Annexes	171
Annexe 1 : Exemple de dossier MBM-AFCOBOIS	175
Annexe 2 : Exemple de résultats mesures MBM-AFCOBOIS	183
Annexe 3 : Méthode de calcul $U_{\text{bât}}$ et $U_{\text{bât Réf}}$	187
Annexe 4 : RT 2005 : Bases et principes d'application	191
Annexe 5 : Etude sur 2 constructions BM	203
Annexe 6 : Multi gaz moniteur INNOVA® 1314 et échantillonneur / doseur INNOVA® 1303	209
Annexe 7 : Mesure de perméabilité par la méthode de Gaz Traceur	211
Annexe 8 : Mesure de perméabilité par la méthode de «Blowerdoor ou porte soufflante ».	213

Introduction générale



Introduction générale

La consommation croissante d'énergies fossiles et de minéraux a conduit les pays industrialisés à une forte prise de conscience environnementale orientée vers la diminution des consommations et l'utilisation d'énergies et de matériaux renouvelables. Le programme national de lutte contre le changement climatique (PNLCC-2000), puis les Plans Climat 2004 et puis sa dernière évolution en novembre 2006 définissent les engagements de la France en matière de réduction des gaz à effet de serre. Leur application doit permettre de revenir, en moyenne annuelle sur la période 2008-2012, au niveau d'émission constaté sur l'année 1990. Le secteur du bâtiment contribue fortement à ces émissions, essentiellement sous la forme de CO₂.

Dans le cadre des activités « Energie Environnement » menées au laboratoire TREFLE, des travaux ont été développés autour d'une approche mettant en avant le rôle des forêts et des matériaux dérivés (Raji, 2003, Prieur, 2004). Une étude plus spécifique animée par le CTBA¹ (Malsot *et al.* 2005) montre que la filière « bois construction » représente un fort potentiel de variation annuelle des stocks avec ses 195 millions de tonnes de CO₂ séquestrées en 1998. Parmi les cinq sous-filières étudiées, seule celle relative au bois de construction a été considérée comme présentant un potentiel de stockage de longue durée. Cette étude conclut qu'une politique volontariste est nécessaire pour que le bois construction contribue de façon significative à la réalisation des engagements de réduction des émissions nettes de CO₂ en France. Dans ce contexte, le développement de la construction bois constitue un enjeu fondamental et une réponse efficace pour la réduction des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment (Accord cadre « Bois-Construction Environnement »²).

On admet généralement que le bois, matériau de construction renouvelable nécessite peu d'énergie pour sa transformation et la maison bois, par sa bonne isolation, autorise d'importantes économies d'énergie pour son chauffage et bénéficie d'un très bon confort intérieur.

De plus, le bois est un matériau noble et durable, et c'est probablement le plus ancien des matériaux de construction comme le prouvent les structures en bois parfaitement intactes, retrouvées dans des tombeaux égyptiens vieux de plus de 3500 ans. Au Japon, le temple de « Horyuji » a été construit en 607. En Chine, le temple appelé « la femme chinoise » a été daté par les archéologues comme étant un des plus anciens bâtiments en bois encore en « vie », il a plus de 1.000 ans.

Plus tard, une magnifique église « Norwegian Stave church » a été construite juste après la fin de l'âge Viking en Scandinavie dans les années 1100 et 1200 en utilisant pour la première fois la technique du poteau vertical. Aux Etats-Unis « The Oldest Wooden Schoolhouse » est recensée comme le bâtiment en bois le plus ancien. La date exacte de sa construction est inconnue, elle apparaît pour une première fois sur les listes d'impôts en 1716. En Finlande, plusieurs maisons en bois sont répertoriées depuis 1818. « The Pantomime Theatre » au Danemark a été construit en 1874, il est situé dans un des parcs les plus anciens du monde visité par près de plus de quatre millions de personnes annuellement. Avec 76 m de long, 22 m de large et 18 m de hauteur, le

¹ Centre Technique du Bois et de l'Ameublement

² Accord cadre Bois Construction Environnement signé en 2002 au niveau national et dans plusieurs régions françaises (en cours de signature en Région Aquitaine)

bâtiment botanique du parc de Balboa, à San Diego, est la plus grande structure en bois dans le monde, elle a été édifée en 1915 pour l'exposition « Panama-Californie ». Sur la figure 1, sont présentées ces diverses réalisations historiques. (Bugge, 1983), (Japan National Tourist Organization, 2006), (Holmes, 2006), (Wikipedia encyclopedia,2006)

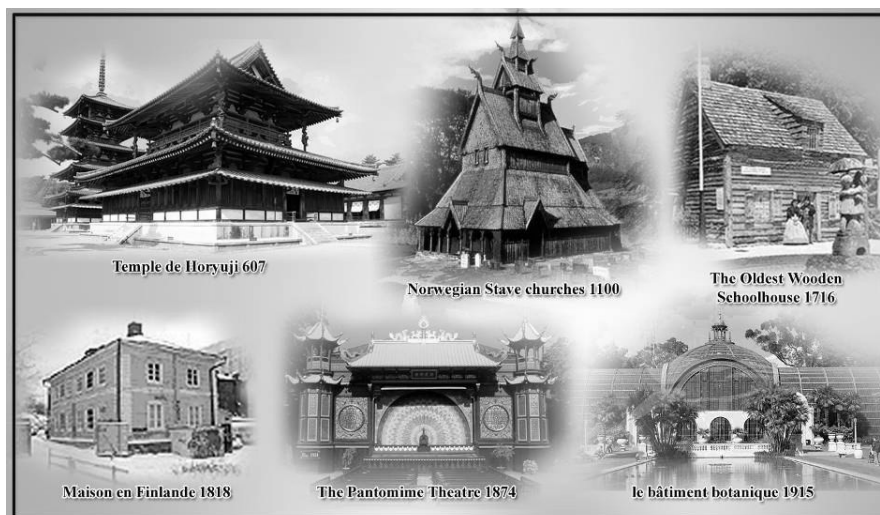


Figure 1 : Quelques exemples de bâtiments réalisés avec le matériau dans différentes régions du monde et à différentes époques

En France, à partir du Moyen Âge, la technique du colombage a été largement utilisée. Elle est composée d'éléments de bois verticaux de fortes sections entre lesquelles un remplissage est effectué en torchis, briques ou terre. Le colombage est toujours présent pour les constructions neuves dans certaines régions de France telles que la Normandie et l'Alsace (Billand, 2006). Aujourd'hui, d'autres techniques de construction bois se sont développées qui constituent une évolution de la maison à colombage. Trois autres systèmes sont principalement utilisés : la construction par panneaux massifs, la construction avec poteaux et poutres, et la construction à ossature.

La plus ancienne technique de construction en bois est celle du bois massif empilé : rondins ou madriers. Comme son nom l'indique, cette technique consiste en l'utilisation de longs éléments de bois placés horizontalement et positionnés les uns au-dessus des autres. Cependant depuis quelques années, la construction en bois massif empilé s'est industrialisée et tournée vers une architecture plus moderne permettant des réalisations contemporaines en jouant sur les volumes, les espaces vitrés et les couleurs. Pour obtenir de meilleures performances thermiques et dans un souci d'économie, les fabricants proposent des madriers sandwich incluant un isolant thermique. L'isolant peut être du polystyrène extrudé ou expansé, du liège ou de la laine de bois. Ces produits permettent de profiter d'un revêtement en bois massif intérieur et extérieur.

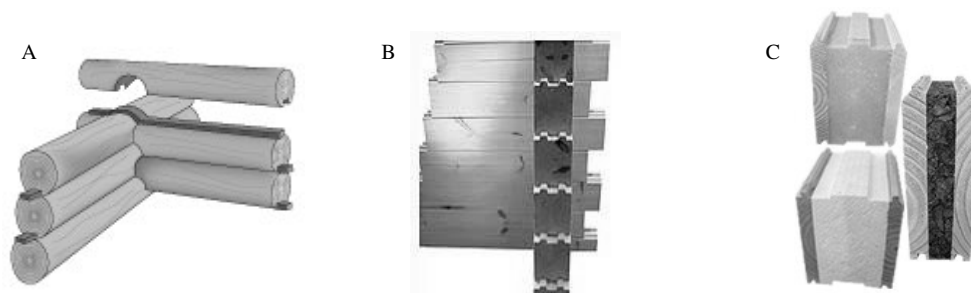


Figure 2 : Trois techniques de constructions en bois massif : A) Rondin B) Madrier et C) Madrier sandwich

Le technique poteau poutres, quant à elle, utilise des bois de plus fortes sections largement espacés entre eux (d'un mètre à plusieurs mètres). Ces poteaux poutres constituent l'ossature de la maison. Cela permet de créer de grands espaces et notamment de larges baies vitrées. Les maisons contemporaines marient souvent ces deux techniques.

En « ossature bois », la structure de la maison est constituée d'un ensemble de montants en bois de faibles sections, peu espacés (entre 40 et 60 cm), et renforcés par des panneaux latéraux. On dispose entre les montants, un isolant qui permet à cette technique d'offrir d'excellents niveaux d'isolation, mais les maisons à ossature bois manquent d'inertie thermique.

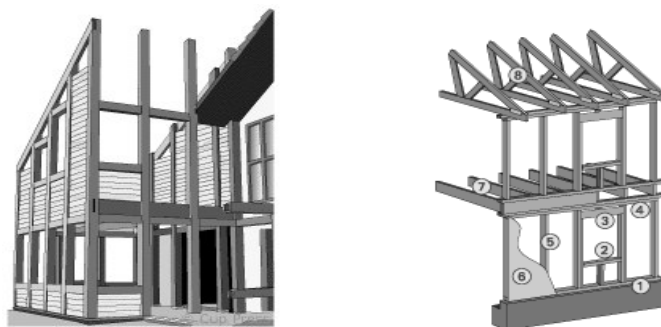


Figure 3 : Techniques « poteau poutres » et « ossature bois »

Aujourd'hui, la maison bois tous secteurs confondus, représente 4 % du marché français, hors résidences légères de loisirs, mais le secteur a un taux de croissance annuel supérieur à 10 %. On est cependant encore loin des potentialités car les dernières enquêtes montrent que de 18 à 22 % des ménages seraient ouverts à une maison en bois. Il reste que l'offre est partagée entre plus de 1000 professionnels de la construction bois, pour qui ce marché reste une activité souvent annexe et qui «ne font pas le poids» face aux spécialistes des pavillons standards clés en main.

La réalisation de maisons utilisant des empilements de madriers en bois massif est actuellement en expansion grâce en particulier, à l'utilisation de techniques industrielles très modernes et à un réseau de constructeurs très actif. Toutefois, bien que ces techniques se soient grandement améliorées, une ambiguïté demeure sur les performances thermiques et énergétiques réelles. En particulier, au plan français, la conformité de telles maisons dans le cadre des réglementations thermiques du secteur résidentiel est remise en question depuis l'apparition de la RT2000.

La problématique des règles thermiques françaises à appliquer pour la conception des bâtiments et en particulier pour les constructions en bois massif, est au cœur de la première partie de ce travail et nécessite de connaître les règles européennes et leurs évolutions.

La directive DEPE³ de l'Union Européenne signée en 2003 sur la performance énergétique des bâtiments, met l'accent sur la réduction des consommations grâce à de nouvelles normes de construction. Le but est de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments en Europe, sans provoquer d'énormes dépenses supplémentaires, tout en améliorant sensiblement le confort. Cette mesure législative vise à définir une méthodologie commune pour calculer les performances

³ Directive 2002/91/CE, JO L 1 du 4.1.2003, mise en application en cours

énergétiques d'un bâtiment, à fixer des normes minimales en matière de performance énergétique des nouveaux bâtiments et rénovations des bâtiments existants, à utiliser un système de certification (étiquette énergie) des bâtiments pour rendre la consommation énergétique beaucoup plus visible pour les propriétaires, les locataires et les utilisateurs. Des travaux ont montré que plus de 20 % de la consommation énergétique actuelle pourrait être économisée d'ici à 2010 par l'application de normes plus strictes aux nouveaux bâtiments et aux bâtiments soumis à de gros aménagements.

A ce jour, 15 Etats Membres de l'Union Européennes exigent des performances énergétiques minimums pour les nouveaux bâtiments, avec de grandes différences entre eux, concernant les niveaux minimums d'isolation thermique exigés. En particulier, Allemagne, Danemark, R-U, France, Pays Bas, Irlande et Luxembourg ont des méthodes complètes d'estimation d'énergie, qui tiennent compte de l'isolation du bâtiment mais également du chauffage, de l'eau chaude et des systèmes de climatisation. Par ces méthodes, on évalue la consommation d'énergie des bâtiments (Visier, 2000) c'est-à-dire une performance annuelle globale à laquelle on associe souvent des critères thermiques exigentiels (par exemple, garde fous des RT françaises).

Ainsi, depuis 2000, la réglementation thermique française impose une résistance thermique minimale pour un mûr extérieur $R_{mur} = 1,96 m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$, valeur augmentée à 2,04 avec la RT2005. Pour atteindre cette valeur avec un mur en pin massif, on devrait utiliser une épaisseur de bois supérieure à 24 cm, ce qui est difficilement envisageable d'un point de vue technico-économique. Ce critère « garde fou » qui caractérise la transmission thermique surfacique de la paroi en régime permanent, est sûrement bien adapté à l'évaluation de parois standards mais représente une indication incomplète sur la qualité thermique des parois bois à ossature massive. Le garde-fou basé sur le coefficient U du mur extérieur ne laisse pas beaucoup d'alternatives possibles, et remet en question la pertinence des solutions techniques proposées par ce type de construction.

Dans cette étude, nous souhaitons caractériser, par une approche multi échelles (comme représenté en figure 4), le comportement hygro-thermique de maisons en bois massif, en vue d'améliorer la détermination des performances énergétiques et de valoriser les qualités thermiques et environnementales de ce type de construction.

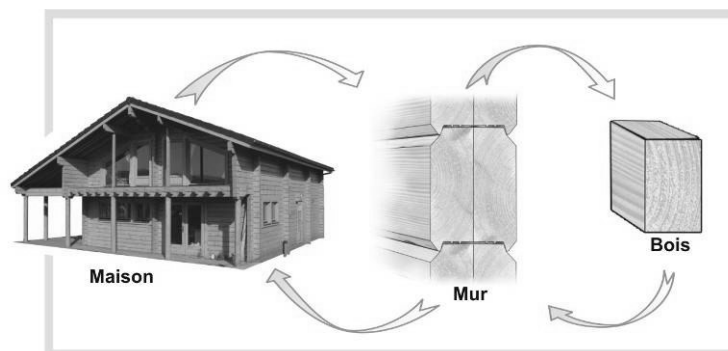


Figure 4 : Caractérisation, par une approche multi échelles, des comportements hygro thermique de maisons en bois massif

Dans le premier chapitre, est présentée une campagne de mesures, réalisée en 2004 et 2005, des performances énergétiques de constructions en bois massif : dans le cadre d'un projet à grande échelle, ont été monitorées 20 maisons en Bois Massif construites récemment (2000 à 2002) dans toutes les régions françaises par 8 entreprises du réseau AFCOBOIS. Dans ce projet, nous avons suivi en particulier, les consommations d'énergie pour le chauffage et les conditions de confort par rapport aux conditions extérieures. On cherchera à relier ces performances réelles avec les méthodes, hypothèses et calculs utilisés dans la RT2000.

Dans le chapitre 2, une étude plus fine et plus détaillée sur 2 constructions en bois massif à usages différents (bâtiment de bureaux et bâtiment d'habitation sur un même site) cherche à déterminer le comportement hygro-thermique, le confort et l'efficacité de la ventilation naturelle de ce type de construction en lien avec les usages.

En descendant à l'échelle de la paroi, sont présentés au chapitre 3, les résultats de mesures effectuées sur une paroi en bois massif contrecollé verticalement avec joint de feutre entre madriers. Notre objectif est de montrer que le comportement global de la paroi en bois massif s'éloigne du modèle « simple » utilisé dans les méthodes réglementaires (RT2000) et dans des outils de simulation thermo-aéraulique de bâtiments (CODYBA, COMFIE/PLEIADES). Dans un premier temps sont détaillées à partir de mesures en laboratoire, les caractéristiques de transferts thermiques et hydriques de parois formées de madriers « Bois Massif contre-collé verticalement » avec joint feutrine entre madriers. Pour cela, nous avons étudié les 3 flux, thermique, hydrique et aéraulique et en particulier,

- les caractéristiques hygrothermiques à l'échelle du matériau,
- l'influence de la forme du madrier et du type de joint entre madriers sur le transfert aéraulique à travers une telle paroi.

Les valeurs obtenues au chapitre 3, associées aux mesures réalisées sur site, nous servent ensuite à développer et à valider un modèle couplé de transfert de masse et d'énergie à l'échelle de la paroi. Ce modèle spécifique au comportement de parois en bois est présenté au chapitre 4 ; il sera intégré ultérieurement à une simulation hygrothermique plus complète de bâtiments en bois massif.



Performances énergétiques des constructions en bois massif

Mesures et analyses

1. Introduction	19
1. 1. Evolution des réglementations thermiques	19
1. 2. L'habitat bois massif : contraintes réglementaires en France et à l'étranger	20
2- Campagne de mesures sur 20 maisons AFCOBOIS	23
2-1- Choix des maisons bois massif (MBM)	23
2. 2. Instrumentation	25
2. 3. Installation des capteurs et suivi des relevés	25
3. Etude des consommations pour le chauffage des 20 maisons	27
3. 1. Introduction générale sur l'étude énergétique	27
3. 2. Méthodes et démarches de calcul	29
3. 2. 1. Consommation d'énergie par poste	29
3. 2. 2. Données climatiques pour le chauffage	29
3. 2. 3. Energie primaire et rendement de chauffage	31
3. 2. 4. Besoins annuels pour le chauffage : calculs et mesures	31
3. 2. 5. Calculs réglementaires RT2000 : Coefficients $U_{bat-MBM}$, $U_{bat-réf}$ et consommations conventionnelles C_{MBM} , $C_{réf}$	32
3. 3. Résultats et discussions	34
3. 3. 1. Utilisation du chauffage et comportement des usagers	35
3. 3. 2. Analyse des indices de performances RT2000 « Enveloppe bâti » (PU) et « Consommation » (PC)	35
3. 3. 3. Analyse des consommations pour le chauffage	37
3. 3. 4. Comparaison entre consommations et besoins pour le chauffage	38
3. 3. 5. Analyse des ratios de besoins de chauffage	39
4. Analyse des niveaux de température intérieure et du confort thermique dans les maisons bois massif	40
4. 1. Démarche et critères de calcul du confort dans l'habitat	40
4. 1. 1. Mesures de température et humidité relative dans les MBM	40
4. 1. 2. Critères de confort	41
4. 1. 3. Critère de confort d'été dans la RT2000 : T_{ic}	43
4. 2. Résultats des mesures et discussions	45
4. 2. 1. Analyse des températures et humidités relatives mesurées	45
4. 2. 2. Analyse du confort dans les 20 MBM	46
4. 2. 3. Résultats des calculs de confort d'été	48
5. Conclusions	51

1. Introduction

1. 1. Evolution des réglementations thermiques

Le secteur du bâtiment représente à lui seul 40% de la consommation d'énergie en France et 20% des émissions de CO₂ ; une réglementation spécifique existe depuis 1975 et les premiers chocs pétroliers, la réglementation thermique RT2000 et son évolution RT2005 en application depuis le 1^{er} septembre 2006. Elles portent sur tous les bâtiments neufs résidentiels et tertiaires et visent à réduire les consommations d'énergie avec un objectif affiché par rapport aux versions précédentes

- RT2000, réduction par rapport à la RT89, de 20% dans les logements, 40% dans le tertiaire et à limiter l'inconfort d'été dans les locaux non climatisés,
- RT2005, réduction par rapport à RT2000, de 15 % dans tous les cas.

La réglementation affiche comme objectifs (Visier, 2000, Schwach, 2000) :

- de limiter la consommation d'énergie dans le secteur de construction,
- de diminuer l'émission des gaz de l'effet de serre,
- d'améliorer le confort d'été dans les bâtiments

Pour ce, on impose de satisfaire aux 3 exigences suivantes :

- La consommation conventionnelle d'énergie doit être inférieure à une consommation de référence, valeurs établies en énergie primaire,
- La température intérieure calculée en été doit être inférieure à une température de référence,
- Des performances minimales sont requises pour une série de composants ou « gardes fou » (isolation, ventilation, système de chauffage...).

La performance énergétique de « l'enveloppe du bâtiment » (c'est-à-dire les parois extérieures, les fenêtres, la toiture, etc.) est réglementée spécifiquement en Allemagne et en Angleterre, à la fois par la valeur du coefficient global de déperditions et par des valeurs de coefficients surfaciques par éléments de paroi. Depuis la RT2000, des exigences analogues sont apparues également dans la réglementation française, pour les principaux types de parois ainsi que pour les ponts thermiques (Aussourd *et al.* 2006). En France et désormais en Grande-Bretagne, on impose le respect d'une consommation ou d'une émission de référence, c'est-à-dire relative à un bâtiment ayant la même architecture que celle du projet et utilisant, pour chacune de ses fonctions, la solution de référence décrite par la réglementation. Avec la RT 2005, pour la France, la solution de référence est désormais « renforcée » dans le sens de l'efficacité énergétique. Cette nouvelle version en application depuis le 1^{er} septembre 2006 impose désormais d'exprimer les consommations des bâtiments sous forme de ratios d'énergie primaire (kWh EP par m² et par an) et pour les bâtiments résidentiels, des valeurs maximums sont fixées en fonction des zones climatiques au nombre de 3. Par exemple, en zone H2 (climat « moyen »), la consommation conventionnelle pour le chauffage, le refroidissement et la production d'Eau Chaude Sanitaire ne doit pas dépasser 110 kWh/m²/an dans le cas d'un combustible fossile et 190 kWh/m²/an en chauffage électrique. Signalons que, dans le même temps, les exigences passent à 70 kWh/m²/an en Allemagne et à 60 kWh/m²/an au Danemark (Aussourd *et al.* 2006).

1. 2. L'habitat bois massif : contraintes réglementaires en France et à l'étranger

Les recherches archéologiques sur notre continent montrent que la maison en bois massif, faite d'arbres bruts ou simplement équarris, empilés les uns sur les autres et assemblés aux angles se rencontre en tous pays depuis plus de 3000 ans. C'est la maison des pays aux hivers froids, des pays de montagne, des pays de forêts. En France les fustes très anciennes des Alpes, de l'Allier, de Dordogne, du Lot et Garonne, du Morvan, de Franche Comté, des Vosges peuvent être trouvées.



Ces maisons de bois massif représentent des techniques traditionnelles de construction qui allient modernité, authenticité, solidité et sécurité. Si les techniques se sont aujourd'hui grandement améliorées aux plans de la qualité, des techniques de conception et de montage et de l'intégration dans une architecture moderne, une grande ambiguïté concerne leur performance énergétique obtenue par les méthodes de calcul classiques et les valeurs réelles mesurées sur site. Enfin, la crise énergétique et les exigences de réduction des consommations mettent en question l'avenir de ces filières industrielles et l'évolution de leurs produits. La seule réponse ne pouvant être faite par une simple augmentation de l'épaisseur des madriers, la présente étude vise donc à balayer l'ensemble des solutions possibles, aussi bien au niveau de la conception des madriers et des maisons, qu'au niveau de la caractérisation hygro-thermique des parois et des outils de simulation thermique des maisons.

Au Québec, depuis 1983, le Règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments exige une résistance thermique des murs de $R-20^1$ (équivalence système métrique $R_{si} = 3,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) pour les maisons neuves construites dans le sud de cette région. Théoriquement, le bois de pin blanc a une résistance thermique de $R-0,53$ par cm d'épaisseur, ce qui exigerait des murs d'au moins 37,5 cm d'épaisseur.

En France, la réglementation thermique française impose d'avoir, pour les parois verticales de bois massif empilé, un coefficient surfacique (coefficient U_{mur}) inférieur ou égal à $0,47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ depuis la RT2000, valeur ramenée à $0,45$ depuis la RT2005. Ces coefficients correspondent à des valeurs de résistance thermique des couches de matériaux égales à $1,96 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ pour la RT2000 et $2,04$ pour la RT2005. Cette exigence appelée « garde-fou » est fixée par rapport à des murs constitués d'éléments de structure et d'isolants dans une conception traditionnelle. Remarquons que l'épaisseur totale finale de ces parois extérieures est supérieure à 35 cm et dépasse souvent 40 cm avec la RT2005.

Actuellement, les épaisseurs couramment utilisées par les fabricants pour les murs des maisons en bois massif vont de 90 mm à 156 mm pour les madriers et de 170 mm à 220 mm pour les rondins.

¹ Résistance thermique exprimée en $\text{ft}^2 \cdot \text{°F} \cdot \text{h}/\text{BTU}$, notation utilisée en Amérique du Nord

Sur la base d'un coefficient surfacique U inférieur ou égal à 0,47 W/(m².K) et dans une première approche basée sur une conductivité thermique λ de 0,12 W/(m.K), l'épaisseur de bois doit être de 24 cm au minimum pour toutes les parois extérieures, soit le double des pratiques actuelles. En dehors de conditions dérogatoires, ce « garde-fou » rend donc non réglementaire la majorité des constructions en bois.

Aux Etats-Unis, une étude réalisée par la « National Association of Home Builders North American Log Homes Council » (NAHB, 1991) a montré que les maisons en bois massif sont au moins aussi efficaces que les constructions à ossature bois malgré un écart de 44% entre la R-valeur moyenne des murs en bois massif et son équivalent en murs à ossature bois. Par ailleurs, la consommation annuelle d'énergie basée sur des données mesurées comparée avec la simulation numérique sur ordinateur montre une différence variant de -16% à +13%.

Selon les résultats d'une étude nord-américaine (Pickett, 2003) sur la performance énergétique des maisons en bois massif, on montre par l'expérience, que l'efficacité énergétique d'une maison en bois massif d'épaisseur 17 cm, égale ou surpasse celui d'une maison à ossature bois d'épaisseur 27 cm (même de 32 cm en quelques régions). Les résultats ont conclu que les maisons en bois massif testées étaient aussi performantes que les maisons bien isolées de construction conventionnelle, même si leur valeur R était 44% plus basse que celle des maisons de construction conventionnelle. En pratique, sur la base des besoins énergétiques de chauffage et de refroidissement annuels, les maisons en bois massif permettent d'améliorer les performances de 2.5% jusqu'à plus de 15% en comparaison avec une maison à ossature bois de niveau identique. En temps réel, ceci signifie qu'un propriétaire d'une maison en bois massif pourrait économiser de \$150 à \$400 par an sur leurs factures de chauffage et de climatisation, tout en maintenant le confort égal ou supérieur dans des conditions atmosphériques réelles.

(Bruch *et al.*) ont trouvé en 1980 qu'un mur de bois massif d'une valeur théorique de R-10 a la même consommation énergétique qu'un mur R-12 à colombage durant les mois d'hiver les plus froides. Par contre, la maison de bois massif a utilisé 46% de moins d'énergie au printemps et 24% de moins en été.

Ces études semblent donc confirmer que la construction de bois massif est un mode de construction performant tant pour le confort que pour l'économie d'énergie ; sa performance réelle en comparaison aux solutions de parois comprenant ossature et isolation doit être réévaluée.

En France et depuis l'application de la RT2000, ces réflexions associées aux observations faites par les constructeurs sur le terrain ont poussé les institutions à mener une étude sur le sujet. Initié et financé par la Fédération Française du Bâtiment FFB² et le réseau de constructeurs bois AFCOBOIS³, le projet « Habitat Bois Massif HBM PERFormant » a été réalisé en collaboration entre le Laboratoire TREFLE, le centre technique COSTIC⁴ et le bureau d'études POUGET Consultants.

Notre participation ici présentée a consisté, sur la base d'une démarche définie entre les 3 partenaires, à évaluer les performances énergétiques réelles de maisons Bois Massif, et à les comparer aux calculs réglementaires RT2000. Pour ce, des suivis climatiques et énergétiques ont été

² FFB, Fédération Française du Bâtiment, représentée par Judith LEGO

³ AFCOBOIS, Association Française des Constructeurs Bois, maison en bois représentée par Frédéric BAETEN

⁴ COSTIC, Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques représentée par Vincent BAYETTI

faits sur 20 maisons (dont 10 suivies par le TREFLE), conçues et réalisées par 8 constructeurs différents du réseau AFCOBOIS et implantées sur tout le territoire français. En complément, des mesures de thermographie Infrarouge ont permis de préciser les niveaux d'isolation et les défauts de construction de certaines maisons. Les mesures ont été mises en place et supervisées de février 2005 à avril 2006 avec l'aide des occupants sur des maisons individuelles utilisées dans des conditions normales. En réponse aux attentes des constructeurs et des institutions, l'étude a donc eu pour objectifs :

- d'évaluer les qualités thermiques et les performances énergétiques globales des maisons BM dans des situations variées,
- de mettre en évidence les qualités de confort (toutes saisons) spécifiques à ces constructions,
- de comparer la consommation d'énergie pour le chauffage mesurée sur site et les valeurs obtenues par le calcul (méthodes RT2000 et DEL-2).

Le projet a fait l'objet d'un rapport final remis en septembre 2006 qui permettra à AFCOBOIS, de déposer prochainement aux institutions, un dossier d'études pour cas particuliers (ANNEXE V de l'arrêté du 26 mai 2006 fixant la RT2005). S'appuyant sur les résultats de l'étude, un aménagement spécifique sera demandé pour ce type de construction accompagné d'une méthode d'évaluation.

L'ensemble du projet et ses résultats ne sont pas présentés dans cette partie ; seuls sont extraits et mis en évidence, les mesures, calculs et résultats utiles pour l'ensemble de la démarche de la thèse.

2. Campagne de mesures sur 20 maisons AFCOBOIS

2. 1. Choix des Maisons Bois Massif (MBM)

Parmi 40 maisons proposées par AFCOBOIS, 20 maisons construites par 8 constructeurs ont été choisies ; les maisons se situent sur 12 départements pour 10 régions (figure 1.1), la surface habitable moyenne des maisons est de 160 m² (avec un minimum de 80 m² et maximum 280m²) et le taux de vitrage moyen Sv/Sh égal à 16%.



Figure 1.1 : 20 MBM AFCOBOIS choisies sur 12 départements et 10 régions

Les types de chauffage dans les 20 maisons sont représentatifs des solutions habituellement rencontrées dans le cas d'un habitat individuel hors des villes et des agglomérations (figure 1.2-A). En ce qui concerne le système constructif, les 20 maisons sont toutes en bois massif avec deux formes possibles « Madrier » noté M et « Rondin » noté R, et l'épaisseur varie entre 100 mm et 300 mm (Figure 1.2-B) ; le type le plus utilisé est ici le madrier contre-collé de 134 mm d'épaisseur.

Les principales caractéristiques des MBM sont présentées sur le tableau 1.1.

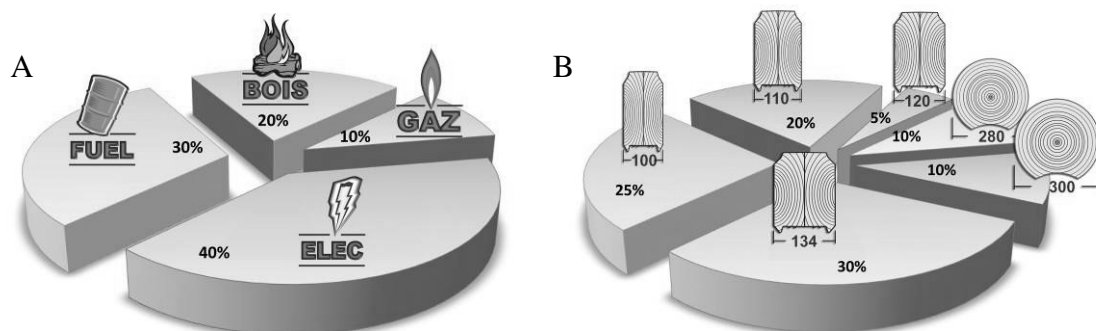


Figure 1.2 Types de chauffage et types de madriers (M) Madrier et (R) Rondin sur les 20 maisons étudiées

Tableau 1.1 : Récapitulatif des informations de chaque maison

N°	Constructeur	C. Postal	Altitude (m)	Surface habitable (m²)	Profil paroi	Epaisseur paroi	TYPE CHAUFFAGE/ECS
M01	1	18	150	103	Madrier	100	Gaz/Gaz
M02	5	25	900	215	Madrier	100	Fuel/Fuel
M03	5	39	229	286	Madrier	100	Fuel/Elec
M04	5	39	300	156	Madrier	100	Fuel/Fuel
M10	3	25	970	92	Madrier	100	Fuel/Fuel
M13	3	39	269	170	Madrier	120	PAC/PAC&Elec
M14	2	39	650	158	Rondin	280	PAC/PAC&Elec
M15	2	01	550	103	Rondin	280	Gaz/Gaz
M21	8	63	830	162	Madrier	134	Bois+Elec/Elec
M22	8	33	10	149	Madrier	134	Bois+Elec/Elec
M23	8	89	78	102	Madrier	110	Elec/Elec
M25	7	64	176	96	Madrier	110	Elec+ ap. Gaz/Elec
M27	7	87	221	129	Madrier	110	Bois+Elec/Elec
M28	7	60	181	254	Madrier	134	Fuel/Elec
M29	7	16	112	153	Madrier	110	Elec/Elec
M31	4	67	500	82	Rondin	300	P. Granulé /ECS Solaire
M35	8	16	112	248	Madrier	134	Elec/Elec
M36	8	87	301	147	Madrier	134	Elec/Elec
M37	6	87	550	190	Rondin	300	Elec/Elec
M39	8	33	50	224	Madrier	113	Fuel/Fuel

2. 2. Instrumentation

Dans chaque maison, ont été posés au moins, 3 enregistreurs de température et d'humidité relative de type «HOBO® U12 » (annexe 5) pour des mesures au pas de temps de 15 minutes. Deux capteurs sont placés à l'intérieur de chaque maison, le premier est dans la salle de séjour (Coin Jour noté *CJ*), l'autre dans une chambre (Coin Nuit noté *CM*). Ces 2 capteurs sont sur un mur intérieur à une hauteur supérieur à 1m50 du sol, en évitant tout rayonnement solaire direct. Un troisième capteur est placé à l'extérieur sous abri sur la façade nord.

En plus, nous effectuons un suivi des consommations d'énergie, avec des solutions choisies selon le type de chauffage et d'énergie :

- En « électrique », un sous-compteur type TYWATT® pour la consommation de chauffage (heures creuses et heures pleines),
- En « gaz », un compteur volumétrique de gaz consommé par la chaudière,
- En « fuel », une jauge est utilisée pour suivre le niveau de la réserve.

Les solutions de comptages assez simples n'intègrent pas de système d'enregistrement et nécessitent donc des relevés manuels effectués par les occupants. Au début de l'étude, un dossier a été réalisé et remis aux propriétaires, et il leur a été demandé d'effectuer un relevé hebdomadaire de tous leurs compteurs (compteur EDF, compteur chauffage et compteur d'eau).

2. 3. Installation des capteurs et suivi des relevés

Les mises en place des capteurs se sont déroulées en février 2005. Lors de la première visite, un dossier technique a été réalisé sur chaque maison ; les questionnaires contiennent des informations générales sur la maison, les équipements des logements, le système de chauffage, la ventilation, des informations sur l'eau chaude sanitaire, sur la gestion du chauffage et le confort d'été (annexe 1).

A la suite, deux visites (juillet 2005 et décembre 2005) ont été faites sur chaque site afin de relever les données des capteurs. Enfin, une dernière visite en avril 2006 a permis de récupérer les dernières données et les appareils (Figure 1.3).

Signalons quelques problèmes rencontrés :

Il était demandé à chaque foyer de relever le plus régulièrement possible les consommations d'eau et d'électricité. Un manque d'implication de certains propriétaires qui n'ont pas rempli précisément les fiches de suivi, a rendu plusieurs analyses (3 cas) difficiles ou imprécises. La sonde extérieure de la maison M28 n'a pas fonctionné sur la dernière période, les températures journalières ont été reconstituées à partir des *DJU Météoclim*.

Sur la maison M21, le propriétaire a installé une piscine extérieure chauffée durant l'hiver 2005-2006. En plus il n'a pas rempli régulièrement les fichiers de suivi énergétique de sa maison, ce qui rend l'analyse de la consommation de chauffage moins pertinente.

Sur la maison M22, le propriétaire a eu un problème de chauffage au milieu de la campagne de mesures ; il a dû installer des convecteurs électriques, avec pour conséquence une consommation plus élevée.

Suite aux mesures de thermographie « infrarouge » sur la maison M35, un défaut d'isolation du plafond a été détecté, avec pour conséquence, une plus forte consommation par rapport au prévisionnel pour cette maison.

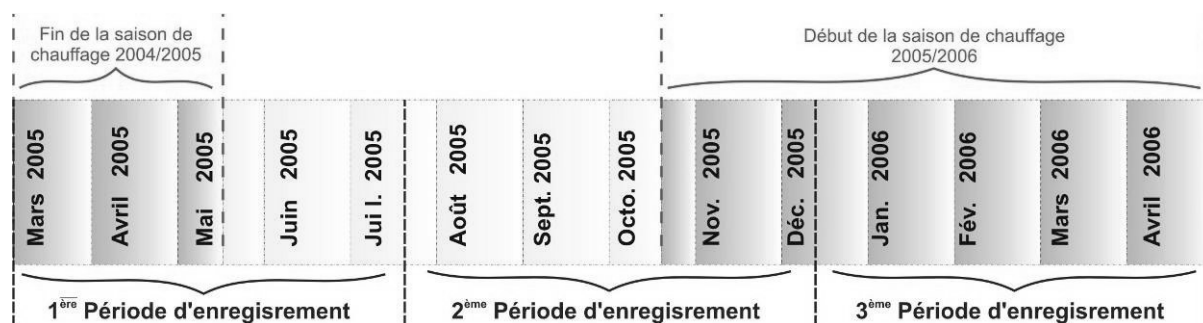


Figure 1.3 : Périodes d'enregistrements et périodes de chauffage

3. Etude des consommations pour le chauffage des 20 maisons

3. 1. Introduction générale sur l'étude énergétique

Avec près de 60% du total, le chauffage représente aujourd'hui la part la plus importante de la facture énergétique dans le secteur résidentiel, suivi par les « autres usages » (froid, lavage, cuisine, équipements électroniques, ...) et l'eau chaude sanitaire « ECS » (Bertolo *et al*, 1996).

La consommation d'énergie résulte d'actions et d'interactions que l'on peut analyser à partir de trois groupes de paramètres (Figure 1.4) :

- Contraintes climatiques,
- Caractéristiques techniques du bâtiment (enveloppe, systèmes),
- Usages et comportements des occupants.

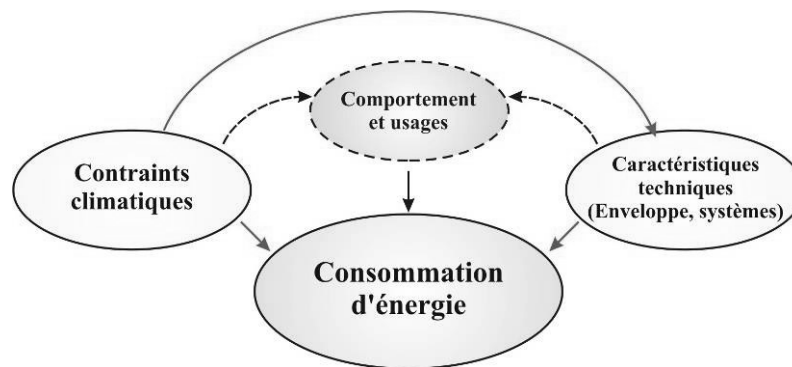


Figure 1.4 : Schéma d'analyse des consommations d'énergie (Bertolo *et al*, 1996)

Dans son travail de recherche mené au TREFLE, (Devel, 2003) propose une décomposition systémique des consommations d'énergie dans le bâtiment, dans une double approche (Figure 1.5) intégrant :

- 1- Les relations entre climat extérieur, enveloppe du bâtiment et confort,
- 2- Les relations entre énergies consommées, équipements et systèmes, et utilisateurs et usages.

Dans notre travail, on étudiera plus particulièrement la première approche avec la décomposition proposée.

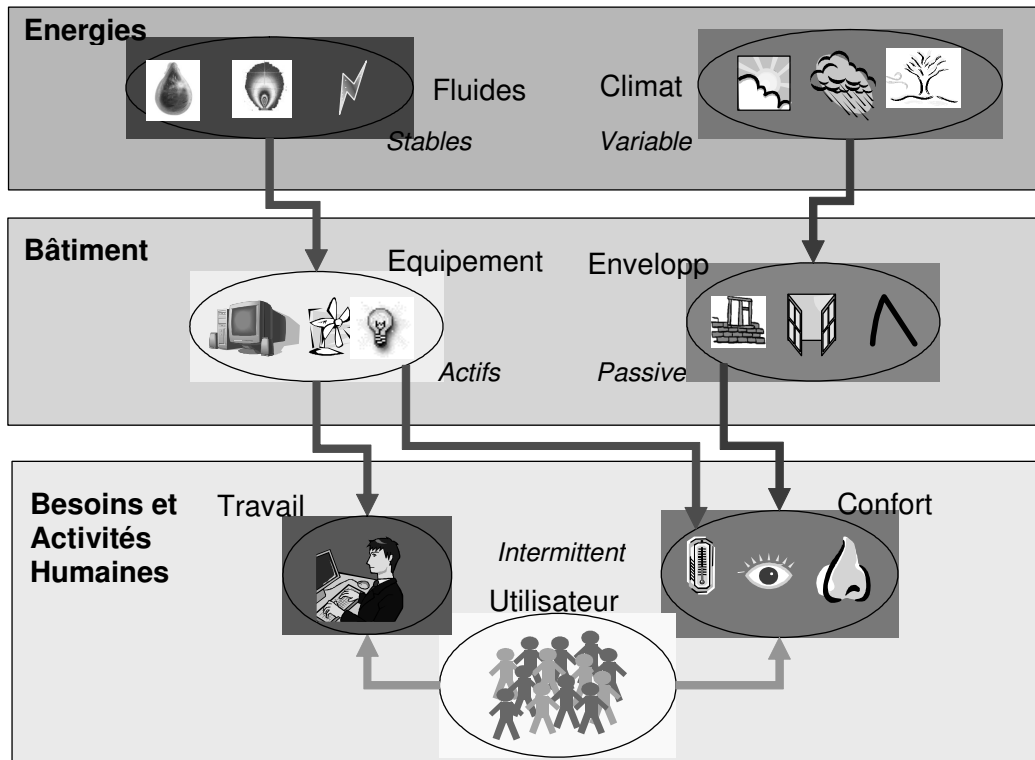


Figure 1.5 : Analyse systémique des consommations d'énergie dans le bâtiment (Devel, 2003)

Dans cette partie de l'étude, on compare les valeurs de consommations pour le chauffage de chacune des 20 MBM, valeurs obtenues par la mesure et par le calcul. On relie ensuite ces valeurs aux conditions climatiques, aux caractérisations techniques des bâtiments, et aux comportements des occupants.

A l'aide des méthodes de calcul TH-BAT et TH-C (méthodes de base pour appliquer la RT2000), les valeurs réglementaires suivantes ont été calculées pour chaque maison :

- Coefficients de déperditions thermiques par transmission, U_{BAT}^{MBM} et $U_{BAT}^{réf}$,
- Consommations pour le chauffage C_{Ch} et $C_{Ch}^{réf}$,
- Consommations conventionnelles C_{MBM} et $C_{réf}$.

En parallèle, les calculs ont été effectués à l'aide de la méthode simplifiée DEL2, méthode réalisée par le CSTB et utilisée pour la nouvelle certification énergétique ; à partir des caractéristiques de chaque maison et des données climatiques réelles du site, on a calculé :

- Les besoins annuels pour le chauffage,
- La consommation annuelle pour le chauffage.

3. 2. Méthodes et démarches de calcul

3. 2. 1. Consommation d'énergie par poste

A partir du suivi énergétique hebdomadaire effectué sur chaque maison, on déduit la consommation totale réelle par période. Cette consommation est ensuite répartie sur 3 postes principaux, chauffage, eau chaude sanitaire (ECS) et divers usages (éclairage, cuisine, etc.). Les consommations de chaque maison (exprimées en kWh) ainsi que la répartition par poste sont représentées sur un graphe comme montre l'exemple de la figure 1.6.

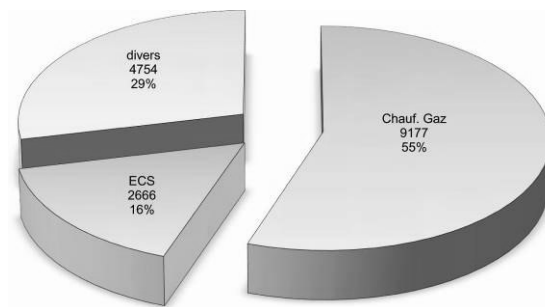


Figure 1.6 : Exemple de figure de consommations réelles en kWh et pourcentages par poste

3. 2. 2. Données climatiques pour le chauffage

Les degrés jours représentent la « charge climatique » réelle d'un site sur la saison de chauffage ; par conséquent, les déperditions annuelles d'une maison sont directement proportionnelles à cette valeur.

Les valeurs DJ sont obtenues à partir des températures extérieures moyennes quotidiennes et calculés généralement sur une base de 18°C (d'où l'appellation DJU-base 18 ou DJ_{18}). Lorsque la température moyenne du jour est supérieure ou égale à 18°C, l'écart est compté nul. Les écarts quotidiens sont cumulés sur les mois de la période d'hiver. Le calcul de la moyenne journalière est effectué d'après la méthode des DJU METEOCLIM.

$$\text{Si } \theta_{\text{ext max}} < 18^\circ\text{C} \quad DJ_{18} = 18 - \left(\frac{(\theta_{\text{ext min}} + \theta_{\text{ext max}})}{2} \right)$$

$$\text{Si } \theta_{\text{ext max}} \geq 18^\circ\text{C} \quad DJ_{18} = a \times b \times (0,08 + (0,42 \times b))$$

$$a = \theta_{\text{ext max}} - \theta_{\text{ext min}} \quad \text{et} \quad b = \frac{18 - \theta_{\text{ext min}}}{\theta_{\text{ext max}} - \theta_{\text{ext min}}}$$

Sur le Tableau 1.2 sont présentées les consommations de chauffage, d'ECS et d'autres usages, ainsi que les valeurs de DJ pour chacune des 20 maisons.

Tableau 1.2 : Mesures de consommations et Degrés-Jours des 20 MBM sur la saison de chauffage 2005/2006

Maison	Profil / épaisseur	Surface chauffée m ²	ENERGIES CONSOMMEES en kWh /an			Degrés-jours chauffage				
			CM Chauffage	Conso ECS/an	Conso divers Elec /an	Durée jours chauffage	DJ _R Réel	DJ ₁₈ base18	DJ _R /DJ ₁₈	
1	M/100	110	Gaz 11 843			4 754	203	2 037	1 605	+ 21%
			9 177	2 666						
2	M/100	215	Fuel 34 884			4 663	274	4 171	3 802	+ 9%
			26 658	8 226						
3	M/100	286	Fuel	Elec		3 051	234	3 188	2 690	+ 16%
			21 087	2 004						
4	M/100	156	Fuel 19466			3 234	244	2 923	2 739	+ 6%
			15 034	4 432						
10	M/100	92	Fuel+Elec 19968+2200			3 542	243	3 176	3 390	- 7%
			17 317	4 961						
13	M/120	170	Elec	Elec 7686		230	3 306	2 675	+ 19%	
			6 072	2 650	5 036					
14	R/280	158	Bois + Elec 2840+4062			2 966	219	3 312	2 961	+ 11%
			5 710	1 192						
15	R/280	103	Gaz 16 405			5 019	213	3 798	2 948	+ 22%
			13 754	2 651						
21	M/134	162	Bois	Elec 10 879		197	3 268	2 718	+ 17%	
			22 100	3 763	2 440					4 676
22	M/134	149	Bois	Elec 9 886		192	1 820	1 694	+ 7%	
			11 900	3 952	2 440					3 494
23	M/110	102	Elec 18 130			243	3 712	2 510	+ 32%	
			10 670	3 080	4 380					
25	M/112	105	Gaz	Elec 12 213		201	1 908	1 943	- 2%	
			332	5001	1 020					6 192
27	M/112	179	Bois	Elec 10 353		196	2 361	1 763	+ 25%	
			3400	5005	2 440					2 908
28	M/134	254	Fuel 32 714			6 032	228	3 246	2 594	+ 20%
			22 290	10 424						
29	M/136	152	Elec 13 928			198	2 415	1 901	+ 21%	
			8 266	938	4 724					
31	R/300	109	bois	elec		1 892	251	2 888	3 029	- 5%
			12 373	1 312						
35	M/134	248	Elec 27 698			201	2 158	2 063	+ 4%	
			19 873	3 089	4 736					
36	M/134	117	Elec 14 735			182	2 428	2 134	+ 12%	
			8 416	2 232	4 087					
37	R/280	175	Elec 12 234			199	2 447	2 298	+ 6%	
			9 370	388	2 477					
39	M/113	147	Fuel 12 901			---	194	2 005	1 806	+ 10%
			8 764	4 137						

En parallèle, les degrés jour réels DJ_R sont calculés en utilisant la même méthode de calcul pour DJ_{18} mais sur la base des températures intérieures mesurées sur au moins 2 zones de la maison. Les écarts quotidiens sont cumulés sur la saison de chauffage.

$$\text{Si } \theta_{\text{ext max}} < 18^\circ\text{C} \quad DJ_R = \theta_{\text{int}} - \left(\frac{(\theta_{\text{ext min}} + \theta_{\text{ext max}})}{2} \right) \quad (1)$$

Les valeurs de DJ_{18} et DJ_R sont comparées aux valeurs DJ_{18} , Degrés Jours Unifiés base 18°C calculés à partir des données météo moyennes sur 30 ans.

La figure 1.7 montre les degrés jour cumulés sur les mois de la période d'hiver pour la maison 1

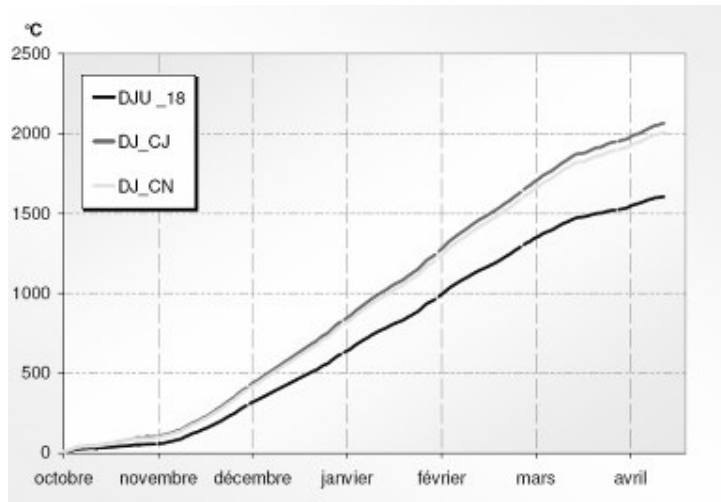


Figure 1.7 : Degrés-Jours Réels DJ_R (CJ) coin jour et DJ_R (CN) coin nuit en comparaison avec DJ_{18} de la Maison M01

3. 2. 3. Énergie primaire et rendement de chauffage

Une source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Elle n'est pas toujours utilisable directement et doit, le plus souvent, être transformée en une source d'énergie secondaire pour être mise en œuvre, c'est-à-dire stockée, transportée et utilisée. Pour permettre les comparaisons et des analyses à grande échelle, toutes les formes d'énergie sont exprimées à l'aide d'une unité commune : la tonne équivalent-pétrole ou [tep].

Dans cette étude, reprenant les coefficients d'équivalence de la RT2000 et afin de comparer la consommation finale sur la base d'une énergie primaire kWh_{EP} , la consommation réelle de chauffage électrique est multipliée par 2,58 ; les consommations réelles de chauffage du bois, du gaz et du fuel sont multipliées par 1.

3. 2. 4. Besoins annuels pour le chauffage : calculs et mesures

Les besoins de chauffage sont calculés pour chaque MBM à partir du ratio de consommation mesurée pour le chauffage C_{ch}^M (valeur en kWh/m^2 et par an) en prenant en compte les rendements des systèmes de chauffage utilisés R_{ch} (valeurs de la méthode DEL2) et les degrés jours réels.

Afin de comparer les performances des MBM entre elles et afin de s'affranchir à la fois des conditions climatiques et des dimensions des maisons, on utilisera le ratio annuel de besoins pour le chauffage B_{ch}^M exprimé de la manière suivante :

$$B_{ch}^M = C_{ch}^M \times R_{ch} / (DJ_R \times S_h)$$

Le résultat est donc un ratio de besoins annuels pour le chauffage exprimant les besoins divisés par les degrés-jours du site et par la surface chauffée ; les valeurs figurant sur le tableau 1.3 sont exprimées en $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. De la même manière, on exprime le ratio de besoins de chauffage calculés B_{ch}^C basé sur la consommation de chauffage obtenue à partir de la méthode DEL2.

3. 2. 5. Calculs réglementaires RT2000 :

Coefficients $U_{bat-MBM}$, $U_{bat-réf}$ et consommations conventionnelles C_{MBM} , $C_{réf}$

A l'aide des règles TH-BAT (RT2000) et suivant une démarche maintenue dans la version RT2005, on exprime les 2 coefficients suivants en $W/(m^2.K)$:

- $U_{BAT}^{réf}$, valeur de référence fonction des surfaces des différentes parois de la maison et de la zone géographique,
- U_{BAT}^{MBM} , valeur exprimant les déperditions réelles par transmission à travers les parois séparant le volume chauffé du bâtiment, de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés.

Pour un bâtiment bien isolé, on vise à avoir $U_{BAT}^{MBM} \leq U_{BAT}^{réf}$ sachant que l'arrêté RT2000 tolère un dépassement maximum de 30% pour les bâtiments d'habitation.

Pour cette étude, les coefficients ont été calculés pour chaque MBM en utilisant le logiciel Perrenoud U21 ; les données d'entrée sont organisées en plusieurs parties : données techniques, catalogues vitrages, parois, et ponts thermiques. Toutes ces valeurs ainsi que les résultats des calculs sont présentés et détaillés sur l'Annexe 3 et 4.

Ensuite, les consommations conventionnelles C et $C_{réf}$ ont été calculées en utilisant la méthode réglementaire TH-C avec pour principales données d'entrée :

- système ventilation,
- type et système de chauffage avec régulation, distribution et émission,
- production d'Eau Chaude Sanitaire ECS.

Partant des valeurs trouvées, on a calculé 2 indices de performance relatifs à la RT2000, pour chaque maison :

- Indice performance « enveloppe bâtiment » P_U (exprimé en %) à partir de $U_{BAT}^{réf}$ et U_{BAT}^{MBM} ,
- Indice performance « consommation » P_C (exprimé en %) à partir de C et $C_{réf}$.

$$P_U = 100 \left(U_{BAT}^{MBM} / U_{BAT}^{réf} - 1 \right)$$

$$P_C = 100 \left(C_{MBM} / C_{réf} - 1 \right)$$

Les résultats de calcul nous permettent de déterminer la performance des maisons dans le cadre de la réglementation RT2000. Si $P_U \leq 0$, la maison respecte la valeur du coefficient U_{bat} de référence, si $P_C \leq 0$, la maison respecte l'exigence de consommation globale de la RT2000.

3. 3. Résultats et discussions

Le tableau 1.3 synthétise les résultats de calculs des consommations, rendement de chauffage, valeurs de Degrés Jours DJ_R , DJ_{18} et DJ_U , besoins de chauffage ainsi que les 2 indices de performances P_U et P_C relatifs à la RT2000.

Tableau 1.3 : Exploitation et calculs des performances énergétiques des 20 MBM

N°	Maison			Cch kWh/m ² par an ⁵		Cch kWhEP/m ² par an		R _{ch} ⁶	DJ ₁₈ Perrenoud ⁷	DJ Base TrC	DJ		Ratio Besoins W/(m ² .°C)		VARIATION BESOINS DJ18/DJR	Indices RT2000	
	Sh (m ²)	Profil	Epaisseur mur	CM ⁸	CC ⁹	CM	CC				DJ _R	DJ ₁₈	BM ¹⁰	BC DJ ₁₈ ¹¹		RT2000 P _U ¹²	P _C ¹³
01	103	M	100	89	119	89	119	72%	2453	1992	2037	1605	31	35	0,11	25%	-7%
02	215	M	100	124	140	124	140	70,5%	2827	2433	4171	3802	21	35	0,66	35%	24%
03	286	M	100	74	126	74	126	62,1%	2918	2465	3188	2690	14	27	0,87	20%	29%
04	156	M	100	96	125	96	125	75,7%	2918	2465	2923	2739	25	33	0,30	30%	0%
10	92	M	100	188	179	188	179	73,9%	2827	2433	3176	3390	44	47	0,07	36%	0%
13	170	M	120	36	33	92	85	330%	2918	2465	3306	2675	36	37	0,05	15%	-1%
14	158	R	280	36	32	93	81	330%	2918	2465	3312	2961	36	36	-0,01	-1%	-8%
15	103	R	280	134	137	134	137	66%	2626	2240	3798	2948	23	34	0,49	19%	6%
21	162	M	134	160	90	196	232	62%	3016	2553	3268	2718	30	19	-0,39	5%	9%
22	149	M	134	106	82	148	211	67%	2272	1903	1820	1694	39	24	-0,38	22%	25%
23	102	M	110	105	121	270	311	91%	2675	2215	3712	2510	26	41	0,60	30%	27%
25	96	M	110	56	103	138	267	95%	2364	1925	1908	1943	28	42	0,50	43%	50%
27	129	M	110	65	128	126	330	95%	2520	2052	2361	1763	26	48	0,84	24%	26%
28	254	M	134	88	107	88	107	84%	2559	2433	3246	2594	23	35	0,54	17%	-2%
29	153	M	110	54	112	139	289	95%	2136	1716	2415	1901	21	50	1,34	38%	36%
31	82	R	300	151	206	151	206	57,4%	2827	2433	2888	3029	30	42	0,40	6%	-5%
35	248	M	134	80	75	207	195	96%	2520	2052	2158	2063	36	29	-0,19	15%	20%
36	147	M	134	57	79	148	205	96%	2520	2052	2428	2134	23	30	0,33	10%	17%
37	190	R	300	49	73	127	189	96%	2626	2240	2447	2298	19	27	0,38	6%	9%
39	147	M	112	60	92	60	92	72,2%	2272	1903	2005	1806	22	29	1,08	49%	0%

⁵ Consommation de Chauffage en kWh (énergie finale)

⁶ Rendement de chauffage via DEL2

⁷ DJU₁₈ (moyenne trentenaire)

⁸ Consommation mesurée sur site

⁹ Consommation calculée en utilisant la méthode de calcul DEL2

¹⁰ Besoins de chauffage mesurés

¹¹ Besoins de chauffage calculés

¹² Performance « enveloppe bâtiment » (calculée à partir des coefficients $U_{bât}$ et $U_{bât\ réi}$)

¹³ Performance « consommation » (calculée à partir des C et C_{ref} de RT2000)

3. 3. 1. Utilisation du chauffage et comportement des usagers

Les valeurs de degrés jours réels [DJ_R] et base 18 °C [DJ_{18}] montrent bien le comportement des occupants et l'utilisation du chauffage dans les maisons ; ils sont calculés à partir des mesures réelles de température à l'intérieur et à l'extérieur de bâtiment. Sur la figure 1.8 sont représentées les valeurs DJ_R et DJ_{18} observées sur les 20 MBM étudiées.

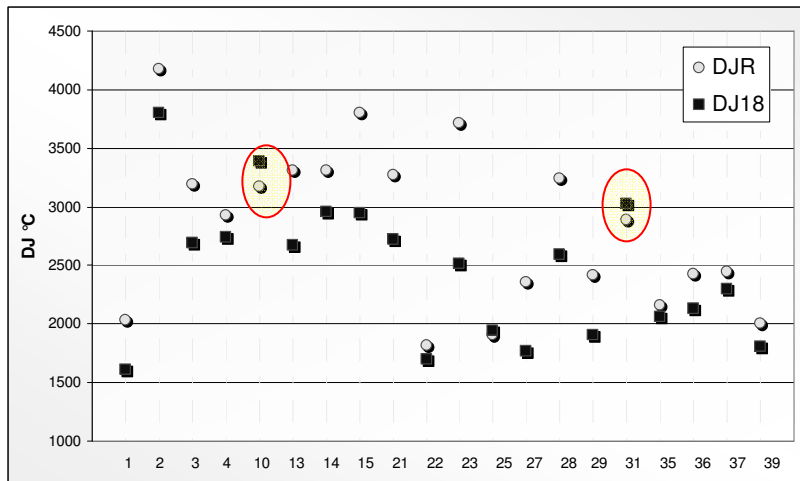


Figure 1.8 : Comparaison entre les DJ Réels et DJ base 18 observés sur les 20 MBM (valeurs en °C.j)

On peut remarquer que :

- 18 maisons ont des valeurs DJ_R supérieures à celui de DJ_{18} , les deux cas restants présentent une utilisation de chauffage non continue (vacances ou absence pendant une longue période),
- l'écart important existant entre la valeur DJR de la maison M02 (4171 °C.j) situé dans le Jura et celle de la maison M22 (1820 °C.j) situé à Bordeaux,
- L'écart moyen entre DJ_R et DJ_{18} est de 12% et l'écart maximum est de 32% pour la maison M23.

On en conclue qu'à l'exception des maisons M10 et M31, les MBM sont chauffées en moyenne bien au dessus des 18°C de base et que les conditions minimales de confort sont globalement maintenues durant la période de chauffage dans ces habitations.

3. 3. 2. Analyse des indices de performances RT2000 « Enveloppe bâti » (P_U) et « Consommation » (P_C)

Avant de détailler l'analyse et de chercher les interactions entre les paramètres constructifs et les consommations, plusieurs remarques relatives aux exigences de la RT2000 peuvent être faites sur la base des indices P_U et P_C à l'échelle des 20 MBM étudiées :

- Seule une maison M14 réalisée en Rondins R_{280} présente un coefficient U_{BAT}^{MBM} inférieur à la valeur de référence de la RT2000,
- 4 maisons seulement respectent les gardes fous de la RT2000, et 2 de ces 4 maisons seulement respectent l'indice P_B de RT2000,

- 7 maisons ont des valeurs U_{BAT}^{MBM} supérieures de plus de 30% à la valeur de référence et ne satisfont pas à l'exigence de la RT2000 sur les déperditions par transmission de maisons individuelles,
- En moyenne, les 20 maisons calculées dépassent de 22%, la valeur U_{BAT}^{ref} demandée avec un écart maximum de 49% (maison M39),
- 8 maisons satisfont l'exigence sur le critère de consommation globale C (meilleur indice pour la maison M14 en rondins R₂₈₀ et plus mauvais indice pour la maison M25 en madriers M₁₁₀). Pour ces 8 MBM, on observe que l'épaisseur de la paroi varie entre 100 mm et 300 mm (M₁₀₀, M₁₂₀, M₁₃₄, R₂₈₀ et R₃₀₀).
- Toutes les maisons pour lesquelles l'indice P_C est supérieur à 25%, sont des maisons en madriers de 100 ou 113 mm (M₁₀₀ ou M₁₁₃).

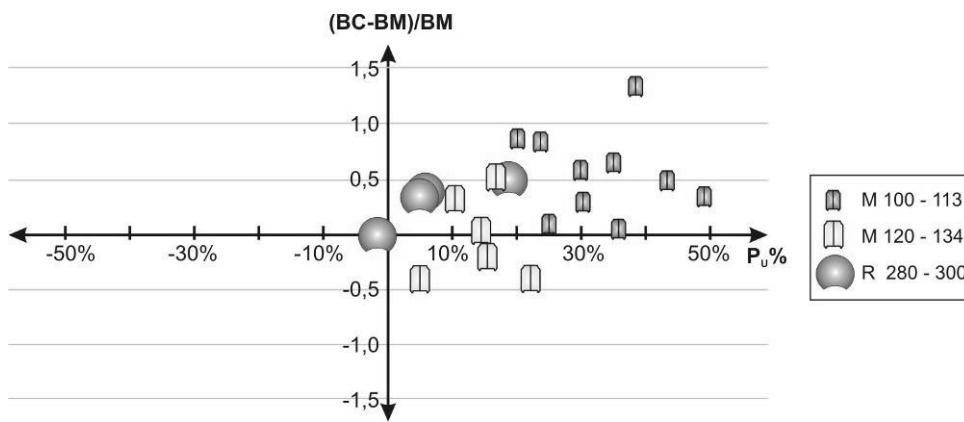


Figure 1.9 : Relation entre l'indice RT2000 de performance « Bâtiment » P_u et l'indice de « besoins calculés sur besoins mesurés », avec indication du type de madrier.

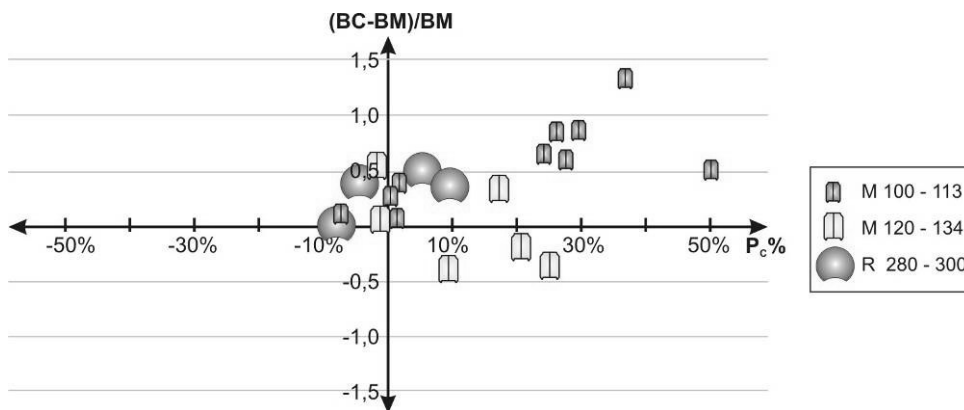


Figure 1.10 : Relation entre l'indice de performance « Consommation » P_c et l'indice de « besoins calculés sur besoins mesurés », avec indication du type de madrier.

3. 3. 3. Analyse des consommations pour le chauffage

Sur les 20 MBM, 15 maisons présentent des consommations de chauffage mesurées inférieures aux consommations de chauffage calculées.

Parmi les 5 maisons restantes, 3 maisons ont des problèmes de chauffage ou d'isolation repérés pendant l'étude :

- M21 possède une piscine chauffée à l'extérieur,
- M22 a un problème lié à un mauvais rendement de son système de chauffage à bois,
- M35 a un problème d'isolation.

On représente sur la figure 1.11, les ratios de consommations de chauffage calculés [C_{ch}^C] exprimées en kWh/m² par an, par rapport aux consommations de chauffage mesurées [C_{ch}^M].

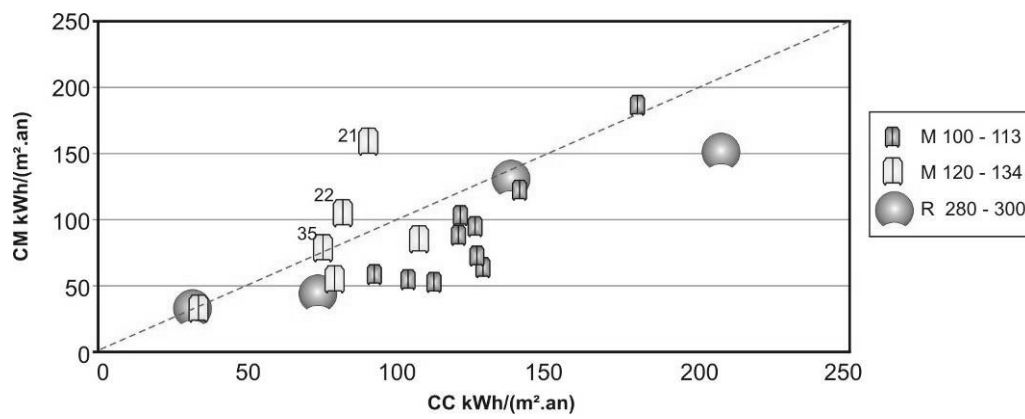


Figure 1.11 : C_{ch}^C par rapport à C_{ch}^M , les diamètres de point montrent l'épaisseur de la paroi.

La moyenne des consommations mesurées sur les 20 MBM est de 85 kWh/(m².an) alors que l'on trouve une moyenne de 104 kWh/(m².an) pour les valeurs calculées ; les mesures montrent que C_{ch}^M est 18% en dessous des prévisions.

Afin d'établir une comparaison sur une base climatique comparable, les mêmes calculs ont été repris avec une valeur de Degrés jours moyenne de 2200 °C.j. On représente sur la figure 1.12, ces ratios de consommation annuelle pour le chauffage mesurée [C_{ch}^M] (ratio par surface chauffée et pour DJ de 2200 °C.jour). Les consommations annuelles mesurées base DJ_{2200} donnent une valeur moyenne de 71,5 kWh/(m².an) avec un minimum de 23,8 kWh/(m².an) et un maximum de 130,4 kWh/(m².an).

A ce niveau, on ne peut pas établir de relation entre l'épaisseur (ou le profil) du madrier et la consommation mesurée ; la consommation de la maison M23 (M₁₂₀ mm) est la plus faible avec 23,8 kWh/(m².an) suivi par la maison M14 (R₂₈₀ mm) avec 24,0 kWh/(m².an).

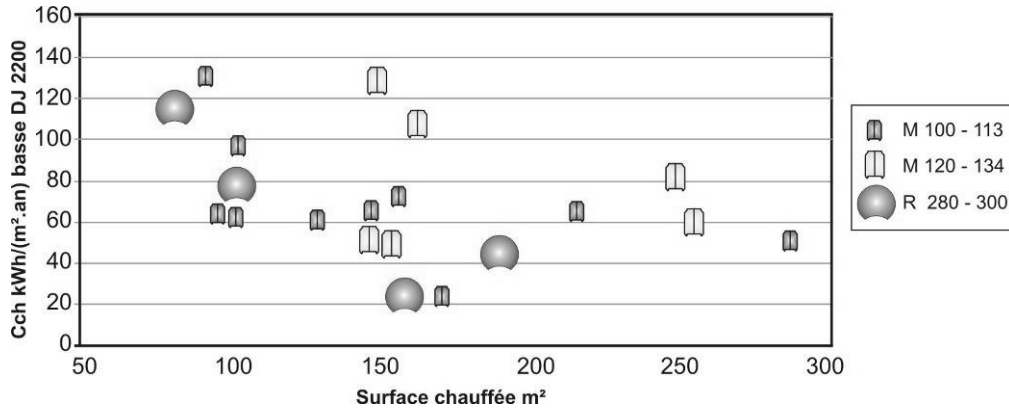


Figure 1.12 : Comparaison des ratios de consommation annuelle pour le « chauffage » des 20 MBM, par surface chauffée et sur la base d'une valeur DJ de 2200 °C. jour (Diamètre et couleurs des points montre l'épaisseur des parois de chaque maison)

3. 3. 4. Comparaison entre consommations et besoins pour le chauffage

Par cette comparaison, on souhaite mettre en évidence l'influence du système de production de chauffage. Par exemple, une pompe à chaleur (PAC) consomme moins d'énergie que ses besoins réels (maisons M13 et M14, cette dernière étant affectée par un chauffage partiel au bois).

Le chauffage électrique consomme pratiquement une quantité d'énergie égale aux besoins : le rendement est proche de 100 % (maisons M23, M25, M27, M29, M35, M36 et M37). La consommation traduite en énergie primaire est multipliée par un rapport d'équivalence 2,58.

Les chauffages réalisés à partir des énergies fuel, du gaz, présentent des rendements de l'ordre de 90 %. Les systèmes de chauffage consomment plus d'énergie que les besoins stricts (maisons M01, M02, M03, M04, M10, M15, M28 et M39). Le chauffage au bois, avec un mauvais rendement (inférieur à 70 %), a pour conséquence, un écart encore plus important entre les besoins et l'énergie consommée (maison M21, M22 et M31) (Figure 1.13).

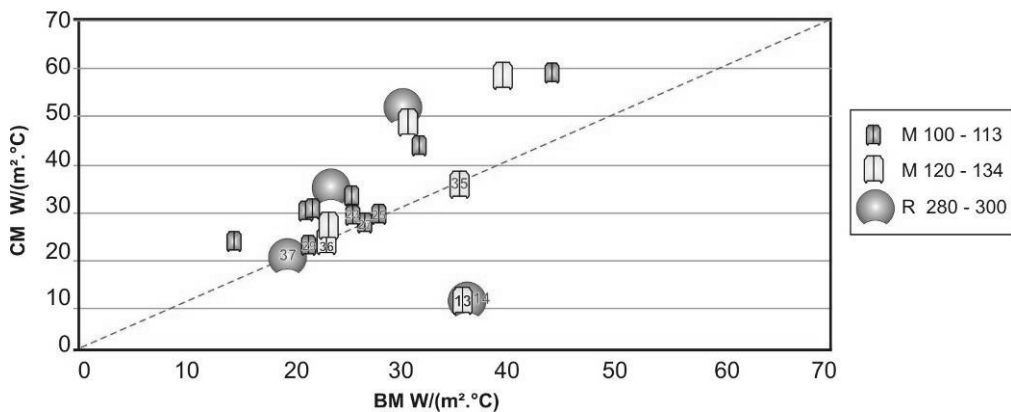


Figure 1.13 : Comparaison entre les 2 ratios de consommations et de besoins pour le chauffage des 20 MBM (valeurs annuelles réelles exprimées en $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)

3. 3. 5. Analyse des ratios de besoins de chauffage

On étudie enfin les performances des 20 MBM par le biais des besoins annuels de chauffage. Afin de s'affranchir d'une part, du rendement du système de chauffage et de la variabilité qui en découle, et d'autre part, des charges climatiques (Degrés Jours) variables selon les sites, on utilise le ratio de besoins de chauffage exprimé en $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ défini précédemment.

On constate ainsi que :

- Seules 3 MBM (M21, M22 et M35) présentent des ratios mesurés B_{Ch}^M supérieurs aux besoins calculés B_{Ch}^C ,
- 17 maisons ont des ratios mesurés B_{Ch}^M inférieurs aux valeurs calculées B_{Ch}^C .

Sur la figure 1.14 sont présentés les ratios B_{Ch}^C exprimées en $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, par rapport aux valeurs B_{Ch}^M pour les 20 maisons.

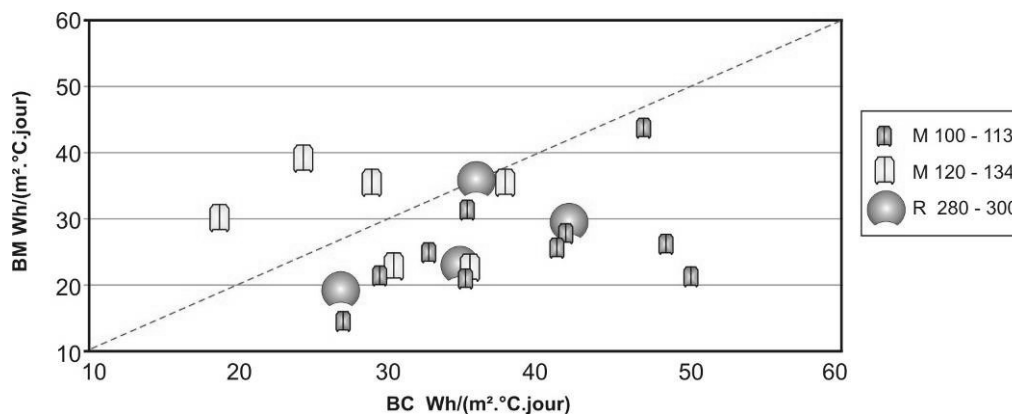


Figure 1.14 : BC par rapport à BM, les diamètres de point montrent l'épaisseur de la paroi.

En moyenne, les ratios de besoins mesurés B_{Ch}^M sont égaux à $28 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ et les valeurs calculées B_{Ch}^C égales à $35 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. L'écart moyen entre le prévisionnel calculé et le réel mesuré est de 23% et semble confirmer l'hypothèse que les modèles de calcul « simplifiés » (type RT2000 ou DEL2) surestiment les valeurs réelles de besoins pour le chauffage.

4. Analyse des niveaux de température intérieure et du confort thermique dans les maisons bois massif

« Grâce à leurs excellentes performances en matière d'isolation thermique, les maisons en bois assurent un confort optimal en toutes saisons. La construction permet de réaliser des maisons qui respirent vraiment » (Pénicaud, 2004), « Le bois est le seul matériau qui apaise, et qui respire », « Le bois, particulièrement performant contre le froid, est aussi très bien adapté aux régions chaudes » (Billand, 2002). Ces paragraphes sont choisis parmi des centaines des documents français liant l'habitat bois avec le confort et une faible consommation de chauffage, mais les études scientifiques sur le confort dans ces constructions en bois sont très rares.

A partir de la campagne de mesures AFCOBOIS et en s'appuyant sur les démarches et indices de confort habituellement utilisés dans l'habitat, on cherche à mettre en évidence les spécificités et les qualités de ce type d'habitat bois.

4. 1. Démarche et critères de calcul du confort dans l'habitat

4. 1. 1. Mesures de température et humidité relative dans les MBM

Les mesures de la température à l'intérieur et à l'extérieur de chaque maison sont obtenues à partir des capteurs HOBO installés sur site. Pour chaque maison, deux diagrammes synthétisent les mesures l'un, pour la période Hiver et l'autre, pour la période Eté. On présente ci-dessous les valeurs moyennes, maximum et minimum de la température et d'humidité relative pour chaque maison et pour l'ensemble des maisons sur deux zones Coin Jour et Coin Nuit et à l'extérieur pendant les 2 périodes. Dans le cadre de l'étude AFCOBOIS, le traitement a été réalisé pour chaque maison ; on trouvera un exemple de ce dossier en annexe 2.

Tableau 1.4 : valeurs moyennes de la température et d'humidité relative pour l'ensemble des 20 maisons sur deux zones (Coin Jour [CJ], Coin Nuit [CN]) et à l'extérieure [Ext] pendant la période d'hiver et la période d'été.

		Période d'hiver			Période d'été		
		CJ	CN	Ext	CJ	CN	Ext
T °C	Moy	20,4	20,2	4,5	22,9	22,5	18,9
	Max	25,1	25,3	25,6	28,6	28,8	35,8
	Min	15,0	15,1	-12,1	17,9	15,8	4,7
HR%	Moy	40	40	80	55	57	68
	Max	64	63	98	71	73	96
	Min	23	15	18	34	34	21

L'analyse des températures et HR% en trois périodes d'essai sur les trois zones de chaque maison sont présentés pour chacune des 20 maisons sur deux figures identiques (voir exemple figures 1.15). On peut analyser en particulier, l'effet de réduction des amplitudes thermiques par rapport aux conditions extérieures constatées sur les MBM.

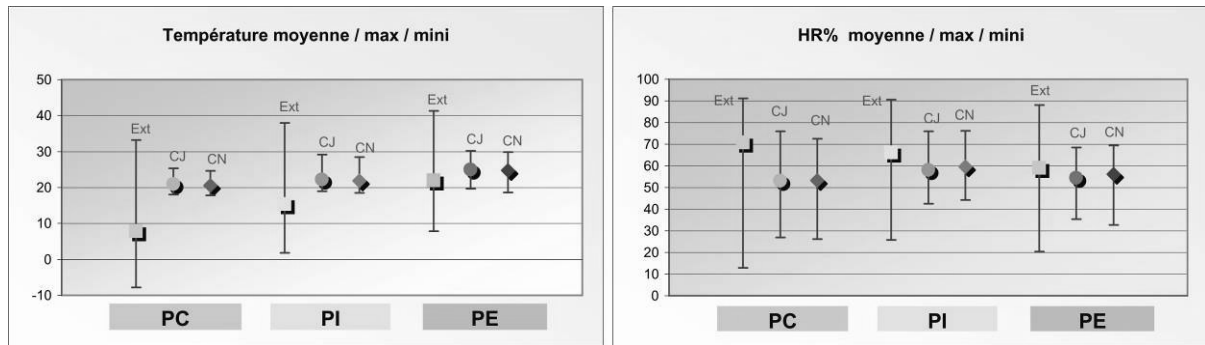


Figure 1.15 : Température (a) et Humidité Relative HR% (b) sur les 3 zones de maison (Extérieur, Coin Jour, Coin Nuit) pour 3 périodes (PC, Période de Chauffage, PI, Période intermédiaire et PE, Période d'été)

4. 1. 2. Critères de confort

Le confort est un critère important tant pour le bien-être de la personne qui occupe les lieux que pour assurer ses activités dans de bonnes conditions. Il peut être atteint seulement lorsque la température, l'humidité et le mouvement de l'air se situent à l'intérieur des limites de ce qu'on appelle la « zone de confort ».

Pour déterminer des conditions appropriées, les praticiens se réfèrent à des normes telles que la norme américaine 55 (ASHRAE, 1992), la norme canadienne CSA Z412-F00 et la norme française de l'OIN 7730 (ISO, 1994). Ces normes définissent les températures ambiantes qui devraient avoir comme conséquence la satisfaction thermique pour au moins 80% d'occupants dans un local intérieur (tableau 1.5). Les normes sont basées principalement sur les modèles, développés par Fanger sur la base des études de laboratoire (Charles, K., 2003)). La zone de confort définie par ASHRAE Standard 55, 1992 est présenté dans la figure 1.16.

Tableau 1.5 : Exemples de plages de température opérative jugées acceptables, basées sur les diagrammes de la zone de confort.

Norme	Conditions	Température °C	HR%
CSA Z412-F00 (Canada)	Hiver	20 – 35	50%
	Été	23 - 26	50%
55-2004 de l'ASHRAE (USA)	Hiver	20,5 - 25,5	30%
	Été	24,5 - 28	30%
	Été	23 - 25,5	60%
NF ISO 7730 (Afnor NF X 35-121)	Hiver	20 – 24	30 – 60%
	Été	23 – 26	30 – 60%

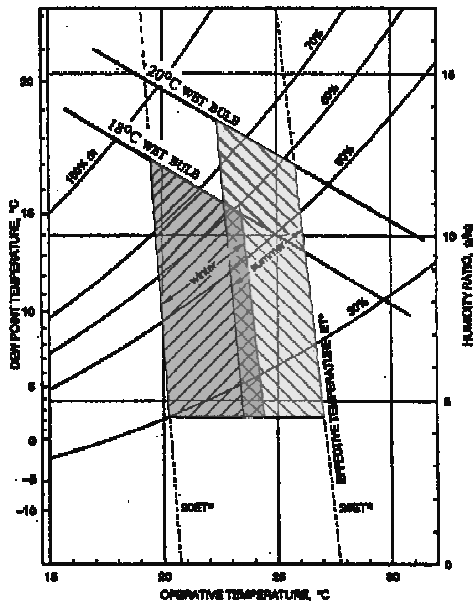


Figure 1.16 : Plage de température opérative et humidité acceptables pour des personnes portant des vêtements d'été ou d'hiver habituels et effectuant un travail léger et sédentaire (ANSI/ASHRAE 55a-1995).

La RT2000 marque la volonté d'apporter un confort d'été minimum dans les logements en maîtrisant les consommations associées et se traduit par l'intégration dans le calcul « projet », des consommations pour le refroidissement et par l'exigence de respecter une température intérieure d'été de référence. Signalons que cette consommation « refroidissement/climatisation » n'est pas intégrée au calcul de « référence ».

Dans notre étude, nous avons choisi une zone de confort d'hiver avec des températures intérieures inférieures à celles demandées par la norme française et la norme ASHRAE. Les maisons étudiées sont associées à des thermostats d'ambiance (ou des robinets thermostatiques sur radiateurs) qui permettent d'adapter la quantité de chaleur émis aux besoins instantanés de chauffage. Ce qui permet aux usagers, d'abaisser la température de 3°C dans le coin jour pendant la nuit et dans le coin nuit pendant la journée. Pour cela, les limites de zone de confort sont maintenues entre 18°C et 23°C pendant la saison de chauffage et entre 19°C et 27°C pendant la période d'été, lorsque l'humidité relative varie entre 30 et 60% (Figure 1.17).

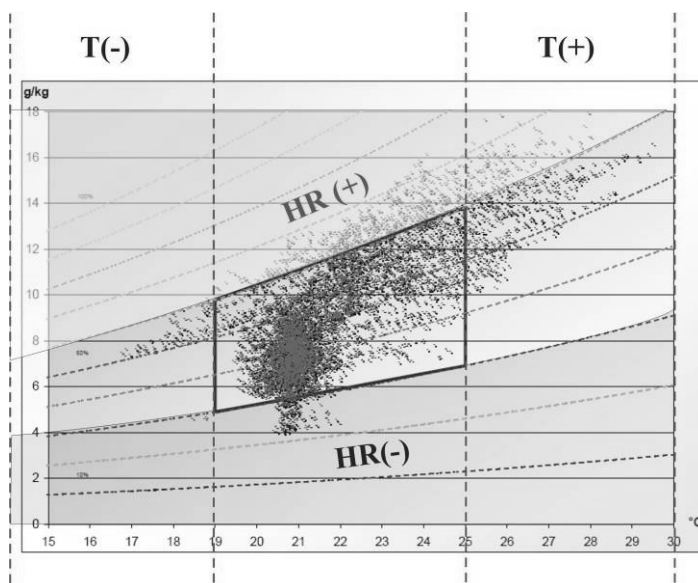


Figure 1.17 : Zone de confort, d'inconfort et diagramme de l'air humide

Afin de mettre en évidence le confort mesuré sur site, nous avons représenté chaque point de mesure sur le diagramme de l'air humide. Nous en déduisons ensuite le ratio des points situés en dehors de la zone de confort par rapport au total des points de mesures.

Les pourcentages liés à chacune des 4 situations d'inconfort possibles, sont calculés pour les 2 zones de chaque maison (coin jour CJ et coin nuit CN) :

- « sous chauffe » noté $T_{int} -$,
- « sur chauffe » noté $T_{int} +$,
- « trop sec » noté $DH -$,
- « trop humide » noté $DH +$

En synthèse, nous présentons le pourcentage total d'inconfort dans chaque maison sur une période donnée pour les 2 mêmes zones (Exemple sur Figure 1.18).

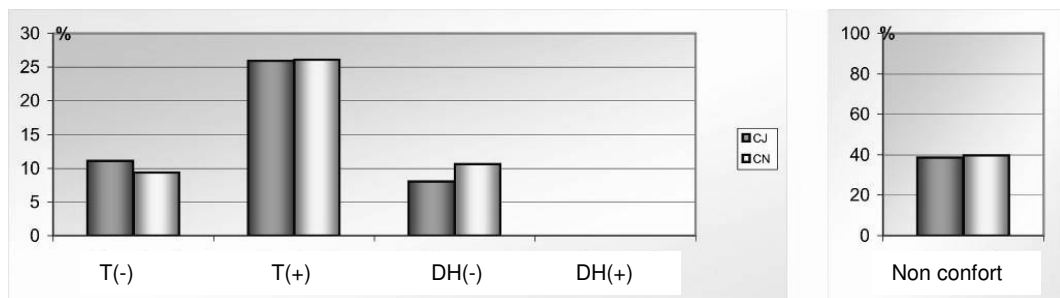


Figure 1.18 : Pourcentages d'inconfort de chaque maison pour les 2 zones CJ et CN (Points situés en dehors de la zone de confort)

4. 1. 3. Critère de confort d'été dans la RT2000 : $T_{ic} \leq T_{ic-réf}$

La réglementation énergétique (RT2000) intègre des exigences relatives au confort d'été, l'objectif étant de réduire autant que possible, l'inconfort au sein des bâtiments non climatisés.

Les paramètres pris en compte par la RT2000 pour le respect de l'exigence « confort d'été », sont : la zone climatique d'été (quatre au total), l'inertie du bâtiment, la potentialité d'ouverture des fenêtres, l'orientation des baies et leur exposition aux bruits extérieurs et la protection solaire des baies caractérisée par leur facteur solaire. Le respect de la réglementation est assuré si les deux exigences suivantes sont respectées :

- ouverture minimale des baies (les baies d'un local doivent pouvoir s'ouvrir sur au moins une partie de leur surface totale),
- la température maximale atteinte en été (T_{ic} : température intérieure conventionnelle) doit rester inférieure à celle obtenue dans le bâtiment où seraient appliquées les solutions de référence ($T_{ic}^{réf}$). Cette exigence peut être vérifiée par le calcul ou par le respect direct des références.

Afin de détailler les résultats des calculs de confort d'été par la RT pour ce type de construction, les valeurs de T_{ic} ainsi que la $T_{ic}^{réf}$ sont calculées pour les 20 maisons à l'aide de logiciel U21. Pour comparaison, nous avons choisi la semaine de mesures la plus chaude (19 au 25 Juin 2005) avec

une température extérieure maximum allant jusqu'à 41,3°C dans certaines régions. Pendant cette période, la température varie selon la situation géographique et l'altitude de chaque maison. Ensuite, nous avons comparé les valeurs de la température maximum et moyenne sur les 20 maisons avec celles calculées par la réglementation thermique RT2000.

Sur la figure 1.19 sont représentés des exemples de variations de températures intérieures mesurées en fonction de la température extérieure sur 4 maisons pour une période d'une semaine.

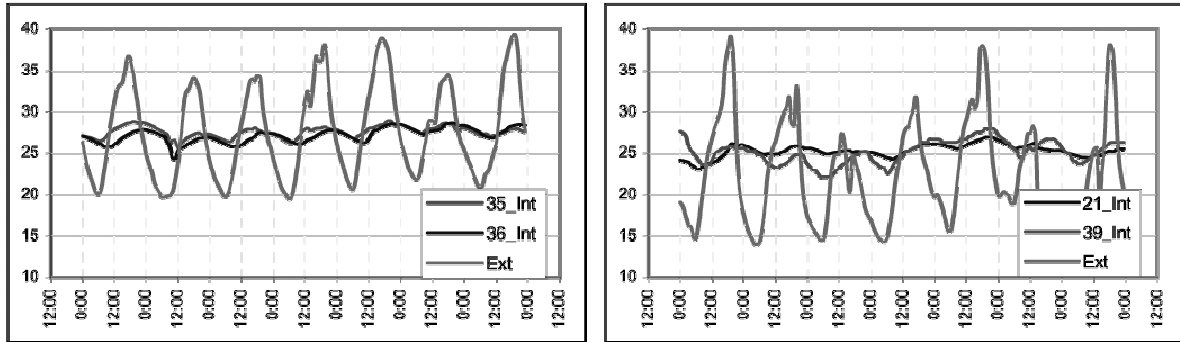


Figure 1.19 : Evolutions de températures intérieures MESUREES dans 4 MBM

Sur la figure 1.20, on trouve un exemple des résultats obtenus par le logiciel U21 pour le calcul de T_{ic} et T_{ic}^{ref} .

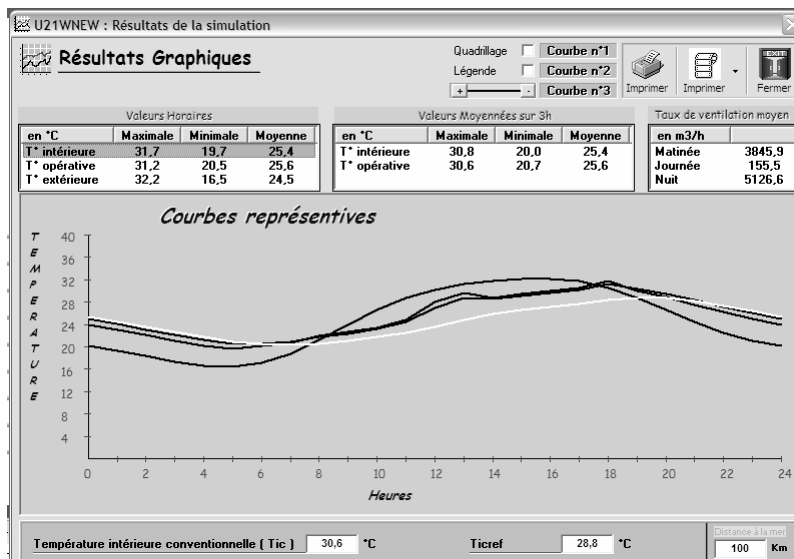


Figure 1.20 : Evolutions de températures intérieures CALCULEES par méthode TH-CE (logiciel U21)

4. 2. Résultats des mesures et discussions

4. 2. 1. Analyse des températures et humidités relatives mesurées

À partir de données mesurées à l'intervalle de 15 minutes, nous avons effectué une analyse de température et humidité relative (HR%) pour chaque maison et pour les trois zones de mesure : extérieur sous abri, coin jour et coin nuit.

Nous avons distingué deux périodes de référence :

- Période Hiver (du 1^{er} Octobre jusqu'au 20 Avril),
- Période Été (du 21 Juin jusqu'au 20 septembre).

Sur la figure 1.21 sont présentées les valeurs de la température moyenne intérieure sur les 20 maisons ainsi que les valeurs maximum et minimum.

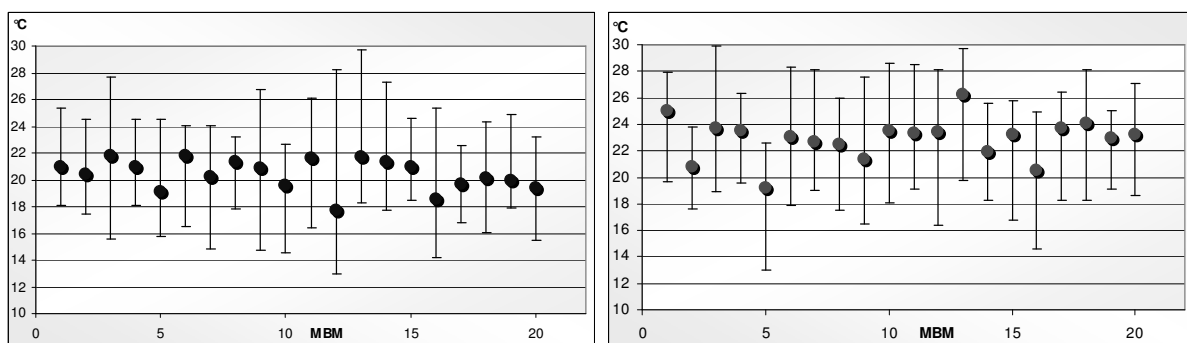


Figure 1.21 : Températures moyennes T°C, max et min sur la période Hiver (bleu) et période Été (Rouge).

Les valeurs moyennes de températures montrent que, pendant la période HIVER, la température moyenne à l'intérieur des maisons reste entre 18 et 22°C, les valeurs minimums indiquent les périodes inoccupées (vacances) pendant lesquelles le chauffage est réduit. La température maximum reste toujours inférieure à 25°C pour 65% des maisons.

Pendant la période Été, la température moyenne est inférieure à 25°C pour 95% des maisons monitorées. La température maximum reste inférieure à 28°C sur 85% des cas. L'analyse des températures pour les 20 maisons confirme les observations relevées via notre questionnaire sur le confort dans les maisons en bois massif. Pour la totalité des maisons, les propriétés sont satisfaites du confort thermique dans leurs maisons en dehors des défauts ponctuels souvent liés à des problèmes de mise en œuvre des isolations (en particulier, aux liaisons entre parties verticales et plafonds).

Concernant les niveaux d'humidité relative mesurés, les valeurs restent dans les limites acceptables pendant les deux périodes Hiver et Été ; les maximums relevés au dessus de 60% ne représentent pas plus de 2% des temps de mesure.

Sur la figure 1.22, sont représentées les valeurs d'humidité relative sur les deux périodes de l'étude.

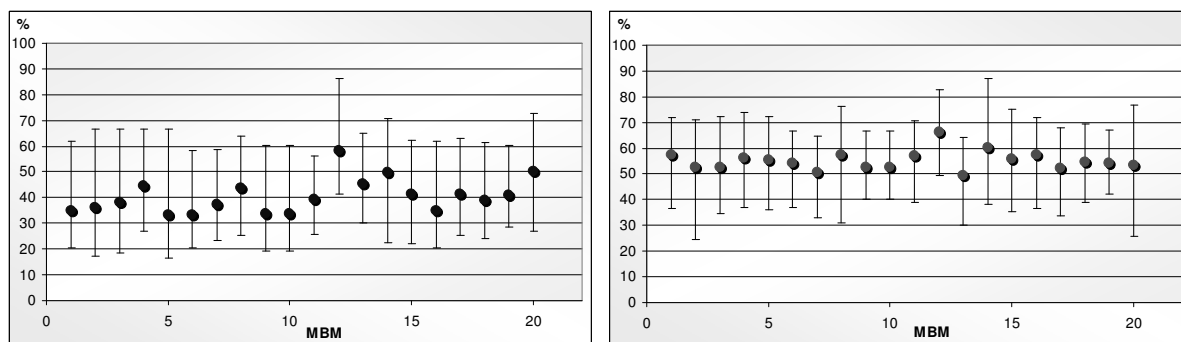


Figure 1.22 : Humidité relative moyenne, max et min sur la période Hiver (bleu) et période Eté (Rouge)

4. 2. 2. Analyse du confort dans les 20 MBM

Les résultats des calculs de taux d'inconfort pour les 20 maisons en bois massif sont représentés sur le tableau 1.6

Tableau 1.6 : Taux d'inconfort sur les 20 Maisons Bois Massif pendant la période d'hiver et la période d'été (les taux supérieurs à 20 % sont surlignés)

Maison	Période HIVER					Période ETE				
	T _{int} -	T _{int} +	DH-	DH+	Inconf ort	T _{int} -	T _{int} +	DH-	DH+	Inconf ort
1	0 %	5 %	0 %	2 %	6 %	0 %	20 %	0 %	23 %	25 %
2	0 %	1 %	2 %	1 %	4 %	0 %	1 %	0 %	0 %	2 %
3	4 %	21 %	1 %	1 %	25 %	0 %	8 %	0 %	10 %	16 %
4	1 %	2 %	1 %	1 %	3 %	0 %	8 %	0 %	20 %	25 %
10	20 %	1 %	36 %	1 %	45 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %
13	0 %	3 %	1 %	0 %	5 %	0 %	7 %	0 %	9 %	12 %
14	9 %	3 %	2 %	0 %	12 %	0 %	3 %	0 %	2 %	5 %
15	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	3 %	0 %	10 %	11 %
21	11 %	26 %	8 %	0 %	38 %	0 %	8 %	0 %	1 %	8 %
22	3 %	0 %	0 %	0 %	3 %	0 %	11 %	0 %	21 %	21 %
23	3 %	14 %	0 %	0 %	17 %	0 %	5 %	0 %	13 %	14 %
25	68 %	0 %	0 %	1 %	69 %	0 %	6 %	0 %	51 %	52 %
27	24 %	44 %	0 %	3 %	68 %	0 %	37 %	0 %	20 %	42 %
28	0 %	1 %	0 %	0 %	2 %	0 %	2 %	0 %	5 %	5 %
29	0 %	1 %	1 %	0 %	2 %	0 %	9 %	0 %	16 %	18 %
31	38 %	4 %	27 %	0 %	55 %	0 %	6 %	0 %	2 %	6 %
35	3 %	0 %	0 %	0 %	3 %	0 %	18 %	0 %	13 %	18 %
36	5 %	1 %	2 %	0 %	7 %	0 %	19 %	0 %	17 %	19 %
37	0 %	1 %	0 %	0 %	1 %	0 %	5 %	0 %	8 %	9 %
39	17 %	0 %	0 %	0 %	18 %	0 %	11 %	0 %	11 %	13 %

On trouve pendant la période d'hiver que le taux de sous-chauffe reste inférieur à 10% sur 14 des 20 maisons. Pour 2 maisons seulement, le taux de sous chauffe est supérieur à 35% des points de mesure. Sur la même période, le ratio d'inconfort est inférieur à 20% sur 14 maisons sur 20.

Pendant la période Eté, le ratio de « sur chauffe » reste inférieur à 10% pour les 20 maisons étudiées (figure 1.23), cela montre que les maisons en bois massif présentent un taux de confort optimal pendant la période d'été.

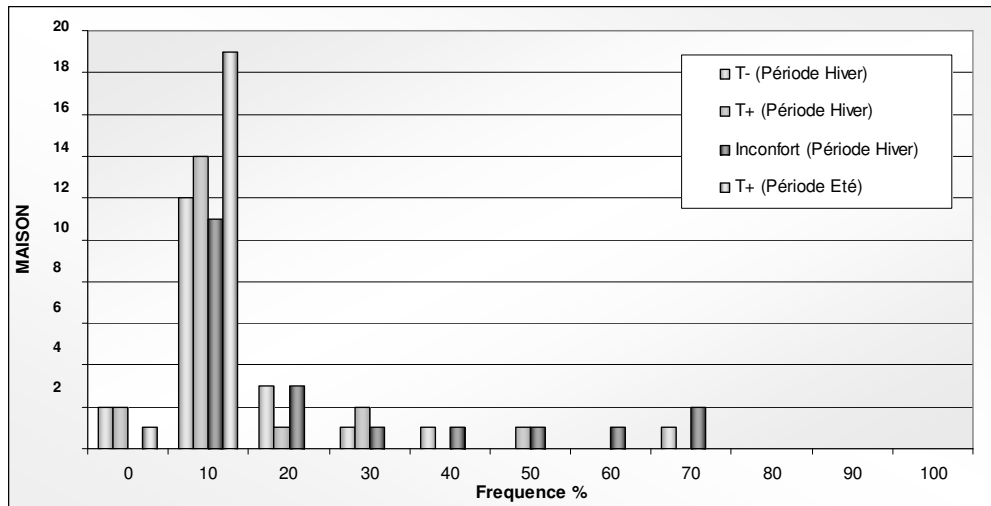


Figure 1.23 Fréquence du taux d'inconfort pour les 20 MBM.

4. 2. 3 Résultats des calculs de confort d'été

Sur le tableau 1.7, sont présentés les résultats de calcul effectués par le logiciel U21 pour les 20 maisons bois massif et comparés à des résultats de mesures sur site pendant la période la plus chaude.

Tableau 1.7 : Température intérieure calculées par RT2000, T_{int} [T_{ic}], T_{int} de référence [$T_{ic\ ref}$] et $T_{ext\ max}$ comparées aux températures maximums mesurées sur site à l'intérieur [$T_{int-max}$] et à l'extérieur [$T_{ext-max}$].

Maison	RT2000			MESURES MBM		
	T_{ic} °C	$T_{ic\ ref}$ °C	<i>Ecart</i> <i>RT2000</i>	$T_{ext\ max}$ °C	$T_{int-max}$	$T_{ext-max}$
M01	26,0	26,9	0,90	30,3	30,1	41,3
M02	28,6	28,8	0,20	31,2	24,8	29,6
M03	30,6	28,8	-1,80	32,2	28,6	33,2
M04	27,6	27,7	0,10	32,2	28,7	33,6
M10	26,4	26,1	-0,30	27,7	24,0	31,8
M13	30,3	28,1	-2,20	32,2	26,7	29,6
M14	25,3	26,0	0,70	29,2	27,5	30,7
M15	24,7	26,1	1,40	30,2	27,5	30,6
M21	25,4	26,0	0,60	27,7	27,0	39,1
M22	29,2	27,8	-1,40	32,2	27,8	33,4
M23	27,8	27,0	-0,80	30,3	28,9	35,5
M25	31,0	29,8	-1,20	31,0	29,1	34,5
M27	32,1	28,8	-3,30	32,1	33,7	39,3
M28	23,6	26,0	2,40	27,3	26,3	34,9
M29	30,3	28,0	-2,30	32,2	28,0	36,1
M31	25,5	26,0	0,50	28,3	26,7	30,7
M35	28,6	27,3	-1,30	32,2	28,9	34,3
M36	27,9	26,8	-1,10	31,2	28,7	34,4
M37	23,6	26,0	2,40	30,2	27,3	33,5
M39	27,9	27,7	-0,20	32,2	27,9	41,1

Les résultats montrent que 9 maisons ont des températures intérieures calculées T_{ic} inférieures aux températures de référence T_{ic-ref} et les 11 autres maisons sont considérées comme « non réglementaires ».

Une étude plus détaillée sur les mesures montre que la température maximum calculée est supérieure à celle mesurée à l'intérieur pour 7 maisons dont 6 maisons « non réglementaires ».

En plus, à part 2 cas (M02 et M13), la température extérieure de référence RT2000 est inférieure aux valeurs mesurées sur site pour le cas retenu (semaine de juin 2005).

Prenons un exemple d'étude, Maison M25 située à Tarbes (65)

Sur la figure 1.24, sont représentées les températures intérieures mesurées et calculées par méthode TH-CE (RT2000) pendant une séquence de 24 heures : on trouve par ce calcul, aucun écart entre la température intérieure à 31,0°C et la référence extérieure. Ce qui semble indiquer dans ce cas, ainsi que dans d'autres cas présentés, que la méthode de calcul prend assez mal en compte le caractère « inertiel » d'une enveloppe à isolation répartie telle que celle du bois massif.

Si on compare sur 24 heures, les amplitudes de température intérieure et extérieures obtenues par le calcul avec celles obtenues par la mesure, on constate que :

- Le calcul Tic traduit un simple déphasage de 2 heures mais aucun écart d'amplitude de température entre intérieur et extérieur,
- Sur cette maison, tout en ayant des conditions extérieures mesurées plus fortes que les données du calcul, l'amplitude de température intérieure mesurée reste inférieure à 5,7°C pendant la période d'été, alors que le calcul Tic donne une variation de 10,80°C.

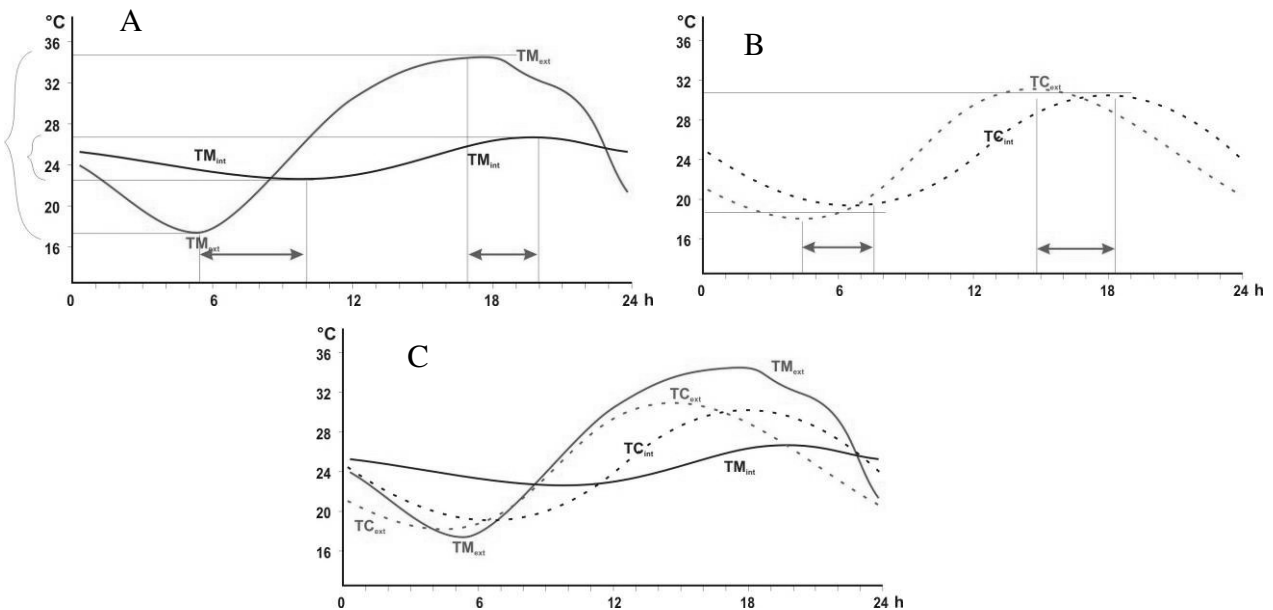


Figure 1.24 : (A) températures mesurées, (B) températures calculées par RT, (C) température mesurée TM et calculée TC à l'intérieur et à l'extérieur pour la maison M25 pendant 24 heures.

Pour les 20 MBM, on a comparé les amplitudes de températures intérieures (écart entre maximum et minimum sur 24 heures) obtenues par les mesures sur site avec les valeurs obtenues par le calcul T_{ic} . Le calcul indique des amplitudes assez importantes, valeurs comprises entre 6 et 13°C. Les valeurs mesurées dans des conditions estivales chaudes, donnent des amplitudes réelles moindres comprises entre 2,7 et 9°C avec une amplitude moyenne de 5°C. L'effet d'atténuation thermique et de confort d'été des maisons en bois massif est donc très insuffisamment traduit par les résultats des calculs de T_{ic} .

Tableau 1.8 : Amplitudes des températures intérieures des maisons, valeurs mesurées et valeurs calculées par Tic

	Moy	Max	Min
Mesure 20 MBM	5	9,1	2,7
RT2000 : Calcul T_{ic}	9,4	13,2	6

Nous avons comparé également, les amplitudes de température intérieure des 20 maisons avec les coefficients de déperditions par transmission U_{BAT} calculés. Les résultats sont représentés sur la figure 1.25. On observe que

- Les amplitudes de température augmentent avec les déperditions globales par transmission calculées pour les 20 MBM,
- les plus fortes amplitudes de température (écarts supérieurs à 7°C) correspondent aux enveloppes les plus déperditives, c'est-à-dire aux valeurs U_{BAT} les plus élevées, trouvées pour 3 MBM en madriers de 100 ou 110 mm,
- A l'inverse, les plus fortes atténuations thermiques (écarts inférieurs à 4°C) correspondent aux maisons les mieux isolées (parois en fustes ou madriers de 134 mm).

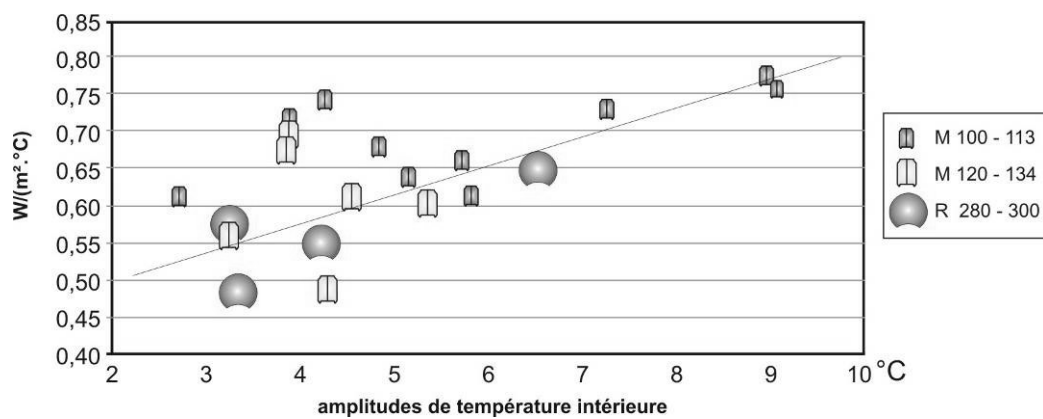


Figure 1.25 : Valeurs du coefficient U_{bat} en fonction de la variation de température journalière à l'intérieur des maisons.

Les mesures réalisées sur des maisons en bois massif montrent donc un niveau de confort beaucoup plus important que celui présenté par la réglementation thermique pendant la période d'été. On trouve que l'effet « inertiel » obtenue par des madriers de fortes épaisseurs ou des fustes, favorise le maintien des températures intérieures et donc le confort d'été dans ces maisons.

5. Conclusions

L'étude à grande échelle présentée ici consistait à évaluer les performances énergétiques réelles de Constructions Bois Massif, et à les comparer à la fois, aux calculs réglementaires RT2000 et aux valeurs calculés avec les méthodes usuelles. Par ailleurs, nous avons mis en relation les critères de confort dans les maisons et leurs consommations pour le chauffage.

Pour cela, la campagne de mesures AFCOBOIS a permis de suivre les consommations d'énergie ainsi que les températures intérieures et extérieures de 20 maisons en bois massif, les résultats de mesures sont comparés avec des calculs effectués en utilisant un logiciel de calcul thermique RT2000 et la méthode DEL2.

Concernant le respect de la RT2000, on peut relever les points suivants sur notre échantillon de 20 MBM :

- 4 maisons seulement respectent le garde-fou RT2000 de résistance thermique minimale,
- 5 maisons respectent le coefficient de consommation globale C ,
- 7 maisons respectent le critère de U_{BAT} inférieur à $U_{BAT}^{réf} +30\%$ et une seule a un coefficient U_{BAT} inférieur au coefficient de référence,
- 9 maisons ont des températures intérieures calculées T_{ic} pendant la période d'été inférieures aux températures de référence.

Concernant les consommations pour le chauffage et la comparaison entre les mesures et les calculs, les résultats montrent que 15 maisons ont des consommations de chauffage mesurées inférieures aux consommations de chauffage calculées. De plus, 17 maisons sur 20 présentent des besoins d'énergie mesurés inférieurs aux besoins calculés.

On trouve que l'influence de l'épaisseur de la paroi sur la consommation réelle est relativement faible et la relation est difficile à établir pour des madriers de 110 à 156 mm d'épaisseur. Par contre, le choix de système de chauffage et sa gestion ont une influence beaucoup plus importante sur la consommation.

L'étude montre malgré l'absence de systèmes de ventilation mécanique, des niveaux de confort hygrothermique très satisfaisants pendant la période d'hiver comme pendant la période chaude pour la plupart des MBM. Le critère de confort d'été calculé par la réglementation thermique est très loin des valeurs mesurées sur site ; les mesures d'amplitude journalière de température intérieure montrent des valeurs maximums de 6°C pour 16 des 20 maisons étudiées, et ce, même pour les maisons construites en madriers de 100 mm d'épaisseur.

Sur la base des mesures réalisées, mesures forcément limitées en temps et en nombre de maisons, on peut conclure que la méthode de calcul et les critères de la RT2000 prennent assez mal en compte les qualités réelles des constructions Bois Massif.

Le garde-fou RT2000 basé sur le coefficient U du mûr extérieur et la seule valeur de résistance thermique brute, rend non réglementaire la majorité des constructions en bois et cause un préjudice important pour ce type de construction. On montre pourtant, dans ce 1^{er} chapitre, sur la base de performances globales et à la suite, par une caractérisation fine des transferts (thermique, hydrique et aéraulique) en régime dynamique, que les qualités et caractéristiques propres à ces parois rendent ces constructions thermiquement performantes et confortables.

A partir des résultats de cette étude, une caractérisation spécifique d'abord, à l'échelle de la paroi, puis globalement à l'échelle de bâtiments doit être réalisée et intégrée à la future RT2010 avec une meilleure prise en compte des performances réelles des MBM. Les chapitres suivants répondent pour partie à ce besoin d'étude, mais le cadre scientifique, les engagements et les moyens mis en œuvre n'ont pas ici pour finalité, la réécriture de calculs thermiques réglementaires.

Confort hygro-thermique et ventilation des constructions Bois

Analyse et étude sur 2 bâtiments tests

1. Introduction	55
1. 1. Confort et règles de ventilation dans l'habitat	55
1. 2. Contexte et objectifs du projet Confort Bois	56
1. 3. Expérimentations sur 2 MBM à usage d'habitation et de bureaux	58
2. Méthodes et démarches expérimentales	59
2. 1. Le confort thermique dans des bâtiments à ventilation naturelle	59
2. 2. Analyse et prise en compte des variations d'humidité	61
2. 3. Suivi de la qualité d'air intérieur (QAI).....	64
2. 4. Etudes et techniques de mesure de la perméabilité des bâtiments	65
2. 4. 1. Mesures par la méthode de gaz traceur	67
2. 4. 2. Mesure de perméabilité par la méthode de dépression «Blowerdoor »	68
2. 4. 3. Influence du vent extérieur (vitesse et direction) sur le renouvellement d'air....	68
3. Résultats des mesures sur les 2 bâtiments tests et analyses	69
3. 1. Mesures et analyse du confort thermique	69
3. 2. Analyse des conditions et des variations d'humidité dans 2 bâtiments BM en ventilation naturelle	73
3. 2. 1. Niveaux d'humidité mesurés à l'intérieur des bâtiments	73
3. 2. 2. Évaluation des charges hydriques à l'intérieur des bâtiments	76
3. 2. 3. Analyse croisée entre niveaux de températures et d'humidité relative confort hygro-thermique.....	79
3. 3. Mesure du taux de CO ₂ dans les 2 bâtiments tests (QAI)	81
3. 3. 1. Evolution du CO ₂ dans le bâtiment B.HA « salle de séjour »	81
3. 3. 2. Evolution du CO ₂ dans le bâtiment B.BU « salle de réunion »	82
3. 3. 3. Evolution du CO ₂ dans le bâtiment B.BU « bureau comptabilité »	83
3. 4. Perméabilité des constructions en bois massif	85
3. 4. 1. Le taux de renouvellement d'air (N) dans le bâtiment «B.HA» « salle de séjour »	85
3. 4. 2. Le taux de renouvellement d'air (N) dans le bâtiment «B.BU» « bureau de comptabilité »	87
3. 4. 3. Etude de perméabilité à l'air par la méthode de dépression «Blowerdoor ou porte soufflante »	88
3. 4. 4. Influence du vent (vitesse et direction) sur le renouvellement d'air dans le bâtiment	88
4. Conclusion	91

1. Introduction

1. 1. Confort et règles de ventilation dans l'habitat

Le confort hygrothermique est un critère très important pour la santé et l'activité des personnes, et pour la longévité du bâtiment. Le confort hygrothermique peut être atteint seulement lorsque la combinaison des paramètres tels que la température, l'humidité et le mouvement d'air se situe à l'intérieur des limites de ce qu'on appelle la « zone de confort ».

Les conditions hygrothermiques pour le confort des occupants d'un local sont définies par (ASHRAE, 1992 ; 2001 ; Brager *et al.* 1994 ; Schiller, 1990). Les études de confort identifient souvent la température comme l'aspect le plus significatif (par exemple Brill *et al.* 1984 ; Louis Harris et associés, 1980). On doit cependant veiller en continu au meilleur compromis entre niveau thermique et dépense énergétique.

Les dommages dus à l'humidité sont une des causes principales de la détérioration de l'enveloppe des bâtiments d'où l'importance de l'analyse des flux de vapeur et des conditions d'humidité dans la conception d'un bâtiment. L'humidité sous forme liquide ou vapeur peut endommager la structure, réduire la résistance thermique des matériaux de construction, changer les propriétés physiques et même déformer des matériaux. L'analyse est donc nécessaire, d'une part, pour bien conserver l'enveloppe du bâtiment, et d'autre part, pour maintenir une bonne qualité d'air intérieur des bâtiments et donc satisfaire les exigences de confort et de santé.

Ces qualités imposent, d'une part, une isolation thermique suffisante par rapport à l'extérieur, d'autre part, un amortissement des variations de température, en particulier des variations journalières. Une inertie élevée des matériaux de construction est un excellent amortisseur thermique et sert de « tampon » par effet de stockage thermique.

La qualité d'air intérieur (QAI)¹ des bâtiments dépend des concentrations des composants gazeux, liquides ou solides en suspension. Certains de ces composants gazeux sont normalement présents dans l'air (oxygène (O₂), dioxyde de carbone (CO₂), ozone (O₃), vapeur d'eau (H₂O)) mais, pour préserver la qualité d'air ambiant, ils ne doivent pas dépasser certains taux de concentration (Lee *et al.* 1999).

La réglementation française sur la ventilation est assez complexe car les textes ont des origines multiples et couvrent des champs d'application différents : on différencie l'habitat avec des débits imposés par pièces (en fonction du nombre total de pièces principales du logement) et le secteur « non résidentiel » avec des débits horaires d'air neuf par occupant fonctions de l'activité.

En 1958, le principe est posé d'un ouvrant par pièce principale, la ventilation est essentiellement naturelle. Le principe de la ventilation permanente des logements apparaît pour la première fois en 1969, les valeurs de débits sont précisées en 1982.

Les différentes réglementations thermiques ne modifient pas les exigences sur la ventilation mais les intègrent dans les calculs de déperditions. Il s'agit d'assurer une qualité d'air minimale dans les

¹ QAI : « IAQ » indoor Air Quality

locaux en évacuant les polluants et la vapeur d'eau émis par les occupants, les produits de construction, les équipements et le mobilier. C'est également une question de sécurité notamment dans le cas de générateurs d'eau chaude (pour chauffage et ECS) qui émettent des quantités importantes de CO₂.

1. 2. Contexte et objectifs du projet « Confort Bois »

Ce travail s'appuie sur un projet technologique² mené depuis 2004, avec un partenaire industriel (la société Confort Bois Construction) ayant pour objectif « l'évaluation des performances thermiques de maisons à parois en bois massif tenant compte du comportement de ce matériau à des fins de valorisation des qualités environnementales de ces constructions ».

L'étude a consisté en premier lieu, à détailler les différentes caractéristiques de transferts thermique et hydrique de la paroi bois massif ainsi que l'influence du comportement dynamique et du transfert aéraulique sur la performance thermique de l'ensemble. En second lieu, à déterminer le confort et l'usage de ce type de construction et ce, par rapport à une maison traditionnelle.

Comme vu dans le premier chapitre, les maisons en bois massif ne possèdent généralement aucun système de ventilation mécanique, mais on constate que les occupants de ces maisons sont toujours satisfaits du confort de leurs maisons. Selon les questionnaires posés aux propriétaires, la ventilation naturelle assure ici une qualité d'air toujours jugée « acceptable » pour la santé des occupants. Concernant la durabilité des bâtiments, les constructeurs du réseau ne rencontrent jamais aucun problème de dégradation ou de durabilité des parois de construction.

Le partenaire industriel du projet (Confort Bois) souhaitant améliorer les connaissances actuelles sur le fonctionnement et les performances réelles des bâtiments en bois massif, il a été demandé au laboratoire de mener une étude expérimentale détaillée sur deux maisons en bois massif à usage différents. L'objectif poursuivi à terme étant d'améliorer les connaissances pour optimiser la conception et l'usage de ces constructions.

A travers cette étude, 2 questions précises étaient posées par Confort Bois sur le confort hygrothermique et la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments :

- Quelle est l'influence des occupants et des usages sur le confort hygrothermique et la qualité d'air dans le bâtiment ?
- Les parois « bois empilés » et leur qualité « respirante » assurent-elles une qualité d'air intérieur permettant, d'une part, de satisfaire les exigences de santé et de confort des occupants, et d'autre part de conserver le bâtiment ?

Pour répondre à ces questions, nous avons réalisé une campagne des mesures « longue durée » ainsi que des mesures spécifiques sur les 2 bâtiments ; une fois les mesures terminées, les résultats sont analysés afin de comparer d'abord, les 2 bâtiments entre eux, puis ensuite, avec des valeurs de référence proposées entre autre, par les normes françaises et internationales (Figure 2.1).

² Projet du Pôle Environnement Aquitain financé par le Conseil Régional d'Aquitaine au profit de la société Confort Bois Construction (Jugazan – Gironde)

Enfin, nous avons réalisé une mesure de perméabilité globale de la maison d'habitation à l'aide de la méthode de dépression «Blowerdoor »³; cette méthode nous permet de comparer les résultats expérimentaux de la perméabilité de bâtiment en bois massif avec les valeurs de référence indiquées par la réglementation thermique (RT2000).

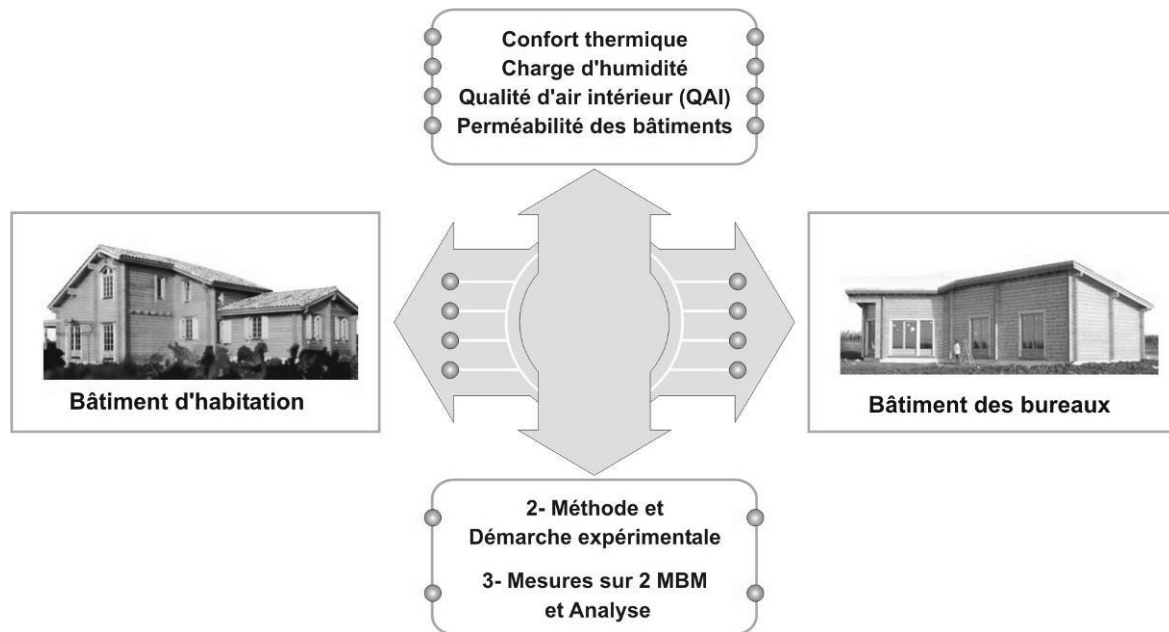


Figure 2.1 : Schéma général de l'étude présentée au chapitre 2

³ Appelée également «Porte soufflante»

1. 3. Expérimentations sur 2 MBM à usage d'habitation et de bureaux

Les deux constructions se situent à Jugazan (50 km de Bordeaux) ; elles ont été réalisées par la société Confort Bois en 2000 et sont de styles différents au point de vue architectural, mais d'un principe de construction identique. Le bois utilisé pour la construction est le pin nordique (*Pinus Sylvestris*) importé de Finlande, les murs intérieurs et extérieurs sont formés de madriers bois massif contrecollés verticalement (VLL), (Figure 2.2).

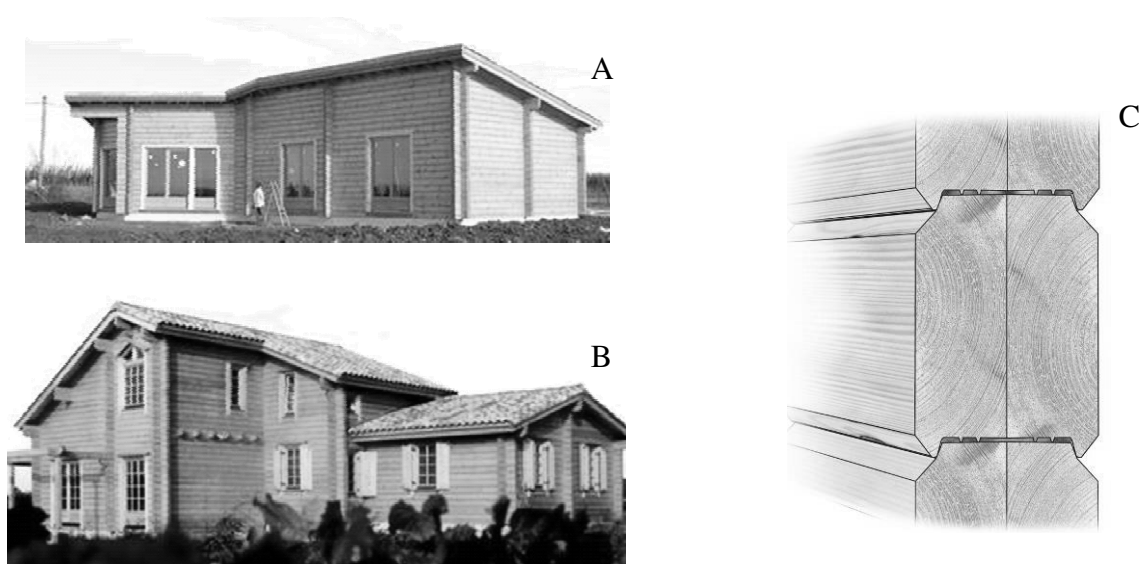


Figure 2.2 : A) Bâtiment « Bureaux » noté B.BU
 B) Bâtiment « Habitation » noté B.HA
 C) Profil de madrier contre collé verticalement VLL utilisé par la société Confort Bois, avec joint de polypropylène entre madriers

La première construction (photo B) est un bâtiment d'habitation (noté B.HA par la suite) pour une famille de 4 personnes, avec une surface totale de 147 m² et un volume de 303 m³ (RDC+1). Les murs sont en bois massif contrecollé verticalement d'épaisseur de 113 mm. L'autre construction (photo A) sert à la fois, de bureaux de travail B.BU de sept personnes et de pavillon témoin pour la société Confort Bois, la surface totale de ce bâtiment est de 110 m² et son volume de 350 m³ (RDC). Les murs sont en bois massif contrecollé verticalement d'épaisseur de 134 mm.

Aucun système de ventilation mécanique n'est installé dans ces 2 bâtiments à l'exception d'un simple extracteur en cuisine dans le bâtiment B.HA (mentionné en annexe 5).

2. Méthodes et démarches expérimentales

L'ensemble des expérimentations liées aux 4 points étudiés dans ce chapitre est présenté de façon détaillée en annexe 5. On rappelle ci-dessous les schémas d'implantation des capteurs (température, humidité, CO₂, perméabilité) sur les 2 MBM (figure 2.3 ci-dessous).

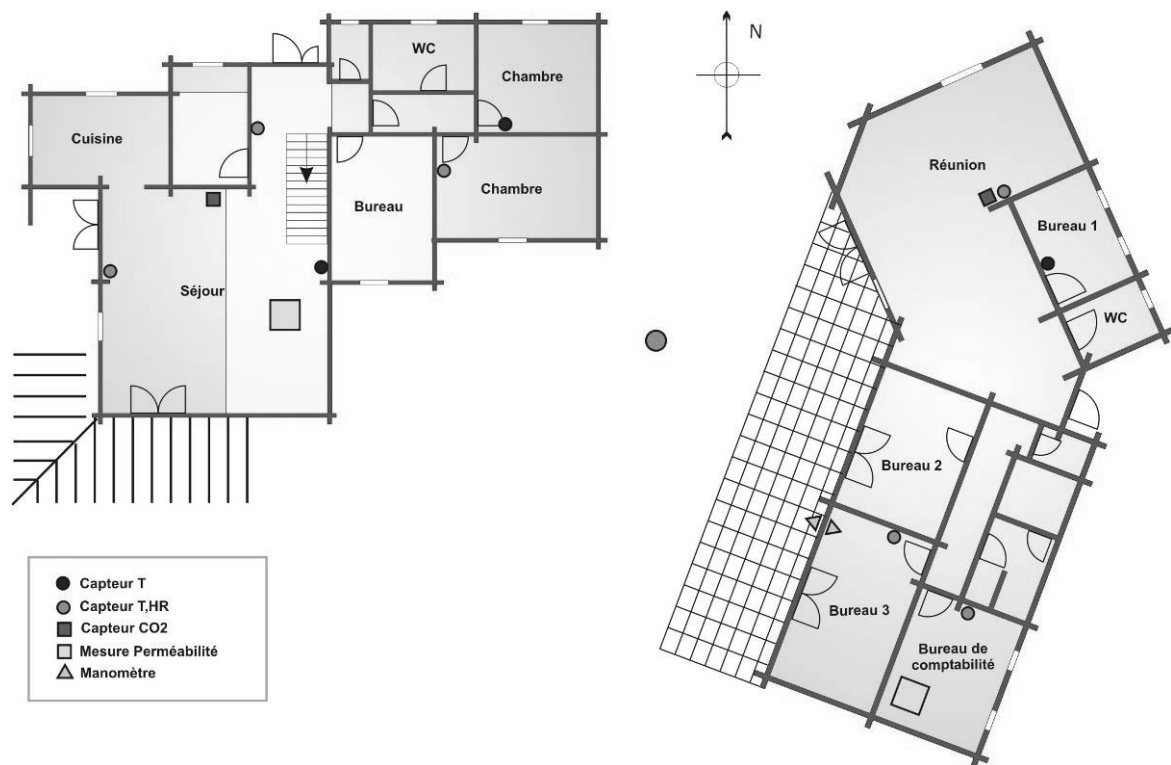


Figure 2.3 : Emplacement des capteurs dans les 2 bâtiments

2. 1. Le confort thermique dans des bâtiments à ventilation naturelle

Brager 1994 a défini une norme de confort (*Adaptive standard for naturally ventilated buildings*) pour évaluer le confort thermique dans les bâtiments ; cette norme établit une température intérieure contrôlée pour la zone de confort variant de 17 °C à 22 °C quand la température d'air extérieur (T_{ext}) est inférieure à 5 °C, et de 26 °C à 31 °C quand la température d'air extérieur (T_{ext}) atteint 34 °C, (Brager et Gear, 2000). La température intérieure utilisée fait référence à la température résultante sèche du local (obtenue à partir de la température d'air, température moyenne des parois et vitesse de l'air).

La limite supérieure de la zone de confort de Brager peut être définie comme :

$$T_{supérieur} = \left\{ \begin{array}{l} 22^{\circ}\text{C pour } (T_{ext} \leq 5^{\circ}\text{C}) \\ (9/28)T_{ext} + 20,4^{\circ}\text{C pour } (5^{\circ}\text{C} < T_{ext} < 33^{\circ}\text{C}) \\ 31^{\circ}\text{C pour } (T_{ext} \geq 33^{\circ}\text{C}) \end{array} \right\}$$

Différentes méthodes d'évaluation du confort hygrothermique ont été testées. On s'est intéressé en particulier au modèle présenté par FANGER traduit par la norme OIN 7730 (ISO, 1994). Cette démarche s'appuie sur un bilan thermique détaillé mais fait appel à des informations difficiles à obtenir telles que les caractéristiques, activités et vêtue des occupants. Par ailleurs, elle ne prend pas en compte les conditions extérieures et donc l'adaptation des occupants au niveau thermique intérieur. Ce qui justifie le choix fait dans la suite de l'étude, d'utiliser la démarche de Brager.

Axley (2001) propose d'évaluer la surchauffe en utilisant la variation de la méthode de Zurich en accumulant les degrés heures de la température (c.-à-d., en relation à la norme de confort « adaptatif » de Brager) pour évaluer le surchauffe degré heures (ODH)⁴ qui est observée ou prévue pour une utilisation donnée d'un bâtiment (Figure 2.4).

Avec les limites de Brager, l'ODH peut alors être défini comme la somme intégrée des excédents de température pendant la période d'été, soit :

$$ODH = \sum_{\text{Période Chaude}} \max\{(T_{\text{int}} - T_{\text{Supérieur}}), 0\} \Delta t \quad (2.1)$$

où Δt est l'intervalle de temps de mesure (h) pour la température intérieure mesuré T_{int} .

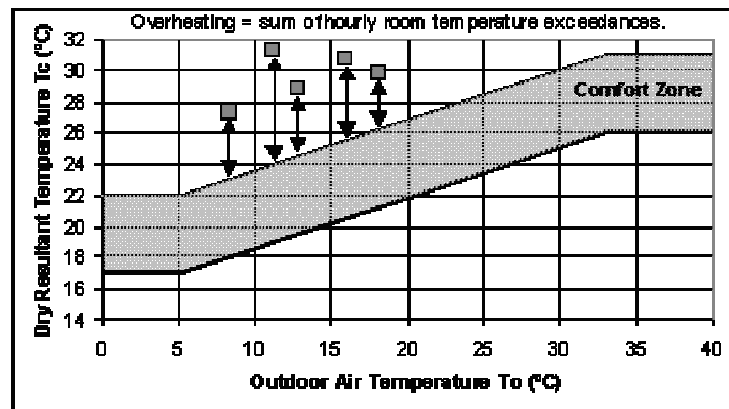


Figure 2.4 : Zone de confort thermique basé sur la norme proposée de Brager utilisant la température résultante sèche

Comme cité précédemment, le premier objectif de cette partie est de comparer le confort hygrothermique dans 2 constructions en bois massif dont l'utilisation et le besoin de confort sont différents, sur une période de deux ans et ce, sur plusieurs zones des 2 constructions.

Nous avons installé sur site :

- 5 capteurs autonomes de température (T) et humidité relative (HR) dans le bâtiment B.HA de type HOBO H08 (Figure 2.3),
- 4 capteurs de même type dans le bâtiment « BU »,
- Une station météo de type WS 2500-25 à l'extérieur.

⁴ Overheating Degree Hours

Les capteurs intérieurs ont été testés en laboratoire avant l'installation, et les résultats des mesures de la station météo comparés avec les données METEOFRANCE de la station de Bordeaux-Mérignac.

Les capteurs ont été installés en mars 2004 et pour une période de 2 ans avec un intervalle de mesure de 15 minutes. Les données des capteurs sont vidées régulièrement à l'aide du programme Box Car Pro[®] vers des fichiers Excel[®]. Pour chaque point de mesure, les moyennes de température (T°C) et d'humidité relative (HR%) ont été calculées d'abord, à l'intervalle horaire et ensuite, en moyennes saisonnières. On en déduit les fréquences de température et d'humidité relative pour 2 périodes suivantes :

- 1) la période notée Hiver représentant la période de chauffage et prise du 1er octobre jusqu'au 31 mars,
- 2) la période notée Eté du 22 Juin jusqu'au 21 septembre.

Il est à noter que pendant la période d'hiver, les températures de chauffage dans les 2 bâtiments sont maintenues à des niveaux différents suivant la zone et la période comme indiqué ci-dessous.

Tableau 2.1 : Réglage des températures d'hiver dans les 2 bâtiments

Bâtiment B.HA	6h00 – 22h00	22h00 – 6h00
Coin Jour	21 °C	19 °C
Coin Nuit	19 °C	21 °C
Bâtiment B.BU	7h00 – 18h00	18h00- 7h00
Bureaux	21 °C	16 °C

2. 2. Analyse et prise en compte des variations d'humidité

Les conditions d'humidité dans les parois de bâtiments dépendent fortement des conditions climatiques à l'intérieur et à l'extérieur. Il n'existe pas de méthodologie normalisée pour la conception prenant en compte le comportement vis-à-vis des charges hydriques et leurs variations (Kalamees et Vinha, 2006).

Dans leurs travaux, (Lee *et al.* 1999), (Cheong, 2003), (Atthajariyakul et Leephakpreeda, 2004) ont réalisé des études sur le confort hygrothermique dans les bâtiments d'habitation et les lieux de travail sans prise en compte des transferts d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur.

(Kent *et al.* ,1966), (Hens 1992), (Jenssen *et al.* 2002), (Gustavsson *et al.* 2004), (Rose et Francisco, 2004), (Kalamees et Vinha, 2006) ont relié au climat extérieur, la charge d'humidité d'air intérieur due à l'utilisation du bâtiment.

Hens (1992) définit la charge d'humidité comme la différence de contenu de vapeur d'eau entre l'air intérieur et l'air extérieur ; on calcule l'écart par l'équation :

$$\Delta v = v_i - v_e$$

Où Δv est la charge d'humidité (g/m³), v_i, v_e sont respectivement, les contenus de vapeur d'eau par m³ d'air à l'intérieur et à l'extérieur de bâtiment (humidité absolue) (g/m³).

Hens a rapporté des données sur des longues périodes d'observation (3 semaines à 6 mois), effectuées entre 1974 et 1992, en hiver et en été, dans les salles de séjour, cuisines, chambres à

coucher, et salles de bains pour cinquante unités réceptrices sociales en Belgique. Il trouve que, pendant l'hiver, la charge moyenne quotidienne d'humidité dans des salles de séjour et des cuisines est supérieure à celle des chambres à coucher ($\approx +5 \text{ g/m}^3$ contre $\approx +2\text{g/m}^3$). Jenssen *et al.* (2002) ont effectué des mesures sur 32 logements différents en Norvège, les valeurs de charge d'humidité dans les chambres à coucher et les salles de séjour sont en moyenne de $+1.3 \pm 0.8\text{g/m}^3$ et $+1.9 \pm 0.8 \text{ g/m}^3$, respectivement. Gustavsson *et al.* (2004) ont mesuré la température (T) et l'humidité relative (HR) dans les salles de séjour et les chambres à coucher des enfants en 390 logements en Suède, la valeur moyenne de la charge d'humidité était $+2.3 \text{ g/m}^3$ (de 0 à $+6 \text{ g/m}^3$). Rose et Francisco (2004) ont montré que dans les salles de séjour, la charge d'humidité était environ 15% inférieure que dans les chambres à coucher.

Dans la plupart des études des charges hygrothermiques à l'intérieur des bâtiments, les données climatiques d'intérieur ne sont mesurées que durant une période courte, alors que des données climatiques extérieures sont extraites d'une station météorologique.

Kalamees et Vinha (2006) ont étudié 101 maisons à ossature bois en Finlande, avec 3 types de ventilation : Naturelle, VMC et mixte ; 70 maisons ont des parois « imperméables » et 31 maison ont des parois « perméables ». Ils ont réalisé des mesures dans les chambres, les salles de séjours et à l'extérieurs des bâtiments dont on peut extraire quelques données utiles pour la suite de l'étude.

Tableau 2.2 : Charge moyenne d'humidité pendant la période froide et la période d'été dans les chambres et les salles de séjour (Kalamees et Vinha (2006)).

Emplacement	$T_{ext} \leq 5^\circ\text{C}$	$T_{ext} > 5^\circ\text{C}$
Chambre	$+1,9 \pm 1,71 \text{ g/m}^3$	$+0,5 \pm 0,4 \text{ g/m}^3$
Salle de séjour	$+1,7 \pm 1,53 \text{ g/m}^3$	$+0,4 \pm 0,28 \text{ g/m}^3$

Ils représentent sur la figure (2.5-b) la comparaison entre les trois types de ventilation.

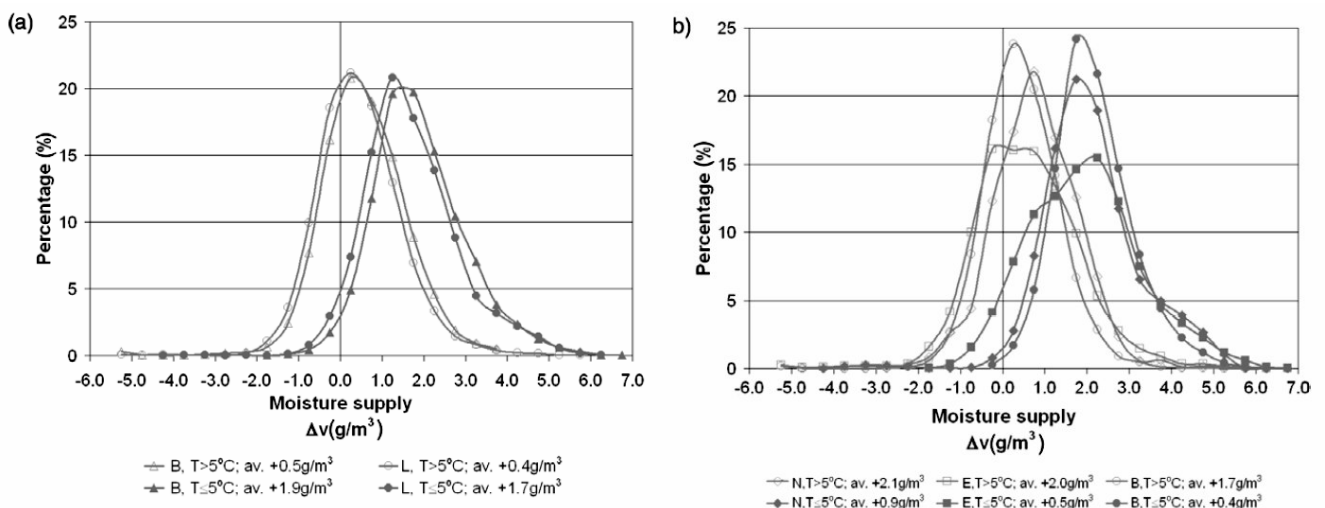


Figure 2.5 Comparaison de la charge d'humidité sur la période froide ($T_{ext} \leq 5^\circ\text{C}$) et le reste du temps.

(a) Chambre « B » et salle de séjour « L ».

(b) ventilation naturelle « N », VMC « E » et ventilation mixte « B » (Kalamees et Vinha, 2006).

Kalamees et Vinha (2006) montrent dans la même étude, que la charge d'humidité moyenne est liée directement au renouvellement d'air dans les maisons ; en particulier, la charge d'humidité diminue lorsque le taux de renouvellement d'air est plus élevé (Figure 2.6).

Sur la base de la dépendance de la charge d'humidité à l'égard de la température extérieure, des distributions de fréquence de la charge d'humidité pendant la période froide ($T_{\text{ext}} \leq 5^\circ\text{C}$) ont été analysées séparément d'autres données ($T_{\text{ext}} > 5^\circ\text{C}$).

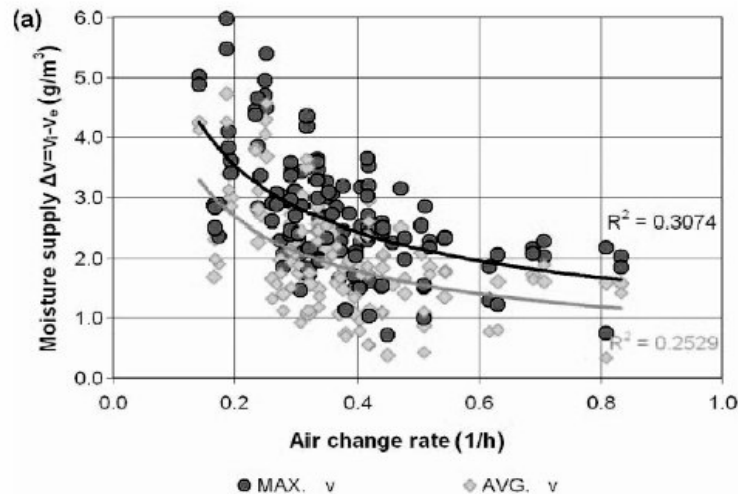


Figure 2.6 : Effet du renouvellement d'air par rapport à la charge d'humidité moyenne (Kalamees et Vinha, 2006).

Pour chaque pièce, des valeurs de la charge d'humidité ont été ramenées à une moyenne horaire pour la période froide ($T_{\text{ext}} \leq 5^\circ\text{C}$) et pour les autres périodes ($T_{\text{ext}} > 5^\circ\text{C}$).

Dans notre cas, la comparaison des valeurs moyennes de la charge d'humidité a été faite entre le coin jour et le coin nuit dans le bâtiment B.HA et entre 3 bureaux dans le bâtiment B.BU.

En France, les dispositions réglementaires relatives à l'aération des logements sont données par l'arrêté du 24 mars 1982 (J.O. du 27 mars 1982) et l'arrêté du 12 mars 1976 (J.O. du 19 mars 1976).

On définit quatre types de locaux en fonction de leur hygrométrie en régime moyen pendant la saison froide :

Hygrométrie	faible	moyenne	forte	très forte
Charge d'humidité	2,5 g/m ³	2,5 – 5 g/m ³	5 – 7,5 g/m ³	> 7,5

Les locaux à faible hygrométrie comprennent les immeubles de bureaux non conditionnés, et les logements équipés de ventilations mécaniques contrôlées et de systèmes propres à évacuer les pointes de production de vapeur d'eau dès qu'elles se produisent (hottes, ...). Les locaux à hygrométrie moyenne comprennent les bâtiments d'habitation, y compris les cuisines et salles d'eau, correctement chauffés et ventilés sans sur-occupation ; piscine avec ventilation appropriée. Les locaux à hygrométrie forte et très forte concernent les bâtiments d'habitation médiocrement ventilés et les locaux spéciaux respectivement.

2. 3. Suivi de la qualité d'air intérieur (QAI)

La qualité d'air à l'intérieur de bâtiments est liée à la concentration de plusieurs polluants de l'air y compris la concentration en CO₂ mais aussi Carbone monoxyde (CO), des particules suspendues (PM₁₀), formaldéhyde (HCHO), bactéries (TBC⁵),...etc. (Lee *et al.* 2002). La concentration en CO₂ est considérée comme un indicateur représentatif de la qualité de l'air et en particulier, du taux de ventilation, (Cheong *et al.* 2002), (Wong *et al.* 2004), (Mandallena, 2006). La première source de CO₂ dans les bâtiments est la respiration des occupants. Si le taux de CO₂ dans les bâtiments publics ou dans les logements varie entre 500 et 2500 ppm⁶, la concentration optimale doit rester inférieure à 1000 ppm dans l'habitat (Erdmann *et al.* 2001). La norme 62-89 (ASHRAE)⁷ définit un niveau acceptable de concentration en CO₂ à 1000 ppm à l'intérieur de bâtiment (ASHRAE, 2002). La valeur limite de CO₂ définie par de nombreux pays est fixée à 1000 ppm. On admet en France une concentration de 1300 ppm dans des locaux où il est interdit de fumer (règlement sanitaire départemental).

Signalons qu'une concentration en CO₂ de 2000 ppm maintenue durant plus d'une heure entraîne chez certaines personnes des maux de tête, une fatigue générale et un endormissement.

Rappelons quelques ordres de grandeur relatifs à l'air intérieur et aux occupants ainsi que sur la figure ci-dessous, les principaux polluants présents dans l'air d'un local :

- quantité d'air inspirée par un homme adulte sans activité physique : ~0,5 m³/h (Maximum 9 m³/h, avec activité physique),
- consommation en oxygène : 15 à 50 l/h suivant l'activité (l'air extérieur contient environ 21% d'oxygène en volume, et 0,03% de CO₂),
- rejet de CO₂ pour un individu au repos : 10 à 20 l/h.
- vapeur d'eau produite en moyenne par un individu : 50 g / h, production de vapeur d'eau globale, liée aux activités ménagères et humaines peut être estimée à 2,5 l/j/pers (en moyenne dans le logement).

⁵ TBC : total bacteria count

⁶ ppm : partie par millions

⁷ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

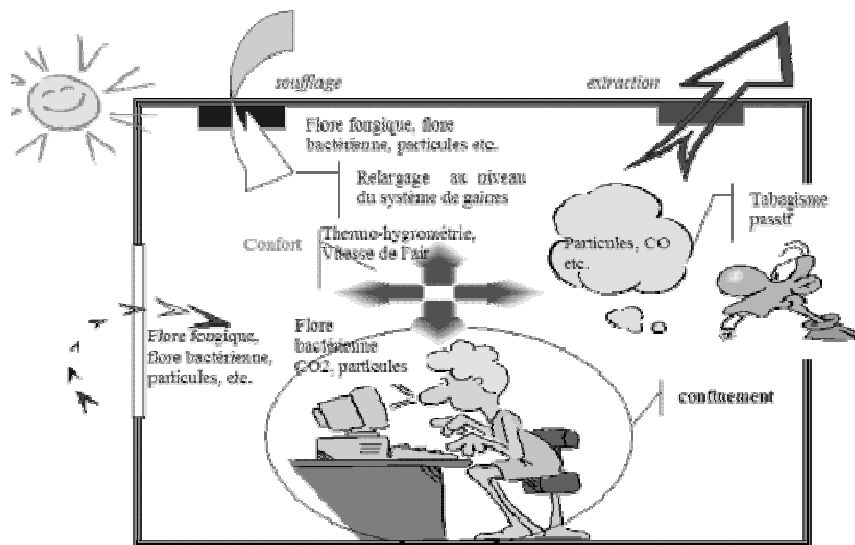


Figure 2.7 : Représentation des pollutions présentes dans l'air intérieur www.vitair.fr

Dans cette étude, nous avons choisi le taux de CO_2 comme indicateur de qualité de l'air dans les 2 bâtiments tests, afin de déterminer l'influence des occupants et l'efficacité de la ventilation naturelle. Nous avons utilisé des capteurs de CO_2 de type TELAIRE® 7001 : chaque capteur est lié au data logger HOBO 2007 qui permet de stocker les données jusqu'à 35000 points. Les mesures CO_2 sont faites à l'intervalle de 5 minutes pour une période de cinq semaines, répétées plusieurs fois aux mois d'avril, mai, juin et septembre et dans plusieurs zones des 2 bâtiments tests (cf. figure 2.3).

2. 4. Etudes et techniques de mesure de la perméabilité des bâtiments

Dans les calculs thermiques réglementaires faits à l'échelle d'un bâtiment, on prend en compte dans les déperditions par renouvellement d'air, un débit d'infiltration résultant des défauts d'étanchéité et de la perméabilité des parois. Dans le calcul des besoins thermiques, on néglige généralement les échanges de chaleur qui peuvent intervenir lorsque l'air s'infiltré à travers son enveloppe. Des études récentes (Barhoun, 2006, Bhattacharyya, 1995, Buchanan, 2000) ont montré que ces fuites d'air jouent un rôle significatif, non seulement sur les performances thermiques des parois et sur la consommation énergétique, mais aussi en terme de confort des occupants. Les mesures de la perméabilité à l'air dans les maisons en bois massif ont donné des taux de renouvellement d'air entre 0,33 et 0,66 volume par heure (Nahb, 1991).

Rappelons que ce taux de renouvellement d'air est défini par le rapport entre le volume horaire d'air extérieur introduit dans une enceinte et le volume réel de cette enceinte, soit le nombre de fois en une heure où l'air ambiant est remplacé par l'air extérieur. Le taux de renouvellement d'air est utilisé pour quantifier la ventilation en particulier dans le résidentiel.

Afin d'apprécier leur étanchéité à l'air et de comparer les constructions entre elles, il existe de nombreux indicateurs pour la perméabilité d'une enveloppe dont on trouvera une liste exhaustive dans l'état de l'art réalisé par le CETE de Lyon (Litvak, 2000) et dans la norme NF EN 13829 (2001)

Partant du constat que les maisons en madriers empilés ont un caractère « respirant » et par conséquent, que leurs besoins en air neuf sont réduits, elles n'ont en général, pas de système de ventilation mécanique et utilisent seulement une circulation d'air naturelle (voir les données sur les 20 MBM de l'étude AFCOBOIS). Des mesures de taux de renouvellement d'air sont donc nécessaires pour répondre à la question suivante : « L'air neuf extérieur introduit par ventilation naturelle dans les maisons BM est-il suffisant pour maintenir une bonne qualité d'air intérieur pour les occupants ? ».

Plusieurs techniques ont été développées pour mesurer les flux d'air dans le bâtiment.

La **méthode « Blowerdoor » de mise en dépression** (Grimsrud *et al.* 1993) implique d'installer un grand ventilateur dans une ouverture (habituellement une porte). Une pression entre 20 et 70 Pa est créée entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Bien que la pressurisation due au ventilateur ne donne pas une mesure de ventilation en situation « réelle », c'est un essai utile qui nous permet de :

- comparer le débit de fuite de 2 bâtiments différents,
- identifier les origines des fuites,
- déterminer la réduction du débit d'infiltration résultant d'interventions sur les défauts identifiés.

La **méthode du gaz traceur** est employée pour déterminer les mouvements d'air à travers une frontière en conditions normales de fonctionnement. Cette frontière peut être l'enveloppe de bâtiment, une zone dans le bâtiment, ou une salle. Le document (ASTM E741, 2000) décrit des méthodes d'essai de gaz traceur basées sur l'affaiblissement, l'injection constante, et les mesures de concentration.

Grimsrud *et al.* (1980) comparent les résultats des essais d'affaiblissement de gaz traceur en utilisant trois traceurs différents : l'hexafluorure de soufre (SF_6), le méthane (CH_4), et le protoxyde d'azote (NO). Ils ont constaté que la vitesse d'infiltration déterminée en utilisant les résultats SF_6 était légèrement plus haute que les taux déterminés en utilisant l'un ou l'autre des autres gaz, mais la différence était dans les limites de l'erreur prévue des résultats de gaz traceur (5 à 10%).

Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode du gaz traceur pour mesurer le renouvellement d'air dans différentes pièces ou zones des 2 bâtiments.

En parallèle, nous avons réalisé une mesure type «Blowerdoor ou porte soufflante» conformément à la norme EN 13829 pour comparer les résultats de perméabilité globale des bâtiments avec les valeurs de références données par la RT2000.

Enfin, nous analysons les relations existant entre l'exposition au vent (vitesse, direction) du bâtiment et le renouvellement d'air.

2. 4. 1. Mesures par la méthode de gaz traceur

Les mesures sont effectuées dans les 2 bâtiments tests avec un multi gaz moniteur INNOVA® 1314 et un système de doseur / admission de gaz INNOVA® 1303 (Annexe 6). Un manomètre différentiel est installé des 2 côtés de la paroi (intérieur et extérieur) pour mesurer la différence de pression ; en parallèle, la station météo WS 2500 installée sur site mesure la direction et la vitesse de vent pendant les périodes d'essai.

En premier temps, le test a été effectué dans un grand volume de ma maison d'habitation (séjour, cuisine, entrée, mezzanine). Les appareils de mesure sont placés sur la mezzanine, les ventilateurs sont équitablement répartis dans le volume, l'injection de gaz traceur se fait en 2 endroits distants et 2 voies d'échantillonnage sont utilisées pour diminuer l'erreur de mesure liée à l'hétérogénéité de concentration de gaz traceur dans l'air. L'emplacement des points d'injection et des points d'échantillonnages sont représentés sur la figure 2.8.

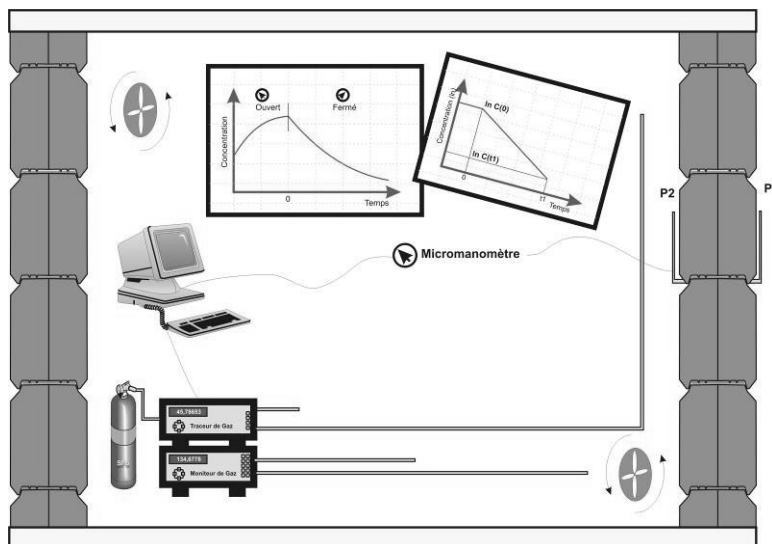


Figure 2.8 : Mesures de perméabilité par la méthode de gaz traceur

La 2.9 montre les évolutions de concentration de gaz traceur aux 2 points d'échantillonnages ; on trouve des évolutions identiques, la concentration est donc homogène dans l'espace étudié.

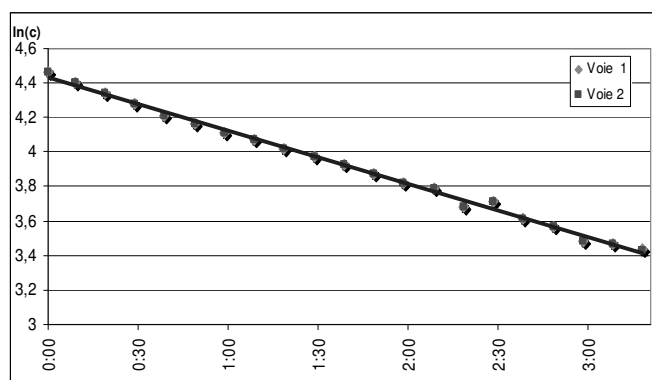


Figure 2.9 : Concentrations de gaz traceur relevées en 2 points de mesure

Les mesures sont répétées dans le bureau de comptabilité situé dans le bâtiment B.BU. Le volume de bureau et la surface de mur sont bien inférieurs à celui de la salle de séjour.

2. 4. 2. Mesure de perméabilité par la méthode de dépression «Blowerdoor »

L'essai de perméabilité par la méthode de dépression a été réalisé selon la norme EN 13829 avec l'aide de « A. LITVAK » du CETE Sud – Ouest.

Nous avons utilisé un indicateur fréquemment utilisé pour l'étude de la perméabilité de bâtiment, l'indicateur I_4 qui ramène le débit de fuite à une dimension caractéristique, ce qui permet de comparer le bâtiment testé.

$$I_4 = q_v (\Delta P = 4 Pa) / S \quad (2.2)$$

I_4 , exprimé en $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (à 4 Pa) donne le débit de fuite en m^3/h à 4 Pa par m^2 de parois déprédatives (au sens de la RT 2000, hors planchers bas). Le débit de fuite peut être aussi divisé par le volume chauffé V (m^3).

2. 4. 3. Influence du vent extérieur (vitesse et direction) sur le renouvellement d'air

Un manomètre différentiel sur les faces extérieure et intérieure du mur est installé dans le bâtiment B.BU « bureau 2 » (figure 2.3) via 2 tuyaux liés au manomètre. Une centrale d'acquisition enregistre les données de mesure à l'intervalle de 15 minutes. Nous avons utilisé les données de station météo La Crosse® WS 2500 installée sur site pour les données de vitesse et direction de vent. Le mur est orienté plein ouest et le bâtiment est angulaire, la façade reçoit donc le vent venant du nord et du nord-ouest.

3. Résultats des mesures sur les 2 bâtiments tests et analyses

3. 1. Mesures et analyse du confort thermique

Les températures relevées et utilisées pour la suite de l'étude, afin d'identifier le confort, sont des températures d'air obtenues à partir de capteurs HOBO placés contre les murs. Une étude a été effectuée à l'aide du thermomètre « Boule Noire » afin d'identifier les écarts existants entre ces températures « murales » et la température opérative (appelée aussi température résultante sèche). Les écarts relevés sont inférieurs à 0,5°C et s'expliquent par l'absence de parois froides, des taux de vitrage assez « réduits », et des vitesses d'air inférieures à 0,2 m/s. Dans la suite de l'étude et en particulier, dans l'analyse du confort « adaptatif » proposé par BRAGER, on utilisera les températures mesurées à l'aide des capteurs HOBO, pour effectuer l'analyse des conditions de confort dans les 2 bâtiments.

Sur le tableau 2.3, sont présentés les résultats des mesures de températures des 2 bâtiments.

Tableau 2.3 : Températures relevées pendant les 2 périodes Hiver et Eté

	Période Hiver			Période Eté		
	T _{min} °C	T _{moy} °C	T _{max} °C	T _{min} °C	T _{moy} °C	T _{max} °C
Bât. Habitation	12,5	19,6	23,2	17,2	23,2	32,7
Bât. Bureaux	9,8	19,8	27,3	17,6	25,4	33,2
Extérieur	-4,8	5,6	17,1	8,4	24,1	42,1

A partir de la représentation ci-dessous des niveaux et amplitudes des températures en 5 points du B.HA, 4 points du B.BU, on remarque que

- les températures minimales dans le bâtiment B.BU sont inférieures à celui du bâtiment B.HA (Figure 2.10-a),
- pendant la période Eté, les températures moyennes dans le bâtiment B.BU sont supérieures à celui du bâtiment B.HA,
- la différence de températures entre coin nuit et coin jour n'est pas significative.

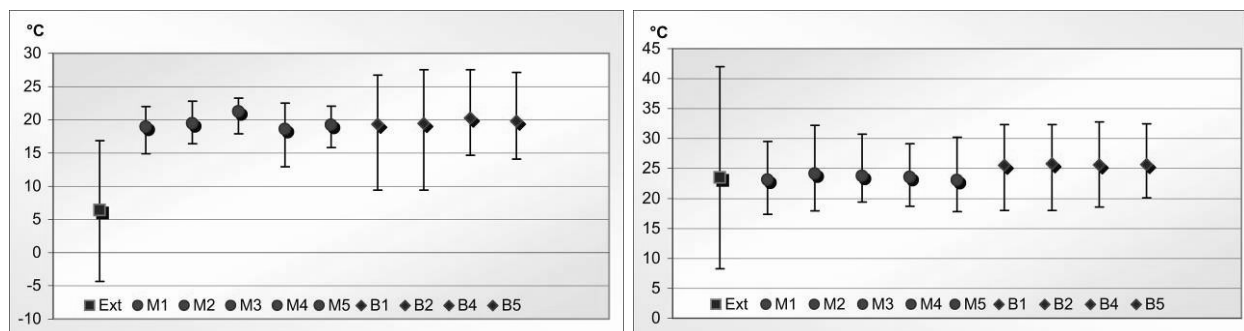


Figure 2.10 : Températures moyennes, maximums et minimums dans les 2 bâtiments et à l'extérieur, a) période Hiver, b) période Eté.

La figure (2.11) présente les fréquences de température dans les 2 bâtiments. Dans le bâtiment B.AH, l'écart entre la température minimale et maximale est de 5°C à 6°C dans le coin jour et le coin nuit. Cet écart est supérieur à 12°C (de 15°C jusqu'au 27°C dans les différentes zones) dans le bâtiment « B.BU ».

La forte variation de la température dans le bâtiment B.BU résulte directement de l'usage du bâtiment. Pendant la nuit, la température est maintenue à 16°C, à partir de 7h du matin, la température monte régulièrement jusqu'à 21°C. À partir de 9h, l'arrivée de 7 personnes aux bureaux, à laquelle s'ajoutent 7 ordinateurs, une photocopieuse et 12 lampes halogènes, entraîne une augmentation de la température jusqu'à 24°C (constaté sur 4% du temps total et sur 12% du temps réel d'occupation) et parfois même jusqu'à 26°C.

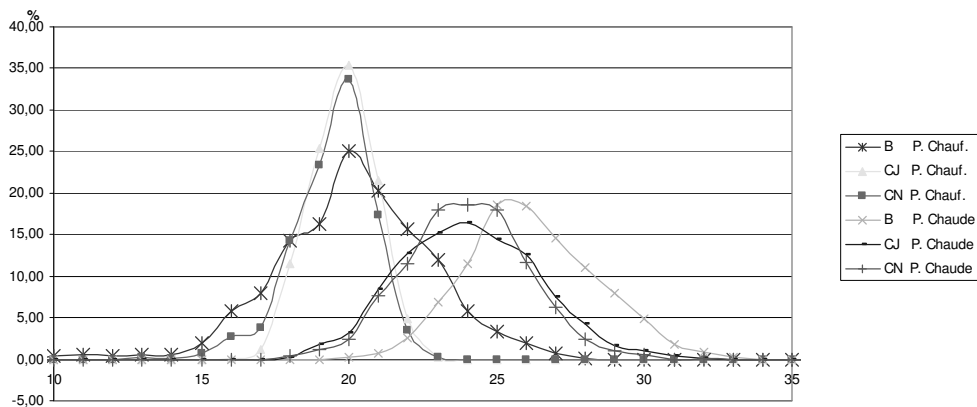


Figure 2.11 : Fréquences des températures intérieures dans le B.HA (Coin Jour (CJ) et Coin Nuit (CN)) et dans le bâtiment B.BU pour la période d'hiver (P. Chauff.) et la période d'été (P. Chaude).

Sur le tableau 2.4, on représente les fréquences des températures dans les 2 constructions par rapport aux températures de référence. Pour la période d'été, la température dans le bâtiment B.BHA reste inférieure à 25°C sur plus de 72% de temps de mesure, mais seulement sur 40% du temps dans le bâtiment B.BU.

Tableaux 2.4 : Fréquence des températures dans les 2 bâtiments tests par rapport aux températures de référence

		T <19°C	19°C ≤ T ≤ 25°C	T > 25°C
Période Été	Bât. Habitat.	0,2	72,1	27,7
	Bât. Bureaux	0,9	40,4	59,6
	Extérieur	22,3	41,0	36,7

Sur la figure 2.12, sont représentés les températures intérieures dans le bâtiment B.HA sur les 2 périodes Hiver +, et Été ✕ en y superposant la zone de confort thermique de Brager.

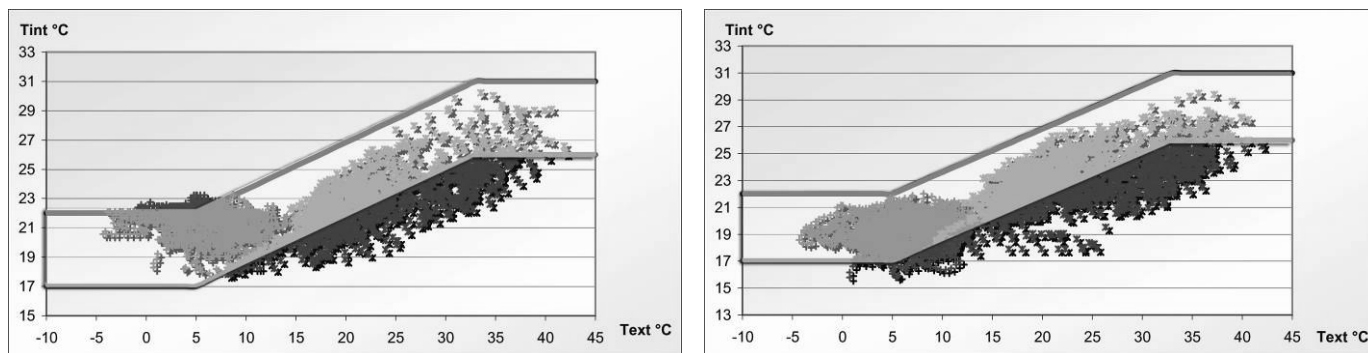


Figure 2.12 : Zone de confort thermique « Brager » dans la maison. A) Coin jour, B) coin nuit, sur deux périodes (+ Période d'hiver, ж Période d'été).

En période Hiver, pour 93% des points mesurés, les températures sont bien placées entre les 2 limites de Brager ; 3% des points seulement sont supérieurs à 22°C pour le coin jour, et 5% sont inférieurs à 17°C pour le coin nuit. Pour la période Eté, 100% des points de mesures sont inférieurs à la limite supérieure de Brager, et 50% des points mesurés sont inférieurs à la limite basse de Brager.

Sur la figure (2.13) avec la même démarche appliquée au B.BU, on remarque que seuls 11% des points des mesures sont au dessus de la limite supérieure de Brager.

Nous avons calculé le taux de surchauffe en utilisant la méthode d'Axley (2001) basée sur la méthode de Zurich (Figure 2.4). Avec les limites de Brager, l'ODH est alors défini comme la somme intégrée des excédents de température pendant la période d'été.

Le taux de surchauffe ODH dans le bureau principal est de 256 °C.h sur les 2120 heures de mesure, l'ODH étant moins important dans le bureau de comptabilité ODH=165°C.h. Il est à noter que, sur la même période, l'ODH est nul sur les 2 zones du bâtiment B.HA.

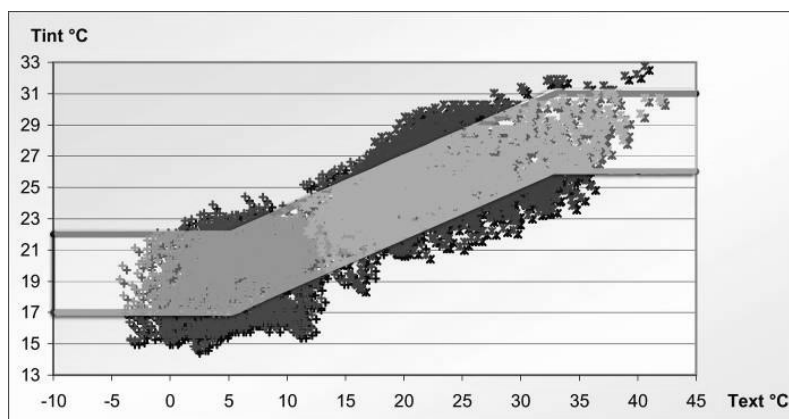


Figure 2.13 : Zone de confort thermique Brager dans le bâtiment de bureaux sur deux périodes (+ Période d'hiver, ж Période d'été).

Le traitement de confort « Brager » appliqué au bâtiment B.BU présente par rapport au bâtiment B.HA, un caractère très différent : à un niveau de température extérieure, correspond une très forte variabilité des températures intérieures mesurées avec des écarts de près de 8°C alors que « Brager » donne une plage moyenne de 5°C. Cette situation résulte de conditions d'usage très

variables dans le bâtiment B.BU et dans ses différentes zones (forte discontinuité, taux d'occupation variables, charges thermiques intérieures, ouvertures des portes et fenêtres,...)

En conclusion, on constate clairement sur les représentations ci-dessus, le bon fonctionnement thermique du B.HA aussi bien dans les conditions Hiver que dans les conditions Eté. En particulier, dans les conditions Eté et « demi-saison » ($T_{ext} > 20^{\circ}\text{C}$), les températures intérieures constatées sont inférieures de 2°C en moyenne, aux limites basses indiquées par Brager. (Figure 2.14).

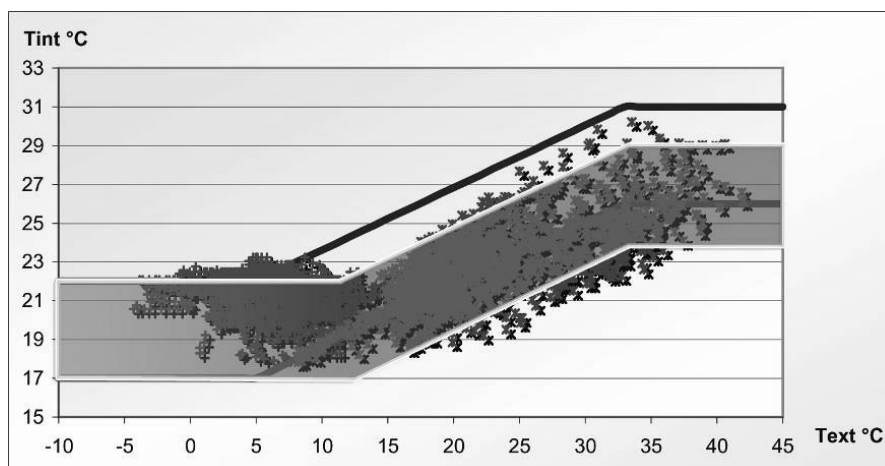


Figure 2.14 : Zone de confort thermique des maisons Bois Massif en ventilation naturelle

3. 2. Analyse des conditions et des variations d'humidité dans 2 bâtiments BM en ventilation naturelle

3. 2. 1. Niveaux d'humidité mesurés à l'intérieur des bâtiments

Les valeurs d'humidité relative sont mesurées à l'aide de HOBO H08. En annexe 5, sont détaillés l'intervalle de mesure, la période et la précision des capteurs. Les valeurs d'humidité sont ramenées à des moyennes horaires, l'humidité relative relevée est comprise entre 42% dans le bâtiment B.BU avec HR maximum de 70% pendant la période Hiver. On observe dans l'autre bâtiment, que l'humidité relative moyenne varie entre 50 et 53% dans le coin jour et est plus élevée dans le coin nuit sur la même période (Figure 2.15).

Tableau 2.5 : Humidités relatives mesurées dans les 2 bâtiments et à l'extérieur en périodes Hiver et Eté

	Période Hiver			Période Eté		
	HR _{min}	HR _{moy}	HR _{max}	HR _{min}	HR _{moy}	HR _{max}
Bât. Habitation CJ	32%	52%	76%	31%	51%	80%
Bât. Habitation CN	39%	60%	67%	28%	51%	70%
Bât. Bureaux	22%	42%	70%	22%	44%	76%
Extérieur	50%	88%	100%	22%	52%	100%

Pendant la période Eté, on remarque que :

- La moyenne HR est de 44% dans le B.BU avec un maximum de 76% en salle de réunion,
- En B.HA, HR est plus élevée sur la même période avec une valeur de 51%, avec HR de 80%, et le taux maximum était plus élevé dans le coin jour (capteur M5),
- le taux moyen d'humidité relative est de 52% à l'extérieur pour la même période avec un maximum de 100% (Figure 2.15-B).

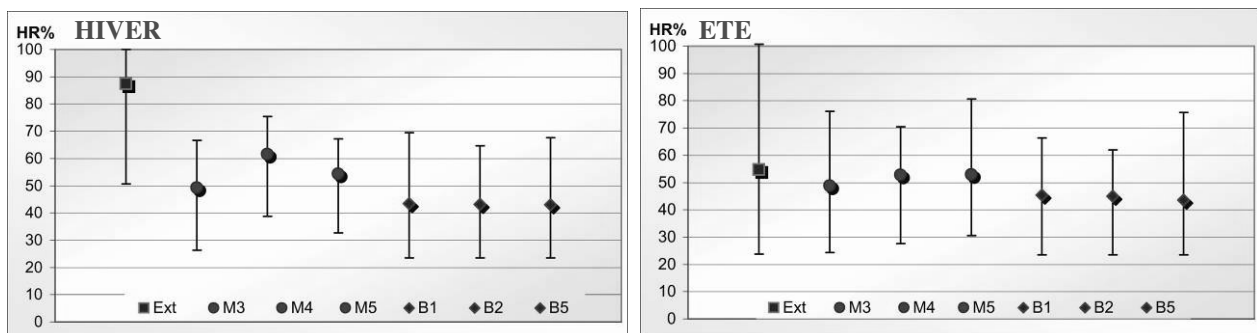


Figure 2.15 : Humidités relatives moyennes, maximums et minimums dans les 2 bâtiments et à l'extérieur, A) période Hiver, B) période Eté.

La figure (2.16) représente la fréquence de l'humidité relative dans les 2 bâtiments pendant la période d'hiver, dans le bâtiment B.BU, on trouve que 95% de temps de mesure présente un taux d'humidité inférieur à 60 %. L'humidité relative dans la maison était plus élevée avec 65% de temps de mesure entre 50 et 60%, mais aussi 20% de temps de mesure présente un taux d'humidité supérieur à 60% (figure 2.16-a).

La fréquence de l'humidité relative montre que les taux d'humidité pendant la période Hiver sont acceptables dans les 2 bâtiments malgré l'absence de la ventilation artificielle

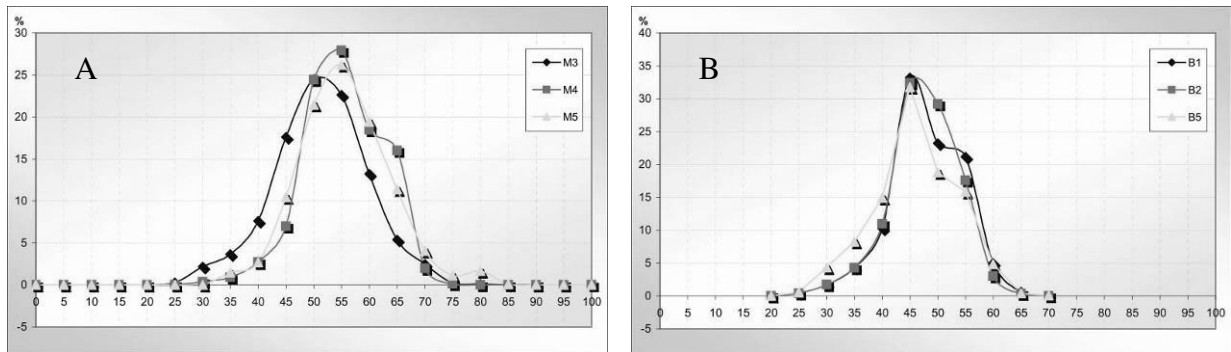


Figure 2.16 : Fréquences d'humidité relative dans A) la maison, B) les bureaux, pendant la période Hiver

Dans l'habitation et pendant la période Eté, l'humidité relative dans le coin nuit (M4) est très élevée avec 65% de temps de mesure à un taux supérieur à 60% ; cependant, dans le coin jour (M3 et M5), 75% des valeurs de HR se situent entre 40% et 60% figure (2.17-A). En même temps, l'humidité relative dans les bureaux reste moins élevée avec 75% des valeurs entre 40 et 60% (Figure 2.17-B).

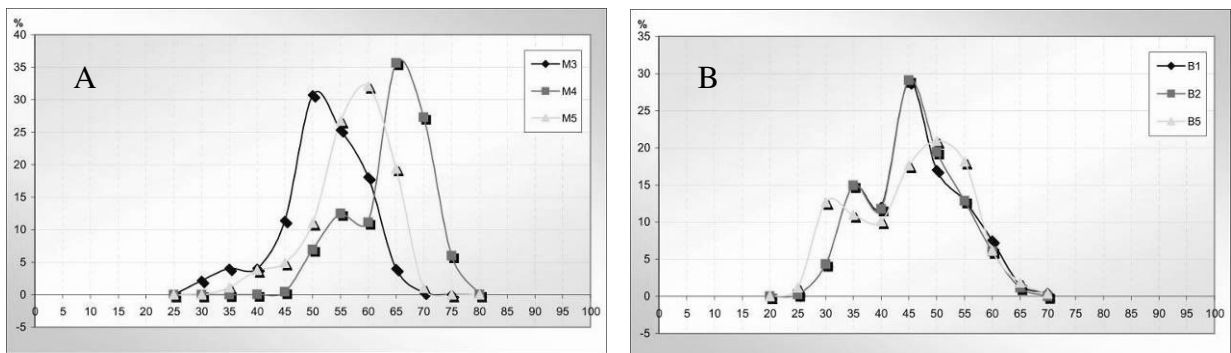


Figure 2.17 : Fréquences d'humidité relative dans A) la maison, B) les bureaux, pour la période d'été

L'humidité absolue indique la masse de vapeur d'eau continue dans 1 kg d'air sec ; elle est calculée à partir de l'humidité relative et de la température pour chaque point de mesure. Les calculs de l'humidité absolue dans les 2 constructions et à l'extérieur sont représentées sur le tableau 2.6. On trouve que l'humidité absolue moyenne dans le bâtiment B.HA est supérieure à celle du bâtiment B.BU pendant la période Hiver, Cette humidité est plus élevée pour le coin nuit que le coin jour dans le bâtiment B.HA pour la même période.

Tableau 2.6 : Humidité absolue [g/kg] calculée dans les 2 bâtiments et à l'extérieur pendant les périodes Hiver et Eté

	Période d'hiver			Période d'été		
	X_{\min}	X_{moy}	X_{\max}	X_{\min}	X_{moy}	X_{\max}
Bât. Habitation CJ	7,58	9,40	11,79	7,01	10,80	16,54
Bât. Habitation CN	6,67	9,96	12,92	6,17	11,12	16,51
Bât. Bureaux	2,67	6,11	10,96	5,74	10,83	16,58
Extérieur	3,86	7,18	12,74	5,63	11,58	19,53

Pendant la période Eté, l'humidité absolue moyenne est supérieure dans le coin nuit à celle du coin jour et le bâtiment B.BU. Les valeurs minimales dans le bâtiment Habitation restent supérieures à celui du bâtiment Bureaux.

On conclut que la charge d'humidité reste plus importante dans le bâtiment B.HA bien que le nombre des personnes reste inférieur à celui du bâtiment B.BU. « Forte fréquence des ouvertures de porte dans le B.BU en période d'occupation ».

Sur la figure 2.18, on représente la fréquence de l'humidité absolue dans les 2 constructions et à l'extérieur pendant la période d'hiver. On trouve que

- la charge d'humidité est supérieure dans le coin nuit à celui du coin jour pour le bâtiment B.HA,
- 85% des points des mesures présentent un taux d'humidité absolue entre 9 et 11 g/kg,
- Les valeurs de l'humidité absolues restent inférieures dans le bâtiment B.BU avec 60% des points des mesures inférieures à 9 g/kg,
- la fréquence de l'humidité absolue dans le bâtiment B.BU est très proche à celui de l'extérieur.

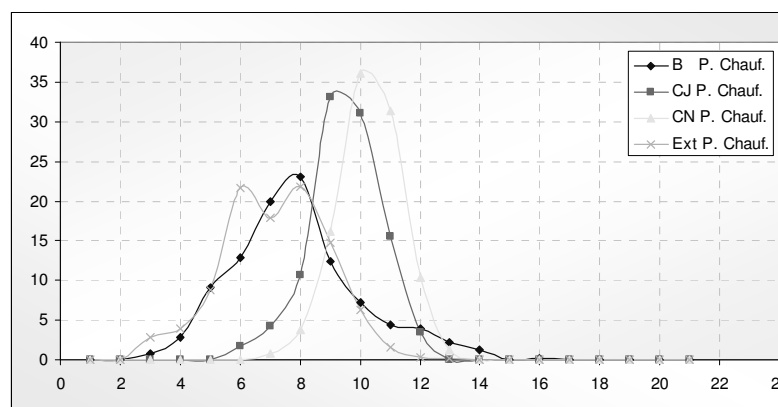


Figure 2.18 : Fréquences de l'humidité absolue dans le bâtiment B.HA (Coin Jour CJ et Coin Nuit CN) et dans le bâtiment B.BU (B) et à l'extérieur (Ext) pour la période d'hiver

Pendant la période d'été, les fréquences de l'humidité absolue sont toutes très proches (2 bâtiments et extérieur). Les valeurs d'humidité absolue restent supérieures dans le coin nuit du bâtiment B.HA à celui du coin jour. L'humidité absolue dans les 2 bâtiments reste légèrement inférieure à la valeur extérieure (Figure 2.19).

En conclusion, en toutes saisons, l'humidité absolue dans le coin nuit du bâtiment B.HA est supérieure à celle du coin jour. Cette humidité reste supérieure dans le bâtiment B.HA à celle du bâtiment B.BU. L'utilisation joue donc un rôle important et quantifiable sur la charge d'humidité en particulier, dans une construction en bois massif.

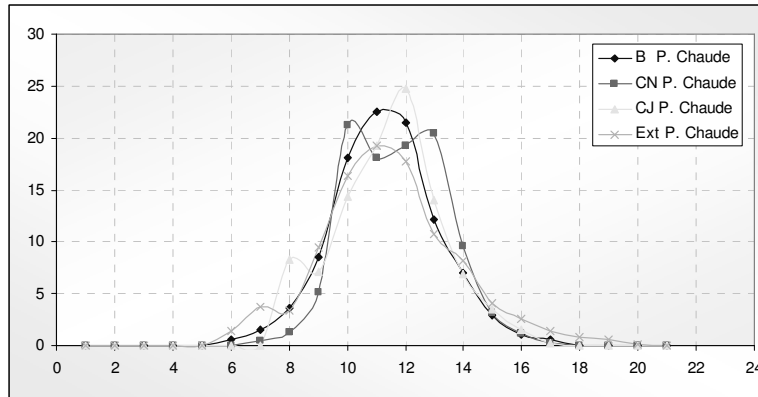


Figure 2.19 : Fréquences d'humidité absolue dans le bâtiment B.HA (Coin Jour CJ et Coin Nuit CN) et dans le bâtiment B.BU (B) et à l'extérieur (Ext) pour la période d'été

3. 2. 2. Évaluation des charges hydriques à l'intérieur des bâtiments

Pour bien comprendre la réponse d'un bâtiment en bois massif vis-à-vis d'une charge hydrique, nous avons utilisé la méthode de calcul de la charge moyenne d'humidité pendant les 2 périodes Hiver et Eté dans les 2 bâtiments en bois massif (Kalamees et Vinha (2006)). La charge hydrique est la différence du contenu de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur de chaque construction.

Dans le bâtiment B.AH, la charge moyenne pendant la période Hiver ($T_{ext} \leq 5^{\circ}C$) est de $2,9 \text{ g/m}^3$ dans le coin jour et $3,6 \text{ g/m}^3$ sur le coin nuit ; pendant le temps restant ($T_{ext} > 5^{\circ}C$), la charge moyenne est de $0,8 \text{ g/m}^3$ sur le coin jour et atteint $1,3 \text{ g/m}^3$ dans le coin nuit (Figure 2.20)

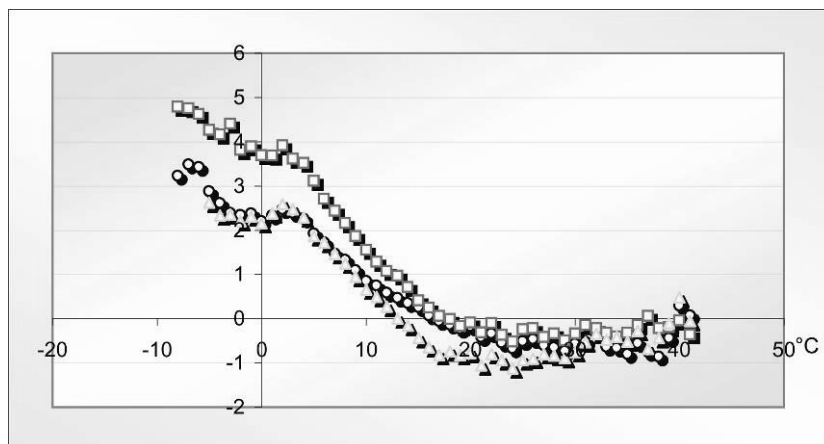


Figure 2.20 : évolution de la charge hydrique moyenne (g/m^3) par rapport à la température extérieure dans le bâtiment B.HA (■) Coin Nuit (●, ▲) Coin Jour.

Dans le bâtiment B.BU, la charge est plus élevée dans la salle de réunion que dans les autres bureaux pendant la période Hiver ($T_{\text{ext}} \leq 5^\circ\text{C}$) où la charge moyenne est de $1,8 \text{ g/m}^3$; la charge moyenne dans les autres bureaux est de $1,3 \text{ g/m}^3$. Pendant la période d'été ($T_{\text{ext}} > 5^\circ\text{C}$) la charge moyenne est faible, $0,3 \text{ g/m}^3$ pour les trois bureaux (figure 2.21).

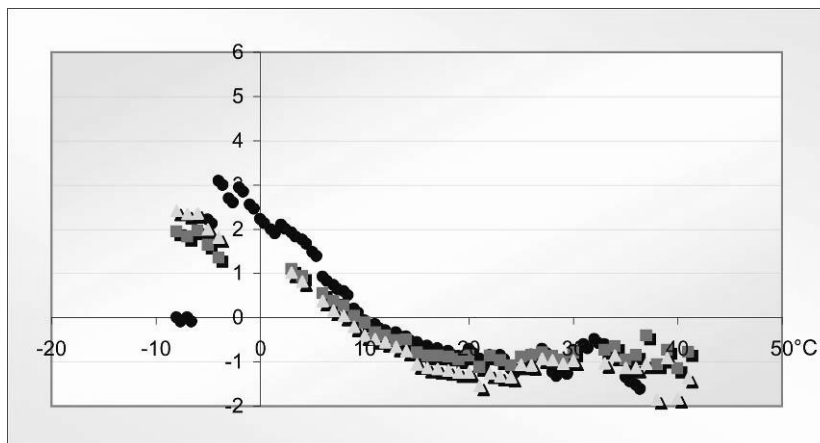


Figure 2.21 : évolution de la charge d'humidité moyenne (g/m^3) dans le bâtiment B.BU par rapport à la température extérieure. (●) salle de réunion. (■, ▲) Bureau 1 et 2.

La figure (2.22) représente la fréquence de la charge d'humidité dans le bâtiment B.HA ; il se confirme que la charge d'humidité sur le coin nuit est plus élevé que celui de coin jour, pendant la période d'hiver ($T_{\text{ext}} \leq 5^\circ\text{C}$) avec 90% des points entre 2 et 5 g/m^3 , et pendant la période d'été avec 34% des points des mesure à 2 g/m^3 contre 21% des points à 2 g/m^3 sur le coin jour.

Il est à noter que la charge d'humidité dans le bâtiment B.HA est au même niveau que les valeurs relevées par Kalamees et Vinha pour la période d'été dans une maison à ventilation naturelle, mais elle est plus élevée pendant la période Hiver.

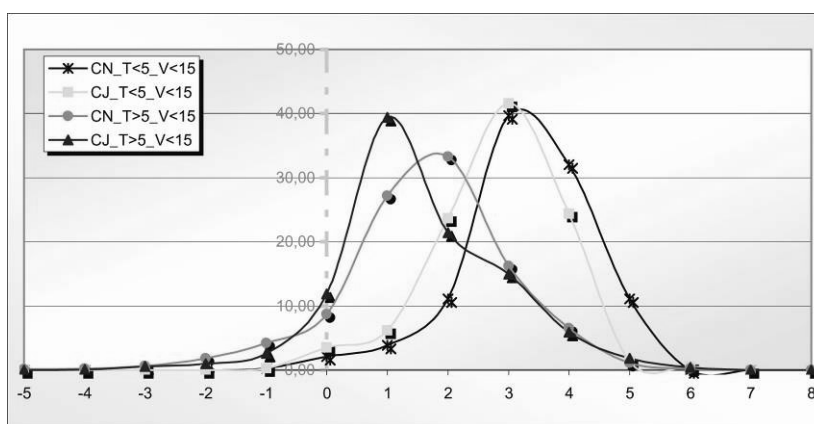


Figure 2.22 : Fréquence de la charge d'humidité sur la période froide ($T_{\text{ext}} \leq 5^\circ\text{C}$) et le reste du temps ($T_{\text{ext}} > 5^\circ\text{C}$) dans le bâtiment B.HA. (X) Coin Nuit ($T_{\text{ext}} \leq 5^\circ\text{C}$), (·) Coin Jour ($T_{\text{ext}} \leq 5^\circ\text{C}$), (○) Coin Nuit ($T_{\text{ext}} > 5^\circ\text{C}$), (▲) Coin Jour ($T_{\text{ext}} > 5^\circ\text{C}$),

Sur la figure 2.23 sont représentées les fréquences de la charge d'humidité dans le bâtiment B.BU. Sur la période Hiver, la charge d'humidité est plus élevée dans la salle de réunion avec 5 à 7 personnes entre 12h30 et 13h30. La charge hydrique reste inférieure à celle mentionnée par Kalamees et Vinha pour les maisons à ventilation naturelle pour les deux périodes.

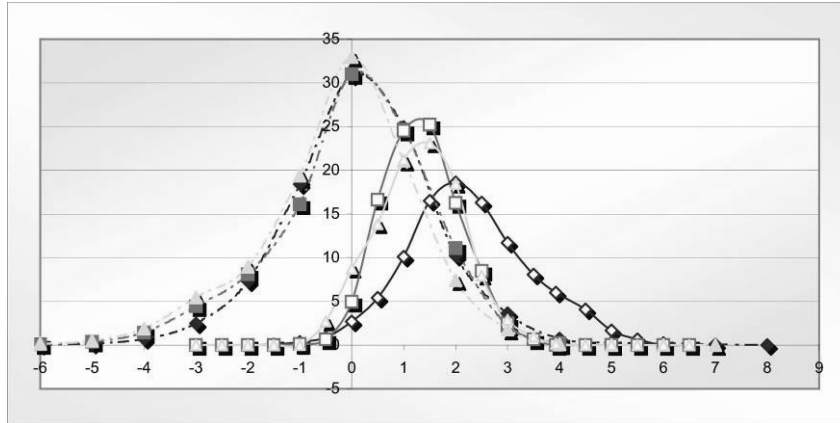


Figure 2.23 : Fréquence de la charge d'humidité sur la période froide ($T_{ext} \leq 5^{\circ}\text{C}$) et le reste du temps ($T_{ext} > 5^{\circ}\text{C}$) dans le bâtiment de bureaux. (◊) salle de réunion ($T_{ext} \leq 5^{\circ}\text{C}$), (◻) Bureau 1 ($T_{ext} \leq 5^{\circ}\text{C}$), (◄) Bureau 2 ($T_{ext} \leq 5^{\circ}\text{C}$), (◈) salle de réunion (B1) ($T_{ext} > 5^{\circ}\text{C}$), (◼) Bureau 1 (B4) ($T_{ext} > 5^{\circ}\text{C}$), (◄) Bureau 2 (B5) ($T_{ext} > 5^{\circ}\text{C}$).

Figure (2.24) montre l'influence de la vitesse de vent sur la fréquence de la charge d'humidité pour la période Hiver dans l'habitation. On trouve qu'une augmentation de la vitesse de vent de 0 à 15 km/s diminue la charge d'humidité de 3,4 à 1,9 sur le coin nuit et de 3,1 à 1,1 g/m³ sur le coin jour.

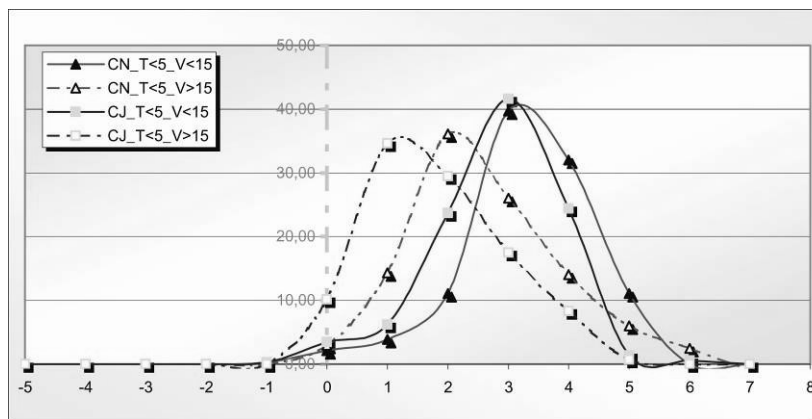


Figure 2.24 : Influence de la vitesse de vent sur la fréquence de la charge d'humidité pour la période froide ($T_{ext} \leq 5^{\circ}\text{C}$) dans la maison. (▲) Coin Nuit, Vitesse de vent < 15 km/h, (△) Coin Nuit, Vitesse de vent > 15 km/h, (◻) Coin Jour, Vitesse de vent < 15 km/h, (◻) Coin Jour, Vitesse de vent > 15 km/h.

3. 2. 3. Analyse croisée entre niveaux de températures et d'humidité relative : confort hygro-thermique

Pour analyser les conditions de confort dans les 2 bâtiments tests, nous avons utilisé les démarches déjà mentionnées au chapitre 1 de cette étude. Pendant la période d'hiver, les limites de zone de confort sont maintenues entre 18°C et 23°C. Pendant la période d'été, lorsque les températures extérieures sont plus élevées, les limites de zone de confort sont prises entre 19°C et 25°C, lorsque les limites de l'humidité relative restent entre 30 et 60% pour les deux périodes.

Sur la figure (2.25) sont représentés les pourcentages d'inconfort dans les 2 bâtiments ; dans le bâtiment B.HA et pendant la période d'hiver, on trouve que les points de mesure pour le coin jour se situent totalement dans la zone de confort, la température dans le coin nuit reste acceptable avec 17% des points de mesure inférieurs à 18°C, cela montre une bonne gestion du chauffage sur le coin nuit. L'humidité reste au dessus de la zone de confort avec 20% de mesures trop élevées. Dans le bâtiment B.BU, et pendant la même période, on trouve que 20 à 27% des points de mesures se situent au dessous de la zone de confort ($T_{int} < 18^{\circ}\text{C}$), ce pourcentage reste acceptable dans un bureau de travail ; on constate que le pourcentage de 25% de temps au dessous de 18°C correspondant aussi à une bonne gestion du chauffage (il représente le temps d'inoccupation des bureaux pendant la nuit et le week-end). En conclusion, le taux de confort est très satisfaisant dans le bâtiment de bureaux pendant la période d'hiver.

Pendant la période d'été, on trouve que la température est très élevée dans les 2 bâtiments, le taux de sur chauffe arrive à 25% des mesures dans le bâtiment B.HA et à 60% dans le bâtiment B.BU. Il est à noter aussi que l'humidité est plus élevée dans la maison, 9% des points de mesure dans le coin jour et 19% des points de mesure dans le coin nuit présentent un taux d'humidité supérieur à 60%.

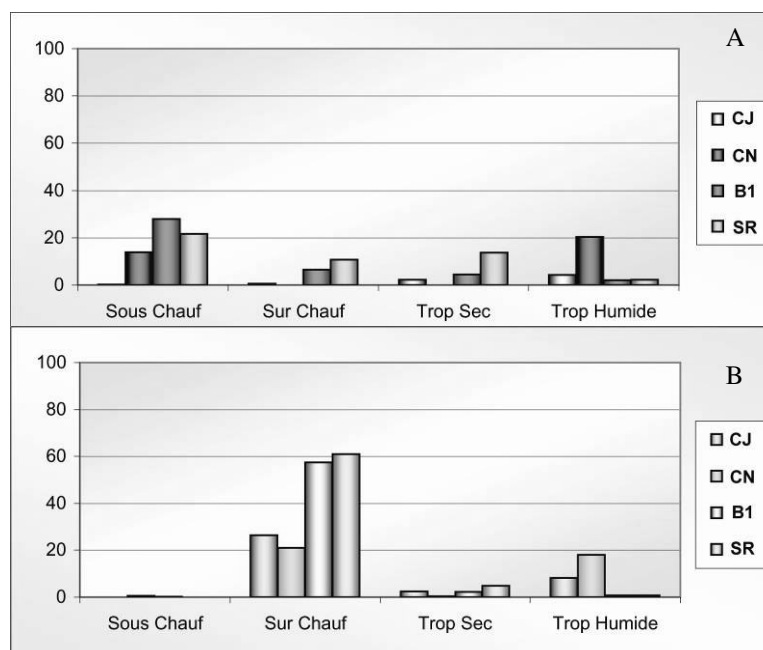


Figure 2.25 : Pourcentage d'inconfort dans la maison pour le coin jour (CJ) et le coin nuit (CN) et dans le bureau 1 (B1) et la salle de réunion (SR) et pendant la période d'hiver (A), et la période d'été (B)

Sur la figure (2.26) sont représentées les zones de confort pendant la période d'hiver et la période d'été dans les 2 bâtiments, les points de mesure sont bien placés dans les zones de confort pour le bâtiment B.HA. Les graphes C et D confirment les résultats de confort obtenus dans le bâtiment B.BU. Les graphes E à H représente la surchauffe et la forte humidité dans la maison, et le taux de surchauffe très élevé dans le « B.BU ».

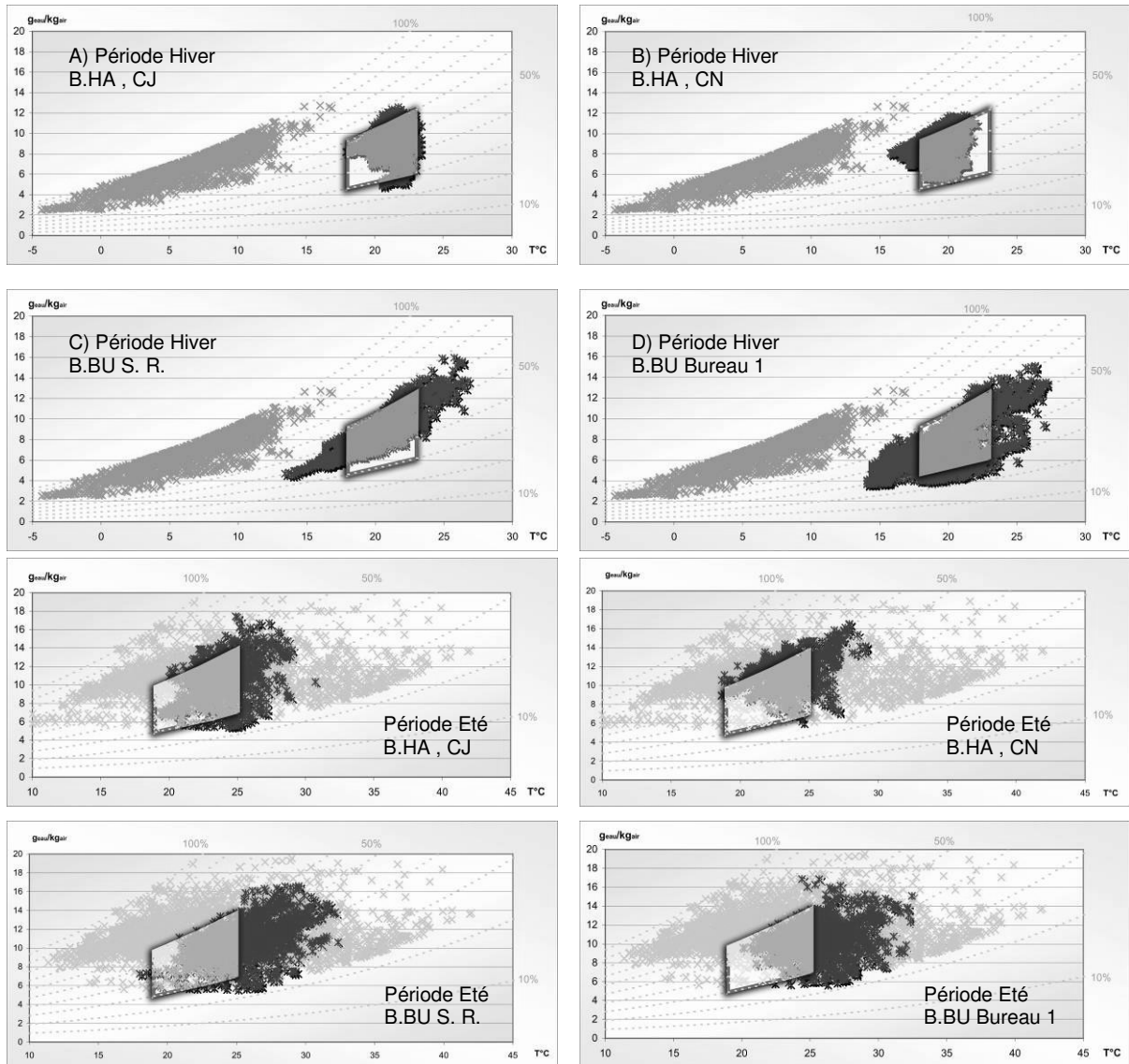


Figure 2.26 : Zones de confort pour B.HA (Coin Jour et Coin Nuit). Et pour B.BU (Salle de réunion et Bureau 1)

3. 3. Mesure du taux de CO₂ dans les 2 bâtiments tests (QAI)

Comme expliqué au chapitre 2.2.3, nous avons utilisé la concentration de CO₂ comme indicateur de suivi de la qualité d'air à l'intérieur des 2 bâtiments, 3 points de mesure, un dans le bâtiment B.HA et les 2 autres dans le bâtiment B.BU (Figure 2.3).

3. 3. 1. Evolution du CO₂ dans le bâtiment B.HA « salle de séjour »

La figure 2.27 indique les enregistrements de CO₂ sur différents jours dans la salle de séjour ; la concentration moyenne mesurée au cours de la période d'essai varie entre 500 et 700 ppm avec un niveau moyen de 580 ppm. Cette valeur est généralement au-dessous de la valeur recommandée par (ASHRAE) bien que le seul apport en air extérieur soit fourni par la ventilation naturelle et soit donc assez fluctuant.

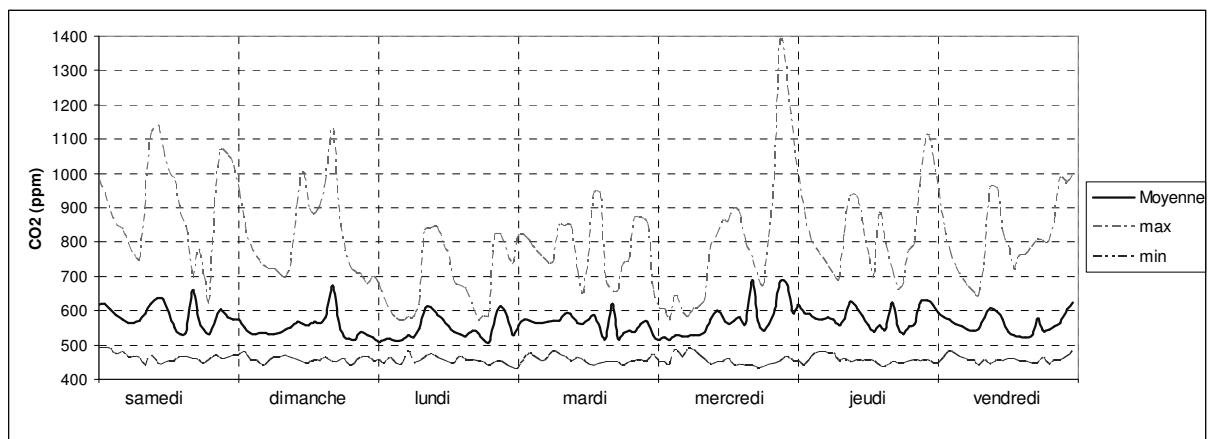


Figure 2.27 : Mesures de CO₂, valeurs maximum et minimum dans la salle de séjour.

Les « pointes » de CO₂ enregistrées reflètent une accumulation dans la salle de séjour en soirée, surtout pendant les week-ends et les mercredis ; on atteint ponctuellement jusqu'à 1100 ppm le week-end et jusqu'à 1400 ppm le mercredi. Cette concentration diminue pendant la matinée jusqu'à midi. La concentration passablement élevée durant la journée.

La figure 2.28 représente la fréquence de CO₂ dans la salle de séjour ; on constate :

- pour 90 % des points de mesure, un taux inférieur à 700 ppm,
- pour moins de 2%, un taux supérieur au seuil de 1000 ppm généralement admis.

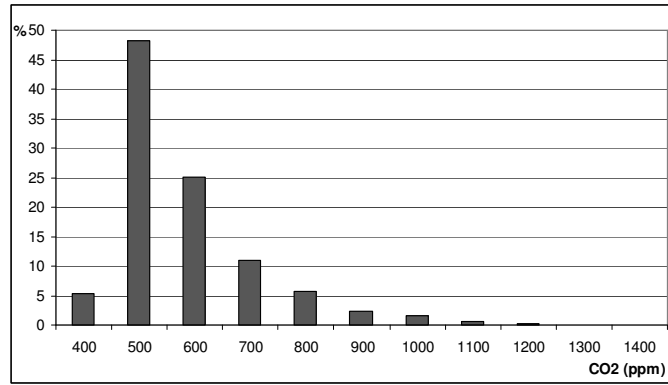


Figure 2.28 : Fréquences des mesures de CO₂ dans la salle de séjour

3. 3. 2. Evolution du CO₂ dans le bâtiment B.BU « salle de réunion»

Durant les heures normales d'occupation, le débit de ventilation doit être suffisant pour maintenir un apport minimal en air neuf extérieur équivalant à 10 litres/seconde et par personne (Shau, 1997). Comme les occupants produisent du CO₂ (de 10 à 20 litres par heure pour une personne au repos), les concentrations en CO₂ seront généralement proportionnelles au nombre des occupants.

Le graphique 2.29 montre :

- une accumulation de CO₂ rapide vers 9:00h du matin,
- une concentration plutôt élevée durant la journée,
- et une baisse constante à partir de 14:00h.

Les concentrations moyennes en CO₂ dans les bureaux varient de 500 à 1040 ppm avec une moyenne de 622 ppm. D'autre part, les maximums dans les bureaux varient entre 528 et 1320 ppm avec une moyenne de 710 ppm. On peut voir que la concentration maximale en CO₂ dans l'espace occupé est souvent plus haute que la valeur acceptable de 1000 ppm recommandées par ASHRAE pour la période entre 10h00 et 14h00.

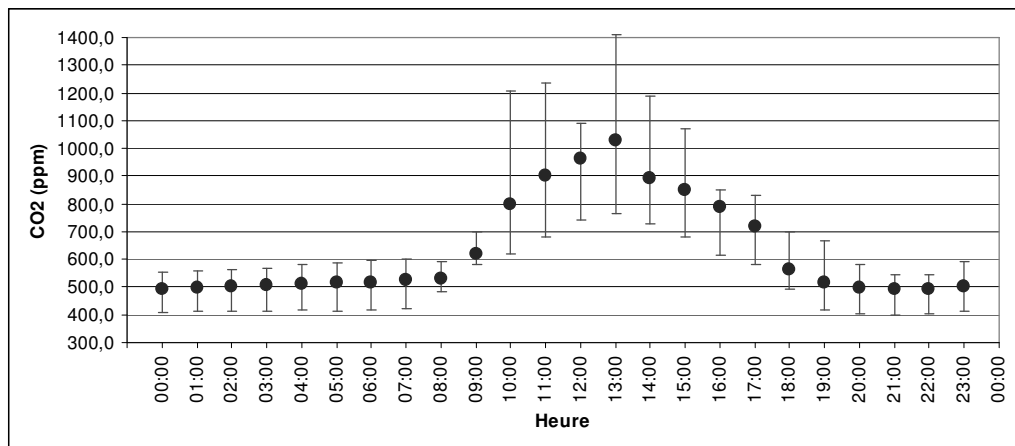


Figure 2.29 : concentration en CO₂ mesuré, valeur maximum et minimum dans le B.BU (salle de réunion)

On trouve par exemple que pendant une réunion de travail dans la salle de réunion, un taux maximal de la concentration en CO₂ allant jusqu'à 1200 ppm. Par ailleurs, la concentration en CO₂ la plus élevée vers 13:00h liée à l'existence de 5 à 7 personne dans le bureau chaque jour pour le déjeuner.

Figure 2.30 représente la fréquence de taux de CO₂ dans le bureau principal, il montre que 95% des valeurs de points mesurés sont au dessous de 800 ppm.

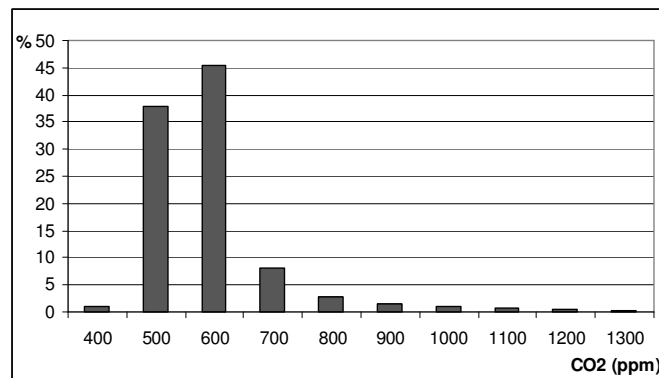


Figure 2.30 : Fréquence des valeurs de CO₂ dans le B.BU

3. 3. 3. Evolution du CO₂ dans le bâtiment B.BU « bureau comptabilité »

La même démarche est réalisée dans un bureau de « petit volume » en ventilation naturelle. L'étude menée sur une journée présente le scénario suivant :

- Deux personnes y sont présentes de 8:30h à 13:00h, avec porte et fenêtre fermées.
- Elles ont quitté le bureau de 13 :00h à 14h,
- une personne a occupé le bureau tout l'après midi.

Pour cela, nous avons utilisé un « Multi gaz moniteur INNOVA[®] 1314 », (voir annexe 6 et 7). Cet appareil est plus précis que celui utilisé pour mesurer la concentration en CO₂ dans les autres points de mesure.

On peut voir que la concentration en CO₂ dans le bureau de comptabilité est beaucoup plus élevée que la valeur recommandée par ASHRAE pendant un temps de travail (9:00-18 :00 h), (Figure 2.31). On constate aussi que la concentration maximale dépend en grande partie de la charge humaine. Les niveaux élevés du CO₂ dans le bureau de comptabilité sont directement liés ici à une ventilation insuffisante.

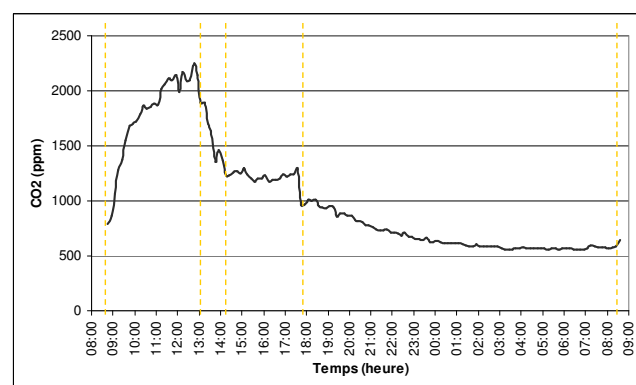


Figure 2.31 : concentration en CO₂ mesurée dans le bureau de comptabilité.

Nous avons calculé la concentration en CO₂ en utilisant un modèle de calcul « simple » avec les hypothèses suivantes :

- chaque occupant rejette 20 litres de CO₂ par heure,
- taux de renouvellement d'air moyen N = 0,35 vol/h.

La figure ci-dessous montre une bonne concordance entre les mesures et le calcul.

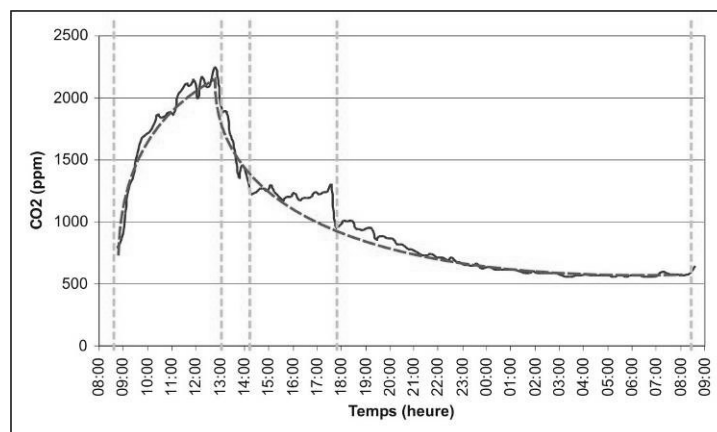


Figure 2.32 : Concentration en CO₂ mesurée (noir) et calculée (trait rouge) dans le bureau de comptabilité

En conclusion, la concentration en CO₂ dans la maison d'habitation est très satisfaisante par rapport aux valeurs de référence. Par ailleurs, le niveau de CO₂ dans le bâtiment B.BU varie fortement selon le nombre d'occupant par rapport à l'unité de surface, suivant le comportement et réagit en particulier directement aux ouvertures de portes donnant sur l'extérieur.

3. 4. Perméabilité des constructions en bois massif

Pour mesurer la perméabilité dans les constructions en bois massif, nous avons utilisé la **méthode d'affaiblissement de gaz traceur** à l'aide d'un multi gaz moniteur INNOVA® et un manomètre différentiel ; la direction et la vitesse de vent pendant les périodes d'essai sont obtenues à partir de la station météo WS2500 installée sur site. L'essai est réalisé dans le bâtiment B.HA « Salle de séjour » et dans le bâtiment B.BU « bureau de comptabilité »

L'essai de perméabilité par la **méthode de dépression** a été réalisé selon la norme EN 13829 dans le bâtiment B.HA, les résultats des mesures sont comparés entre eux et avec les valeurs demandées par la RT2000.

3. 4. 1. Le taux de renouvellement d'air (N) dans le bâtiment B.HA « salle de séjour »

Le tableau 2.7 récapitule l'ensemble des mesures de renouvellement d'air dans la salle de séjour, ainsi que la vitesse de vent moyenne durant les essais. Ces mesures ont été répétées 15 fois pour la période de 21 septembre jusqu'à 20 octobre.

Tableau 2.7: Mesures de renouvellement d'air moyen (N moyen) dans la salle de séjour et les deux points d'échantillonnage (N_1 et N_2) ainsi que la vitesse de vent moyenne (V_{vent} moyenne) pour la même période.

Date	N_1 (V/h)	N_2 (V/h)	N_{moyen} (V/h)	V_{vent} moyenne (km/h)
21/09/2005	0,322	0,315	0,3185	7,39
22/09/2005	0,162	0,163	0,1625	0,49
29/09/2005	0,432	0,437	0,4345	14,04
30/09/2005	0,176	0,174	0,175	1,25
03/10/2005	0,301	0,307	0,304	9,26
04/10/2005	0,166	0,178	0,172	0,57
05/10/2005	0,464	0,461	0,4625	16,01
10/10/2005	0,544	0,53	0,537	20,73
11/10/2005	0,748	0,763	0,7555	27,27
13/10/2005	0,159	0,157	0,158	0,06
14/10/2005	0,175	0,175	0,175	9,46
17/10/2005	0,233	0,233	0,233	0,45
18/10/2005	0,63	0,614	0,622	6,96
18/10/2005	0,145	0,14	0,1425	3,56
20/10/2005	0,342	0,34	0,341	7,96

Sur la figure 2.32 sont mises en relation, pour la salle de séjour, les moyennes de taux de renouvellement d'air (volume par heure) relevées pour la période d'essai avec les vitesses moyennes

de vent (km/heure). On trouve que le taux de renouvellement d'air moyen est très variable, allant de 0,14 à 0,77 vol/h, mais très dépendant de la vitesse du vent.

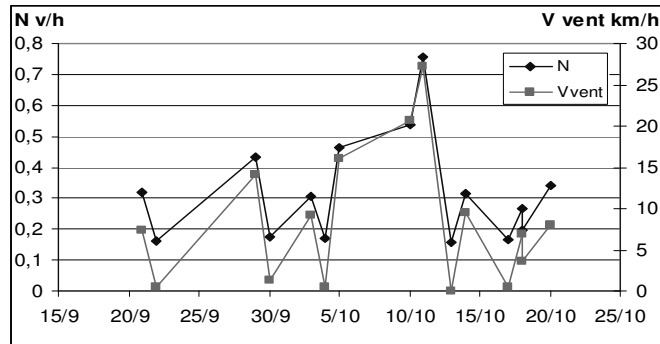


Figure 2.32 : Taux du renouvellement d'air relevé pour une période d'un mois (♦) lié à la vitesse de vent moyenne (■) dans la salle de séjour (point 1 maison)

Une relation linéaire entre le renouvellement d'air dans la salle de séjour et la vitesse de vent est représentée sur la figure 2.33 ; on trouve que le taux de renouvellement d'air le plus bas (0,16 volume par heure) est mesuré pour une vitesse de vent (v_{vent}) inférieure à 1 km/h. Par ailleurs, quand la vitesse de vent dépasse 25 km/h, le taux est supérieur à 0,75 volume par heure. L'équation 2.3 représente la relation sous forme linéaire, entre le taux de renouvellement d'air (N) et la vitesse moyenne de vent v_{vent} :

$$N = (0,02 \times v_{vent}) + 0,15 \quad (2.3)$$

A partir de cette équation, on peut déduire l'équation de la perméabilité à l'air (k) pour une paroi en bois massif par unité de surface et par heure :

$$k = N \times \frac{Volume}{Surface} \quad (2.4)$$

$$k = ((0,02 \times v_{vent}) + 0,15) \times 240 / 86,2 \quad (2.5)$$

$$k = 0,056 v_{vent} + 0,41 \quad (k \text{ exprimé en } m^3/m^2/h) \quad (2.6)$$

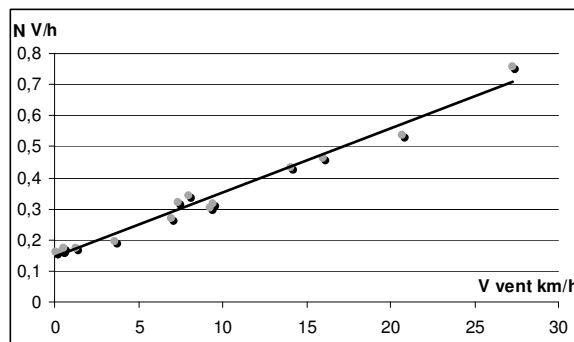


Figure 2.33 : Relation entre la vitesse de vent et le renouvellement d'air dans la salle de séjour.

3. 4. 2. Le taux de renouvellement d'air (N) dans le bâtiment B.BU « bureau de comptabilité »

La mesure du taux de renouvellement est ici répétée 4 fois ; les résultats sont représentés dans la table 2.8.

Tableau 2.8 : Mesures de renouvellement d'air moyen (N moyen) dans le bureau de comptabilité ainsi que vitesse de vent moyenne (V_{vent} moyenne) pour la même période

Date	V_{vent} moyenne (km/h)	N moyen (V/h)
05/12/2005	1,15	26,11
06/12/2005	0,38	4,24
07/12/2005	0,541	8,4
08/12/2005	0,525	8,6

Une relation linéaire entre le renouvellement d'air dans le bureau de comptabilité et la vitesse de vent est représentée sur la figure 2.34 ; le taux de renouvellement d'air est supérieur à celui trouvé dans l'autre bâtiment. L'équation 2.7 représente la relation entre le taux de renouvellement d'air (N) et la vitesse moyenne de vent v_{vent} :

$$N = (0,036 \times v_{vent}) + 0,2199 \quad (2.7)$$

On applique les mêmes équations utilisées dans l'étude de la perméabilité par unité de surface de mur pour la salle de séjour « maison d'habitation » :

$$k = ((0,04 \times v_{vent}) + 0,205) \times 35,1 / 20,96 \quad (2.8)$$

$$k = 0,06 v_{vent} + 0,367 \text{ exprimé en m}^3/\text{m}^2/\text{h} \quad (2.9)$$

Pour valider l'équation 2.6, nous avons comparé le flux d'air à travers le mur en bois massif dans le bâtiment B.HA avec les points expérimentaux obtenus pour dans le bâtiment B.BU. La figure 37 montre l'application de cette formulation pour les points expérimentaux relevés dans le bureau.

Les points mesurés sont identiques aux points estimés par l'équation. On valide donc le modèle « expérimental » de l'équation 2.6 ce qui permettra par la suite, de déterminer le flux d'air à travers une paroi en bois massif à partir de la vitesse moyenne d'air du site. Remarquons enfin que l'épaisseur de bois formant les madriers ne joue pas un rôle important sur le flux d'air à travers la paroi, cette remarque sera vérifiée par des essais menés sur des échantillons en laboratoire.

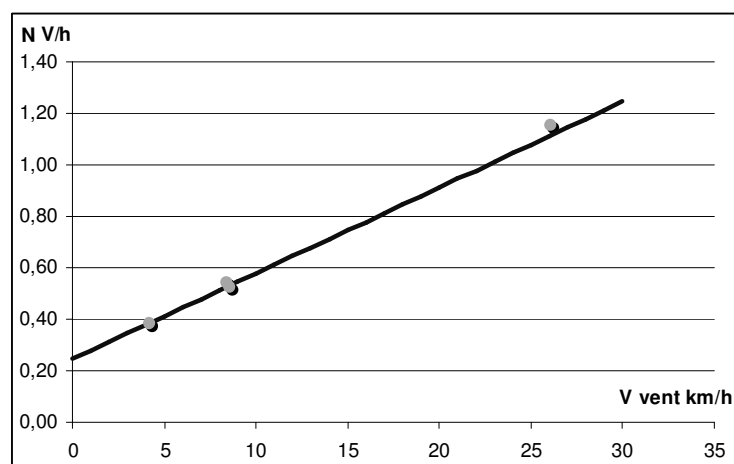


Figure 2.34 : Application des points obtenus à partir de l'équation 2.6 dans la salle de séjour (Maison) (—) sur les points expérimentaux obtenus dans le bureau (•)

3. 4. 3. Etude de perméabilité à l'air par la méthode de dépression «Blowerdoor ou porte soufflante »

Nous avons réalisé les mesures de perméabilité sur le bâtiment B.HA dans les conditions suivantes :

- Ecart entre températures intérieure et extérieure de 3°C,
- Différence de pression (à débit nul) inférieure à 2 Pa,
- Vitesse du vent à l'échelle de Beaufort = 2,
- Conformes aux conditions d'application de la norme EN 13829).

Le rapport d'essai de perméabilité selon la norme EN 13829 réalisé avec le CETE Sud – Ouest est présenté sur l'annexe 8 ; Il montre que la perméabilité moyenne à 4 Pa (I4) est égale à 1,32 m³/ (h.m²) avec un coefficient de correction linéaire $R^2 = 0,998$. Cette valeur est supérieure à I4 de référence demandée par RT 2000 et correspond plutôt à la valeur par défaut de la RT2000.

3. 4. 4. Influence du vent (vitesse et direction) sur le renouvellement d'air dans le bâtiment

L'étude du renouvellement d'air dans les 2 bâtiments montre l'influence de la vitesse du vent sur le flux d'air à travers la paroi en bois massif. Nous avons essayé de déterminer expérimentalement l'effet de la vitesse et la direction de vent sur la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur de bâtiment.

La figure 2.35 montre les valeurs des écarts de pression pour une période de 25 jours, ΔP varie entre (+ 6,93) Pa et (- 4,66) Pa pour une vitesse de vent comprise entre 0 et 23 km/h. La figure 2.36 représente les valeurs absolues des écarts de pression et de la vitesse du vent.

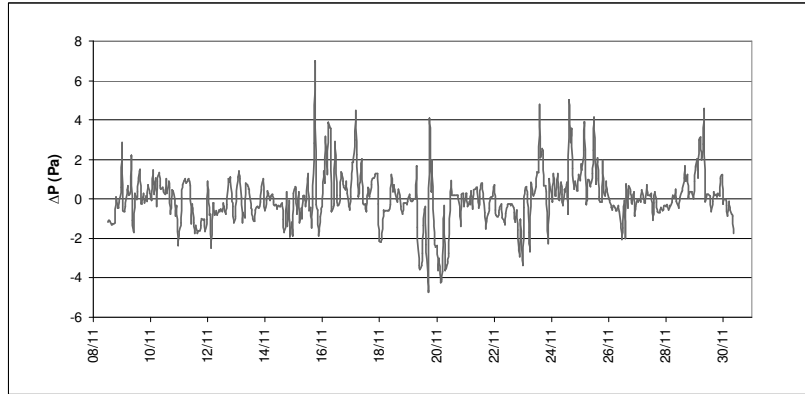


Figure 2.35 : ΔP entre les deux côtés de mur en bois massif pour une période de 25 jours.

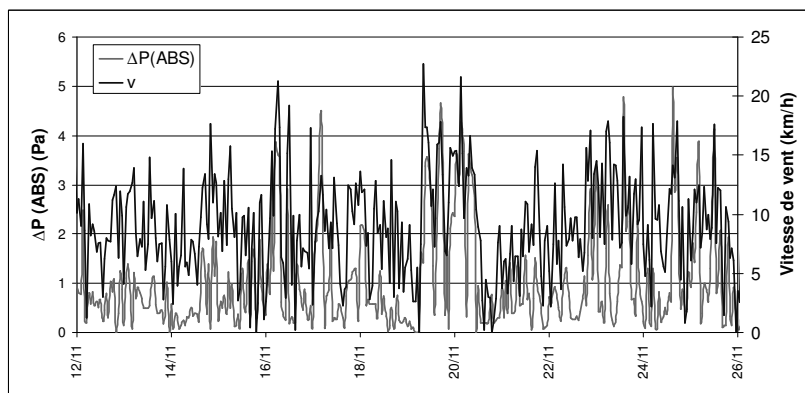


Figure 2.36 : Valeurs absolues des écarts de pression (Pa) et de la vitesse du vent (km/h).

Sur les figures 2.37 et 2.38, on cherche à mettre en évidence l'influence de la vitesse du vent sur la différence de pression entre les deux côtés du mur. La direction du vent joue ici un rôle très important sur les valeurs de différence de pression, Δp est positif lorsque le vent est orienté Ouest, Sud-ouest et négatif lorsque le vent est orienté à l'opposé du mur (Est, Nord-est, Nord).

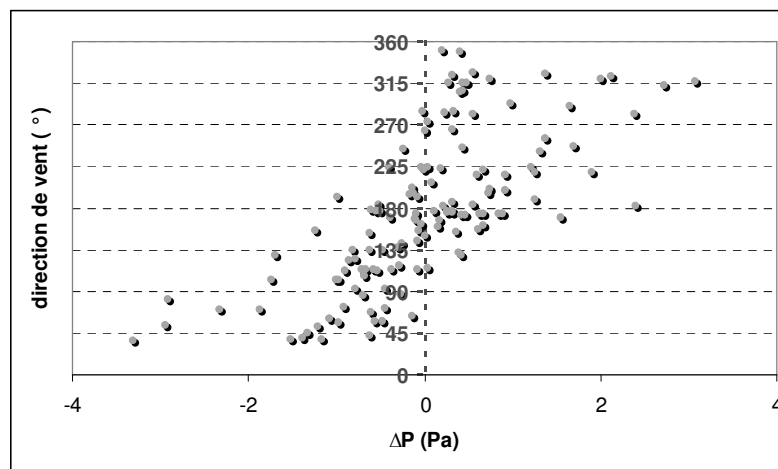


Figure 2.37 : Influence de la direction du vent sur la différence de pression entre les deux côtés du mur.

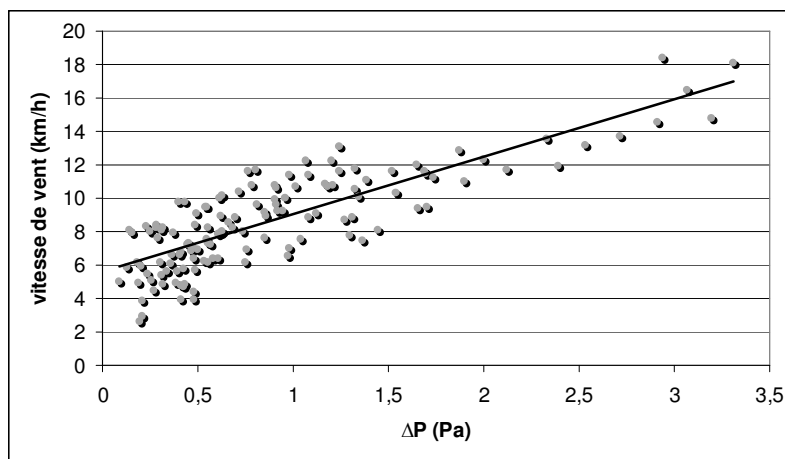


Figure 2.38 : Influence de la direction de vent sur la différence de pression sur les deux côtés du mur

En conclusion, pour étudier la perméabilité dans les maisons en bois massif, nous avons utilisé 2 méthodes de mesure avec 2 remarques principales :

- La méthode du Gaz Traceur permet de trouver le taux de renouvellement d'air N pour des conditions expérimentales proches de l'utilisation normale du bâtiment,
- La méthode de dépression donne des résultats et une valeur globale représentative de l'enveloppe, valeurs comparables aux indications de la réglementation thermique RT2000.

On constate enfin, que la perméabilité de bâtiments en bois massif est liée directement à la vitesse du vent : le taux de renouvellement d'air N trouvé varie de 0,2 jusqu'à 1,2 volume par heure pour une vitesse du vent allant de 0 à 30 km/h. La perméabilité moyenne de paroi « madriers empilés » correspond à la valeur par défaut de la RT2000.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le confort, la qualité d'air et la perméabilité dans deux bâtiments bois massif ayant des usages différents, en l'absence de ventilation mécanique ; le premier bâtiment est une maison d'habitation et l'autre sert de bureaux d'entreprise.

Avant d'exploiter les nombreuses mesures effectuées, puis les traitements et les réflexions qui en découlent, on a pris soin d'analyser les différentes méthodes et outils d'analyse exploitables. Dans ce travail, sont en particulier, utilisés des méthodes adaptées aux bâtiments fonctionnant en ventilation naturelle, donc soumis à de fortes variations hydriques et des risques d'inconfort.

La présente campagne de mesure a permis de tirer des enseignements sur le confort thermique en lien avec l'usage de bâtiment.

En premier lieu, la température et l'humidité relative sont mesurées dans les 2 bâtiments à l'aide de capteurs-enregistreurs autonomes avec une station météo installée à l'extérieur afin de relever les conditions climatiques. Nous avons comparé les résultats des mesures avec la zone de confort de Brager ; le confort thermique pendant la période d'hiver et la période d'été est optimal dans le bâtiment d'habitation B.HA. Par ailleurs, on trouve un taux de surchauffe plus important dans les bureaux avec des valeurs ODH entre 165 et 256°C.h ; ce taux de surchauffe est donc surtout lié à l'usage du bâtiment.

Nous avons comparé ensuite la charge hydrique dans les 2 bâtiments en utilisant une méthode proposée par Kalamees et Vinha (2006). La charge dans le coin nuit est supérieure à celle du coin jour dans le bâtiment d'habitation. Dans le bâtiment de bureaux, cette même charge est supérieure dans la salle de réunion pendant la période froide ($T_{\text{ext}} \leq 5^\circ\text{C}$) à celle des autres bureaux, reste toujours inférieure à celle du bâtiment B.HA.

Nous avons aussi étudié le confort hygrothermique dans les 2 bâtiments suivant la norme ASHRAE 55a-1995 et la norme française NF ISO 7730 citée dans la norme Afnor NF X 35-121. Le taux de confort observé est très satisfaisant dans les 2 bâtiments pendant la période Hiver. Pendant la période d'été, on trouve que la température est très élevée dans les 2 bâtiments, le taux de « sur chauffe » est atteint pour 25% des mesures dans le bâtiment d'habitation et pour 60% dans le bâtiment de Bureaux. Il est à noter aussi que l'humidité relative est plus élevée dans le bâtiment d'habitation : 9% des mesures présentent un taux d'humidité supérieur à 60% dans le coin jour, et 19% dans le coin nuit.

En second lieu, nous avons mesuré la concentration en CO_2 comme indicateur de la qualité d'air intérieur (IAQ) dans les 2 bâtiments ; le taux de CO_2 moyen est de 580 ppm dans le bâtiment d'habitation et de 622 ppm dans le bâtiment de bureaux avec une concentration maximale atteignant jusqu'à 1300 ppm. Les mesures de la concentration en CO_2 dans les bâtiments en bois massif montrent que le taux de CO_2 est lié directement à l'utilisation de bâtiment. Les niveaux de CO_2 dans le bâtiment d'habitation sont très satisfaisants par rapport aux valeurs de référence. Par ailleurs, le niveau de CO_2 dans le bâtiment des bureaux varie directement avec le nombre d'occupant par rapport à l'unité de surface. Un niveau de concentration en CO_2 élevée est souvent relevé dans le petit

bureau ; nous estimons que ces concentrations ponctuelles élevées sont liées directement à l'absence de ventilation mécanique réglable dans les bâtiments.

Ensuite, nous avons utilisé la méthode du gaz traceur pour définir le taux de renouvellement d'air dans les 2 bâtiments et relié cette valeur avec la vitesse et la direction du vent durant les essais. Nous trouvons que le taux de renouvellement d'air moyen est très variable, allant de 0,14 à 0,77 volume par heure dans le B.HA et de 0,38 jusqu'à 1,15 dans le bâtiment de bureaux. Une régression linéaire est calculée entre le taux de renouvellement d'air et la vitesse du vent.

Enfin, nous avons utilisé la méthode de mise en dépression pour mesurer la perméabilité globale du B.HA : la valeur moyenne à 4 Pa (I_4) est égale à 1,32 m³/(h.m²). Cette valeur I_4 est supérieure à la référence utilisée par la RT 2000 et correspond plutôt à la valeur maximum donnée par défaut pour la RT2000⁸.

⁸ Les valeurs de référence de la RT2005 sont les mêmes

Caractérisation thermo physique de parois en bois massif contrecollé

Essais réalisés au laboratoire

1. Introduction	95
2. Caractérisation hygro-thermique de parois bois massif empilé	98
2.1. Matériels et méthodes	98
2.1.1. Isotherme de sorption	98
2.1.2. Masse volumique	100
2.1.3. Effusivité et conductivité thermique	102
2.1.4. Coefficient de diffusion	104
2.2 Résultats et discussions	107
2.2.1. Isotherme de sorption	107
2.2.2. Masse volumique	108
2.2.3. Effusivité et conductivité thermique	109
2.2.4. Coefficient de diffusion	110
3. Quantification et qualification du caractère « perméable » de parois bois massif empilé	112
3.1. Matériels et méthodes	114
3.1.1. Perméamètre TREFLE	116
3.1.2. Préparation des échantillons	118
3.1.3. Effet du contre collage et du joint de feutre sur la perméabilité	118
3.1.4. Effet de l'épaisseur de madrier et du type de joint sur le débit d'air à travers le joint	119
3.2. Résultats et discussions	121
3.2.1. Influence du contre collage et du joint de feutre sur la perméabilité de paroi...	121
3.2.2. Influence du profil et de l'épaisseur de madrier sur le débit d'air à travers le joint	122
3.2.3. Influence de joint entre madrier sur le débit d'air à travers la paroi	122
3.2.4. Etude comparative entre les résultats de perméabilité à l'échelle de laboratoire et à l'échelle de bâtiment.	123
4. Conclusions	125

flux

Bois

Colle

Bois

flux

Joint

flux

Bois

Colle

Bois

Flux

Notation

a	Diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
c	Capacité calorifique	$J.kg^{-1}.°C^{-1}$
d	Diamètre d'échantillon	m
D_e	Diffusivité effective de la vapeur d'eau dans l'espace poreux	$m^2.s^{-1}$
e	Épaisseur de mur	mm
E	Effusivité thermique	$J.m^{-2}.°C^{-1}.s^{-1/2}$
k	Perméabilité	m^2
m	Masse	kg
P	Pression	Pa
P_v	Pression partielle de la vapeur d'eau	Pa
Q	Flux d'air	$m.s^{-1}$
R	Résistance thermique	$m^2.°C.W^{-1}$
S_m	surface spécifique	$m^2.g^{-1}$
T	Température	$°C$
V	Volume	m^3
X_{eq}	Teneur en eau d'équilibre	$kg_{eau}.kg_{ms}^{-1}$
X_m	Teneur en eau de transition à saturation de la monocouche	$kg_{eau}.kg_{ms}^{-1}$
λ	conductivité thermique	$W.m^{-1}.°C^{-1}$
ρ	Densité	$kg.m^{-3}$
φ	humidité relative	$\%$

Indices

ext	Extérieur
int	Intérieur
$//$	Parallèle aux fibres
\perp	Perpendiculaire aux fibres

1. Introduction

Depuis une trentaine d'années, les professionnels de la construction bois se sont regroupés et travaillent ensemble pour développer l'utilisation du bois dans leurs projets de constructions d'habitation, de bâtiments industriels, commerciaux ou autres, que ce soit en structure porteuse ou en habillage.

Les techniques de constructions se sont adaptées aux besoins des architectes, des économistes, des spécialistes en énergie et de l'utilisateur final. Les techniques de construction bois contemporaines sont technologiquement et économiquement fiables. Elles utilisent des matériaux novateurs et performants.

Comme nous l'avons cité dans l'introduction générale, la réglementation thermique française pour les nouveaux bâtiments (RT 2000 et 2005) demande une résistance thermique de mur minimale $R_{mur} = 1,96 \text{ °C.W}^{-1}$. Pour atteindre cette valeur avec un mur en pin massif, on aurait besoin de parois d'épaisseurs supérieures à 24 cm, ce qui est difficilement envisageable d'un point de vue technico-économique. Notons que ce critère qui traduit l'efficacité énergétique en régime permanent est bien adapté à l'évaluation de parois légères que l'on caractérise par un faible amortissement et un faible déphasage des différents flux, mais peut s'avérer tout à fait inadapté à l'évaluation des performances de parois lourdes telles que les parois en bois massif. Nous avons trouvé dans les deux chapitres précédents que le confort thermique et la consommation dans les maisons en bois massif sont mal pris en compte dans les calculs thermiques usuels. On y considère le mur en bois massif comme une paroi solide de bois massif, en utilisant une modèle « simple » qui prend en compte deux valeurs lors du calcul ; l'épaisseur de mur et la conductivité thermique du matériau de construction, il ne tient pas compte de la forme du madrier contrecollé avec une lame de colle, et de l'effet de la présence de joints entre madriers.

A l'initiative de la société Confort Bois et avec le support du laboratoire TREFLE, la technique de construction de Maisons Bois Massif (MBM) c'est-à-dire composées de parois de madriers empilés contrecollés, a fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques au cours des 3 dernières années.

Ces études ont eu pour objectifs principaux de connaître et analyser le comportement thermique et les performances énergétiques de ces habitations en conditions réelles (Raji *et al.* 2004), (Megri, 2005) (Pauly, 2005). En plus, un article proposé par (Raji *et al.* 2006) a été accepté pour la revue de « Building and Environment » sur les comportements hygrothermiques de paroi en bois massif contrecollé avec joint de colle entre madriers.

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les caractéristiques de transferts thermique et hydrique de parois formées de madriers « Bois Massif contre-collé verticalement » avec joint feutrine entre madriers. Nous avons étudié en particulier, l'effet du joint de colle sur les propriétés hydriques du madrier, ainsi que l'effet des joints feutrine entre madriers sur la perméabilité totale du mur.

Nous avons présenté également une étude détaillée sur la perméabilité à l'air des parois ; à l'aide de bancs de mesures, on a pu tester en laboratoire, les parois à différentes échelles et pour différentes configurations de profils, d'épaisseurs et de types de madriers.

Description de mur en bois massif contrecollé verticalement avec joint entre madriers :

Les madriers considérés dans cette étude sont en bois massif contre-collé verticalement avec des joints de feutre entre madriers. Le bois utilisé est le pin Silvestre (*Pinus sylvestris* L.) importé de Finlande. Les joints de feutre sont en polypropylène, de 90 mm de largeur et de 8 mm d'épaisseur. Le profil du mur est représenté sur la figure 3.1.

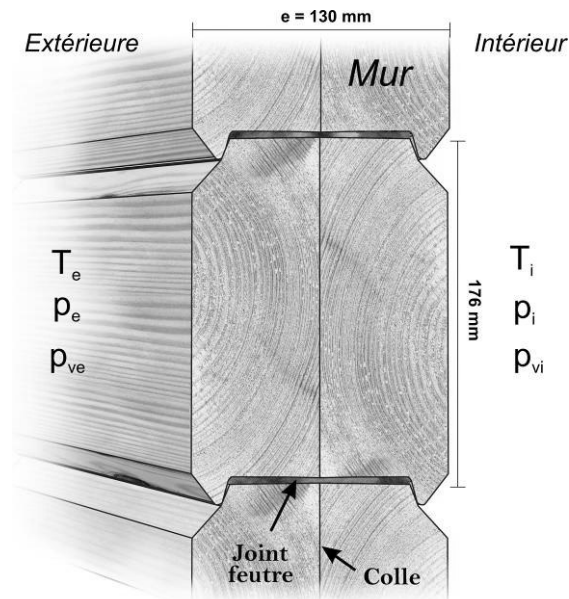


Figure 3.1 : Mur en bois massif contre-collé verticalement avec joint de feutre entre madriers

Les différents flux traversant une telle paroi sont :

- flux de chaleur sous l'effet de la différence $T_e - T_i$, il dépend de la conductivité thermique λ ainsi que de l'épaisseur e de la paroi.
- flux d'air humide sous l'effet de la différence $p_e - p_i$, il dépend de la perméabilité k ainsi que de l'épaisseur e de la paroi.
- flux (diffusif) de vapeur d'eau sous l'effet de la différence $p_{ve} - p_{vi}$, il dépend de la diffusivité massique apparente D_e , de la courbe d'équilibre matériau/eau (isotherme de sorption) ainsi que de l'épaisseur e de la paroi.

Ces trois flux traversent la paroi par deux chemins parallèles en considérant des transferts unidirectionnels (Figure 3.2).

La détermination de ces trois flux (chaleur, air et vapeur d'eau) nécessite de connaître les paramètres (λ , a , e , k , ρ , D_e , isotherme de sorption) de chaque branche (bois-colle-bois et joint de feutre). Plusieurs études ont été réalisées pour caractériser le bois de pin sylvestre sur les plans mécanique, hydrique, thermique ou aéraulique, mais aucun résultat n'a été publié sur les propriétés d'une paroi composite et en particulier sur l'influence d'un contre-collage et d'un joint.

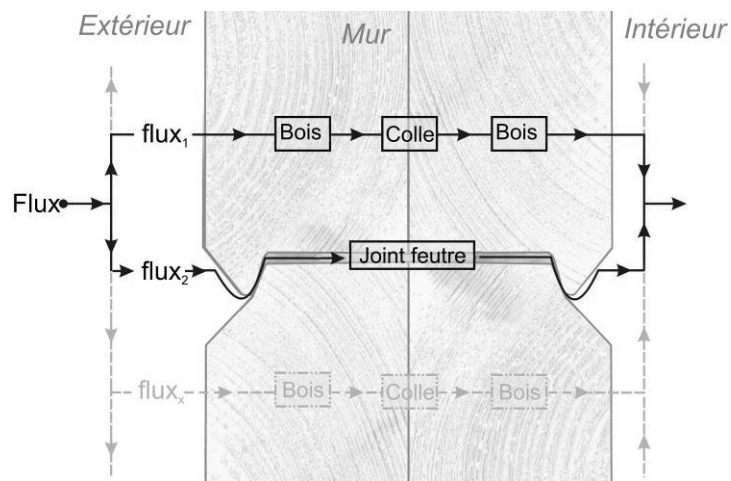


Figure 3.2 : Schématisation des flux traversant la paroi.

Des mesures physiques ont donc été réalisées pour déterminer les valeurs de ces paramètres pour les différents constituants pris séparément puis pour la paroi complète. Les valeurs de ces paramètres sont destinées à être utilisées ultérieurement dans un outil de simulation du comportement dynamique de la paroi, du type de ceux proposés par Battaglia *et al.* (1995) ou Hameury (2005), afin d'évaluer son efficacité énergétique d'une manière beaucoup plus réaliste qu'en considérant simplement la valeur de sa résistance thermique.

2. Caractérisation hygro thermique de parois bois massif empilé

2. 1. Matériels et méthodes

2. 1. 1. Isotherme de sorption

Les courbes de sorption sont obtenues en suivant l'adsorption de l'eau dans un échantillon de bois placé dans une atmosphère à température et humidité relative φ fixe. À la fin du processus, la teneur en eau du bois atteint une valeur traduisant l'équilibre thermodynamique avec l'air ambiant dans laquelle il est placé, et la masse de produit devient stationnaire. L'équilibre hygroscopique pourrait être réalisé par des méthodes dynamiques ou statiques (Ferrasse *et al.*, 2004).

Dans cette étude, la méthode statique des solutions salines saturées telle que décrite par Talla *et al.* (2005) et Bilali *et al.* (2001) a été utilisée pour déterminer les isothermes de sorption.

Les échantillons du bois à tester sont préparés et pesés puis placés dans dix bocaux hermétiques où une solution saline saturée impose une humidité relative constante (Figure 3.3).

L'ensemble est introduit dans une enceinte climatique, on fixe par consigne la température de l'air à l'intérieur de l'enceinte. Les échantillons sont pesés régulièrement tous les 48h jusqu'à atteindre la teneur en eau d'équilibre X_{eq} , on obtient ainsi un point de la courbe d'adsorption grâce à la mesure de la masse finale pour cette condition climatique.

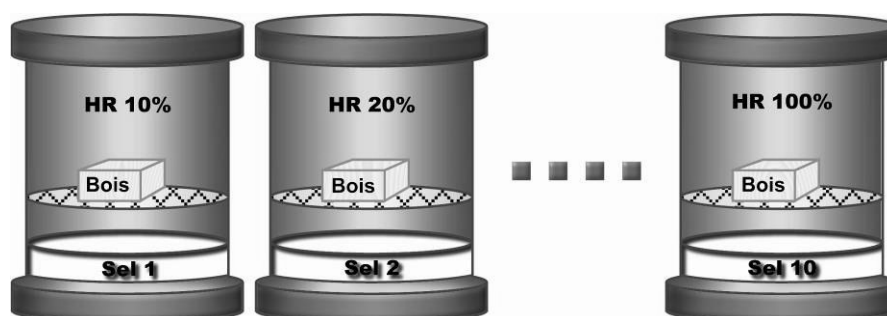


Figure 3.3 : Schéma du dispositif expérimental pour l'essai d'isotherme de sorption.

La courbe déterminant l'isotherme de sorption d'un produit est déterminée avec plusieurs points obtenus dans les conditions expérimentales. Nous faisons varier la température d'un pas de 10°C. On trouvera dans le tableau 3.1 la liste des dix solutions utilisées ainsi que la valeur de l'Humidité Relative de l'air imposée par chacune d'elles aux températures de 20°C, 30°C, 40°C, 50°C et 60°C. Dès que les dix masses deviennent stables, l'expérience est arrêtée et les échantillons sont pesés. Les masses anhydres M_{sec} s'obtiennent après étuvage à 102°C pendant 48h

A partir de cette masse anhydre, on déduit les différentes teneurs en eau à l'équilibre sur base sèche de l'échantillon pour chaque condition fixée préalablement. Cette teneur en eau en base sèche est donnée par l'expression mathématique :

$$X = 100 \left(\frac{m}{m_{\text{sec}}} - 1 \right) = 100 \left[\frac{m}{m_0} (1 + X_0) - 1 \right] \quad (3.1)$$

- où X la teneur en eau de l'échantillon à l'instant t (en % $\text{kg}_{\text{eau}} \cdot (\text{kg}_{\text{msec}})^{-1}$) ;
 X_0 la teneur en eau initiale de l'échantillon (% $\text{kg}_{\text{eau}} \cdot (\text{kg}_{\text{msec}})^{-1}$) ;
 m masse de l'échantillon à l'instant t (en kg) ;
 m_0 masse de l'échantillon à l'instant initial (en kg)
 m_{sec} masse anhydre de l'échantillon (en kg_{msec}).

Tableau 3.1 : Valeurs de l'humidité relative d'équilibre φ (%) de l'air et de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$) du pin nordique pour les dix sels utilisés à différentes températures.

Sel	T = 20 °C		T = 30 °C		T = 40 °C		T = 50 °C		T = 60 °C	
	φ	X_{eq}	φ	X_{eq}	φ	X_{eq}	φ	X_{eq}	φ	X_{eq}
LiBr	6,6	0,0307	6,2	0,0263	5,8	0,0189	5,5	0,0168	5,3	0,0159
LiCl	11,3	0,0410	11,3	0,0389	11,2	0,0332	11,1	0,0283	11,0	0,0258
KCH ₃ CO	23,1	0,0604	21,6	0,0560	20,0	0,0470	19,0	0,0410	18,0	0,0366
MgCl ₂	33,1	0,013	32,4	0,0759	31,6	0,0668	30,5	0,0581	29,3	0,0511
K ₂ CO ₃	43,2	0,0964	43,2	0,0906	42,3	0,0807	45,6	0,0720	45,0	0,0605
NaBr	59,1	0,1142	56,0	0,1073	53,2	0,0918	50,9	0,0772	49,7	0,0686
CuCl ₂	68,4	0,1400	68,6	0,1374	68,0	0,1258	65,5	0,1109	63,3	0,0983
NaCl	75,5	0,1548	75,1	0,1525	74,7	0,1426	74,4	0,1314	74,5	0,1186
KCl	85,1	0,1749	83,6	0,1735	82,3	0,1614	81,2	0,1465	80,3	0,1300
K ₂ SO ₄	97,6	0,2700	97,0	0,2644	96,4	0,2546	95,8	0,2423	95,7	0,2298

Le modèle de GAB a été utilisé pour modéliser les isothermes de sorption. Il présente en effet l'avantage de décrire de manière satisfaisante les isothermes de sorption pour des valeurs de φ inférieures à 90% comme indiqué par (Bizot *et al.* 1987). Ce modèle s'écrit :

$$X_{\text{eq}} = \frac{X_m C K \varphi}{(1 - K \varphi) (1 + C K \varphi - K \varphi)} \quad (3.2)$$

- Avec X_{eq} Teneur en eau d'équilibre ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$)
 X_m, C et K Constantes liées aux caractéristiques du produit et à la température
 φ Humidité relative de l'air

Les trois constantes X_m , C et K dépendent des caractéristiques du produit et de la température. Elles sont déterminées par minimisation de la somme des écarts quadratiques entre les courbes expérimentales et théoriques.

La détermination de la teneur en eau à saturation de la monocouche X_m permet de calculer la surface de la monocouche en supposant que celle-ci est recouverte de molécules d'eau alignées. D'après Talla *et al* (2005) dans le cas de l'eau cette surface peut se calculer par :

$$S_m = 3516 X_m \quad (3.3)$$

Avec S_m Surface spécifique ($m^2 \cdot g^{-1}$)

X_m Teneur en eau de transition à saturation de la monocouche ($kg_{eau} \cdot kg_{ms}^{-1}$)

2.1.2. Masse volumique

La connaissance de la masse volumique des bois est utile non seulement parce qu'elle permet de déterminer le poids d'une construction en ce matériau, mais parce qu'elle renseigne déjà sur d'autres propriétés fondamentales, notamment sur la dureté et la résistance à la compression (Nepveu, 1994).

La densité du bois est habituellement exprimée de l'une des manières suivantes : verte (avec le même contenu d'humidité que dans l'arbre vivant), sèche au four (après chauffage dans un four à 103°C jusqu'à ce que la masse constante soit réalisée), ou sèche à l'air (à l'équilibre dans conditions ambiantes ou d'autres conditions indiquées) (Skaar, 1972).

Il s'agit d'établir une relation liant la masse volumique du pin nordique à sa teneur en eau. Nous avons vérifié que la loi d'additivité des volumes présentée par Desmorieux *et al*, (1992) permettait de représenter avec une précision suffisante cette masse volumique. Cette loi repose sur les deux hypothèses suivantes :

- Le produit est constitué d'une structure solide de densité ρ_{sec} et de volume V_{sec} , les pores de volume V_{eau} sont remplis d'eau de masse volumique ρ_{eau} .
- La variation du volume correspondant à une variation de masse est égale au volume de la masse d'eau évaporée.

Considérant ces hypothèses et en appelant m la masse du produit, m_{eau} la masse d'eau et m_{sec} la masse solide contenue dans le produit, on peut écrire :

$$m = m_{eau} + m_{sec} ; V = V_{eau} + V_{sec} \quad (3.4)$$

$$\text{et également : } \rho = \frac{m}{V} \quad \text{et} \quad X = \frac{m_{eau}}{m_{sec}} \quad (3.5)$$

Ces équations nous permettent d'écrire :

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{sec}}} = \frac{\rho_{\text{eau}} (1 + X)}{\rho_{\text{eau}} + X \rho_{\text{sec}}} \quad (3.6)$$

et

$$\frac{V}{V_{\text{sec}}} = 1 + \frac{\rho_{\text{sec}}}{\rho_{\text{eau}}} X \quad (3.7)$$

La méthode du volumétre à mercure décrite par Talla *et al.* (2003) a été utilisée pour estimer la masse volumique humide ρ_{humide} et la masse volumique sèche ρ_{sec} à 20 °C (Figure 3.4).

La volumétre à mercure est un système basé sur les propriétés du mercure (fluidité et forte densité), il permet de mesurer le volume de l'échantillon testé.

Il est composé ; d'un réservoir cylindrique de 50 mm de diamètre sur 127 mm de profondeur et qui permet la charge et la décharge en fluide du dispositif de mesure ; un réservoir également cylindrique de dimensions identiques couvert d'une sorte d'entonnoir marqué, sur sa partie constituée de faible diamètre, d'un index de lecture du niveau de mercure. Ce réservoir qui contient l'éprouvette est également doté d'un piston interne qui permet de gérer le mouvement vertical du mercure. L'action du piston est commandée par une bague cylindrique à mouvement circulaire positionnée à la base du réservoir ; un tuyau flexible équipé d'une vanne et reliant les deux réservoirs ; un cadran gradué permettant la lecture directe du volume de l'échantillon testé ; et quelques accessoires utilisés au cours de la manipulation.

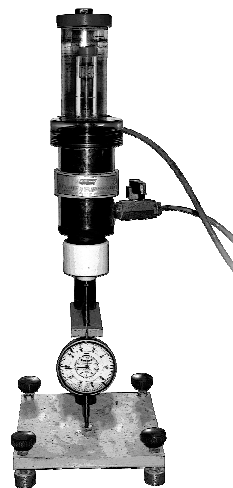


Figure 3.4 : volumétre à mercure utilisé pour estimer la masse volumique

Vingt échantillons de pin nordique de taille 2 x 1 x 0.5 cm³ ont été amenés à des teneurs en eau contrôlées en les plaçant dans des atmosphères dont l'humidité relative a été fixée par des solutions salines saturées identiques à celles utilisées pour l'étude de la sorption. L'humidité relative de l'air a ainsi varié entre 6,6 et 97,6% et la teneur en eau du pin entre 0,031 et 0,27 kg_{eau}.kg_{ms}⁻¹.

Pour chaque échantillon, la masse humide M_{humide} et le volume humide V_{humide} ont été mesurés pour en déduire la masse volumique humide ρ_{humide} . La masse volumique sèche ρ_{sec} a été calculée pour chaque échantillon.

2. 1. 3. Effusivité et conductivité thermique

La conductivité thermique est l'un des paramètres les plus importants pour la modélisation du transfert thermique du bois. La surface de madrier en bois la plus exposée aux conditions extérieures est la surface perpendiculaire aux fibres dans la structure en bois, Ceci fait que la conductivité thermique dans la direction perpendiculaire aux fibres est la plus importante lors de l'étude des propriétés thermiques des madriers (Henrik *et al.* 2002).

Plusieurs résultats de mesure, particulièrement sur des conductivités de bois sec et humide, peuvent être trouvés dans la littérature. Par exemple, le travail de MacLean, (1941) sur la conductivité thermique de différents types de bois dans la direction perpendiculaire aux fibres. On trouve également des mesures sur la conductivité thermique dans la direction des fibres comme, par exemple, l'étude de Grønli (1996). Différentes méthodes peuvent être utilisées pour mesurer les propriétés thermiques des matériaux. Le plan chaud, le fil chaud, la méthode flash, etc. (Gobbé *et al.* 2004).

Dans cette étude, les propriétés thermiques du pin nordique ont été estimées dans la direction des fibres et dans la direction perpendiculaire sur des échantillons (10 échantillons pour chaque direction) dont la teneur en eau variait entre 0,037 et 0,256 $\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$.

L'effusivité E_{\perp} et la conductivité thermique λ_{\perp} dans le sens perpendiculaire aux fibres ont été mesurées par la méthode du ruban chaud avec mesure de température au centre décrite par Jannot et Meukam (2004). La méthode proposée consiste à utiliser une simple résistance électrique de forme rectangulaire sur laquelle est disposée un thermocouple constitué de fils de faible diamètre. La mesure de température est effectuée au centre de la résistance ce qui évite d'avoir à prendre en compte les déperditions thermiques par les fils électriques à une extrémité de la résistance. La résistance est insérée entre deux échantillons de surface plane du matériau à caractériser, les dimensions de l'échantillon sont telles que la perturbation provoquée par l'échelon de flux imposé à la sonde n'atteigne aucune de ses faces pendant la durée de la mesure (hypothèse du milieu semi-infini). Le rapport longueur/largeur de la résistance est choisi de manière à ce que le transfert de chaleur au centre de la résistance puisse être considéré bidirectionnel pendant un temps inférieur à 180s.

L'idée est d'utiliser le thermogramme correspondant au début du chauffage pendant le temps où le transfert de chaleur au centre de la sonde reste unidirectionnel pour estimer l'effusivité thermique par un modèle de type plan chaud (Figure 3.5). Une modélisation complète des transferts bidirectionnels dans les échantillons, associée à une méthode d'estimation de paramètres, permettra d'utiliser le thermogramme complet pour estimer la conductivité thermique.

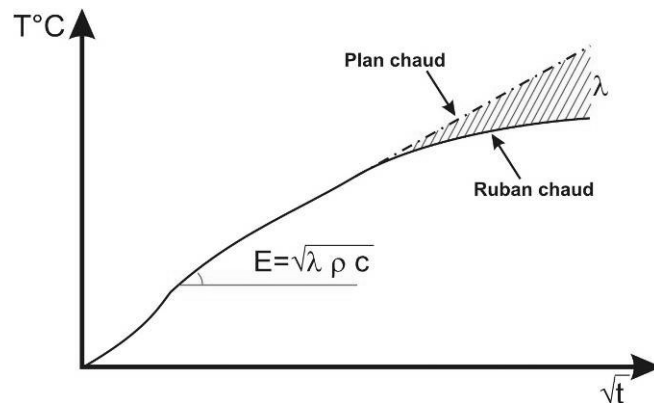


Figure 3.5 : thermogramme simulés pour la méthode de plan chaud et ruban chaud (Jannot et al, 2004)

Les avantages attendus de cette méthode sont un coût très faible de la sonde et une méthode d'estimation basée sur une modélisation relativement simple de la température au centre de sonde :

- unidirectionnelle pendant le temps t_1 pour l'estimation de l'effusivité (méthode du plan chaud)
- bidirectionnelle entre les temps t_1 et t_2 pour l'estimation de la conductivité.

Cette étude a été réalisée à l'aide d'une résistance électrique plane MINKO HK913P de valeur $40,5 \Omega$ et de surface chauffante $3,3 \times 1,2 \text{ cm}^2$. Un thermocouple de type T constitué de fils de diamètre $0,02 \text{ mm}$ a été fixé sur une face de la résistance (Figure 3.6).

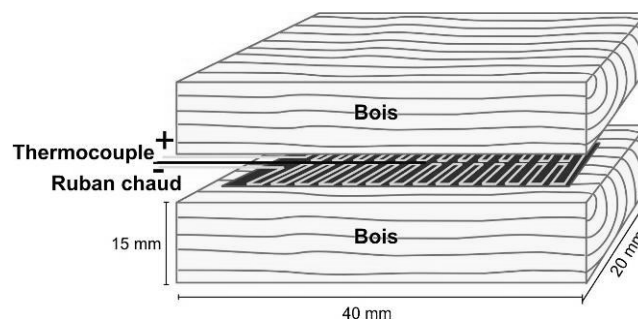


Figure 3.6 : Schéma du montage de la méthode du ruban chaud (mesure dans le sens perpendiculaire aux fibres).

Un échelon de flux a été appliqué à la résistance placée entre deux échantillons de bois et la température du thermocouple a été enregistrée pendant 120s avec un pas de temps de 0,1s et une résolution de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Trois mesures ont été réalisées sur chaque échantillon. L'effusivité thermique est estimée entre 0 et 20s par minimisation de l'écart quadratique entre la courbe expérimentale et la courbe calculée par un modèle 1D de type plan chaud. La conductivité thermique λ est estimée entre 20 et 120s par minimisation de l'écart quadratique entre la courbe expérimentale et la courbe calculée par un modèle 2D.

L'effusivité thermique $E_{//}$ dans le sens parallèle aux fibres a été estimée par la méthode du ruban chaud décrite entre autres par Zhang et Degiovanni (1993). Une résistance électrique plane MINKO HK913P de valeur $156,2 \Omega$ et de surface chauffante $4,0 \times 4,0 \text{ cm}^2$ a été utilisée (Figure 3.7).

Un échelon de flux a été appliqué à la résistance placée entre deux échantillons de bois et la température du thermocouple a été enregistrée pendant 30s avec un pas de temps de 0,1s et une résolution de 0,1°C. L'effusivité thermique est estimée entre 0 et 30s par minimisation de l'écart quadratique entre la courbe expérimentale et la courbe calculée par un modèle 1D de type plan chaud.

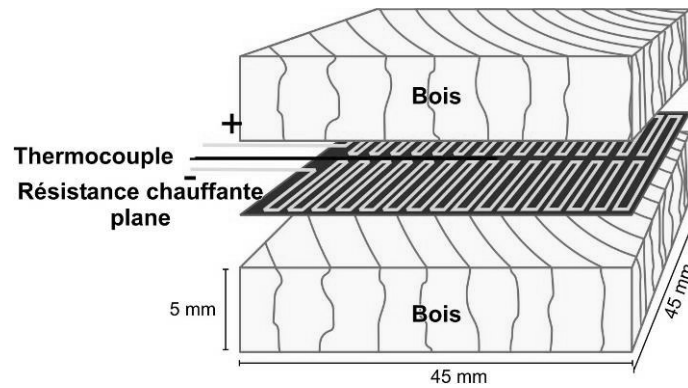


Figure 3.7 : Schéma du montage de la méthode du plan chaud (mesure dans le sens des fibres).

Les valeurs de la conductivité thermique $\lambda_{//}$ dans le sens des fibres ont été calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$\lambda_{//} = \lambda_{\perp} \left(\frac{E_{//}}{E_{\perp}} \right)^2 \quad (3.8)$$

$$\text{Où : } E_{\perp} = \sqrt{\lambda_{\perp} \rho_c} \quad \text{et} \quad E_{//} = \sqrt{\lambda_{//} \rho_c}$$

2. 1. 4. Coefficient de diffusion

Le phénomène de diffusion d'humidité dans le régime isotherme a été étudié et expliqué intensivement. Plusieurs méthodes de mesure de diffusion sont proposées pour prévoir la diffusion d'humidité par les matériaux poreux (Alvarez, 1998), (Agoua *et al.* 2000).

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode gravimétrique statique décrite par exemple par Choong (1965), Hernandez (1991) et Talla (2003). Trois couples de solutions salines ont été choisis et utilisés pour chaque type de bois (massif et contre-collé). Les couples suivants ont été formés : (MgCl_2 ; K_2SO_4), (NaBr ; K_2SO_4), (NaCl ; K_2SO_4), cf. tableau 3.1 pour les valeurs des humidités relatives imposées par chaque solution. Pour un couple donné, la première solution est préparée dans un petit récipient cylindrique et la deuxième dans un récipient cylindrique de diamètre supérieur.

Six échantillons de bois ont été préparés sous forme de cylindre, trois sont massifs et les autres sont du bois contre-collé. Le diamètre d'échantillon est de 55mm et l'épaisseur est de 25 mm environ. Les échantillons sont mesurés, pesés et fixés au moyen d'une colle étanche à l'intérieur des petits récipients. Ces ensembles petits récipients + solution saline saturée + échantillon sont alors pesés et déposés dans les récipients de plus grand diamètre contenant la solution de K_2SO_4 . Ces derniers sont placés dans une étuve à température maintenue à 30°C (Figure 3.8).

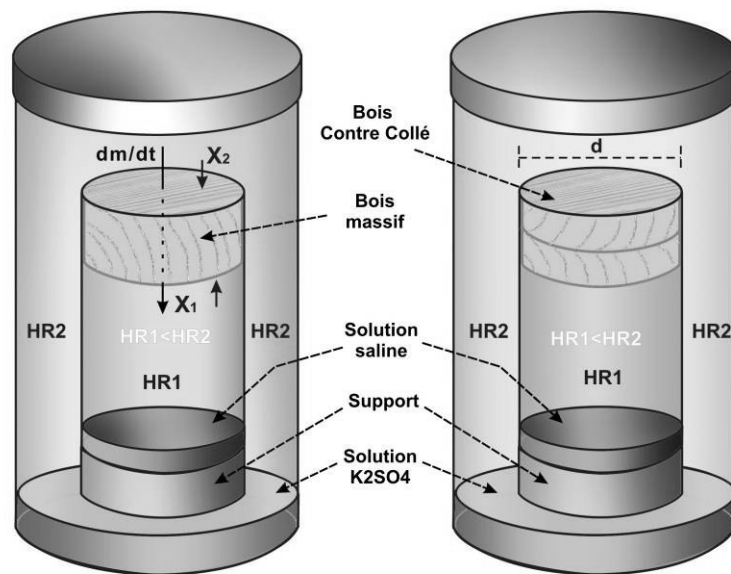


Figure 3.8 : Schéma du montage pour la méthode gravimétrique

Les masses des petits récipients sont relevées au cours du temps jusqu'à ce que la variation de masse devienne constante. La diffusion apparente est calculée par l'équation :

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = -D_e \nabla C \quad (3.9)$$

Enfin, les échantillons sont découpés horizontalement en tranches fines (50 microns environ) à l'aide d'un microtome. Les tranches sont pesées, séchées à la température de 100°C pendant 48 heures et repesées. La teneur en eau est calculée pour chaque tranche (figure 3.9).



Figure 3.9 : découpages de l'échantillon en tranches fines horizontales (50 microns environ) à l'aide d'un microtome

Le coefficient de diffusion apparente D_e peut être déduit de la loi de Fick qui stipule que le flux massique par unité de surface est proportionnel au gradient de concentration. Si l'on fait l'hypothèse que le coefficient D_e est indépendant de la teneur en eau, il peut s'écrire (Talla *et al* 2003) :

$$D_e = \frac{1 + X_f}{X_1 - X_2} \frac{1}{m_0} \left(\frac{dm}{dt} \right) \left(\frac{4V_0}{\pi d^2} \right)^2 \quad (3.10)$$

- Avec
- D_e : Coefficient de diffusion (m^2s^{-1}).
 - dm/dt : flux de masse par unité de temps ($kg \cdot m^2s^{-1}$).
 - V_0 : Volume d'échantillon (m^3)
 - d : diamètre d'échantillon (m)
 - X_f : teneur en eau moyenne en l'état d'équilibre
 - X_1, X_2 : teneur en eau pour les surfaces d'échange (kg eau/kg masse sèche)
 - M_0 : masse sèche d'échantillon

2. 2. Résultats et discussions

2. 2. 1. Isotherme de sorption

L'isotherme de sorption est la courbe qui représente l'évolution de la teneur en eau d'équilibre de produit X_{eq} en fonction de l'humidité relative ϕ de l'air entourant le produit. Les isothermes de sorption obtenues expérimentalement pour le pin nordique à 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C et 60 °C sont représentées sur la figure 3.10.

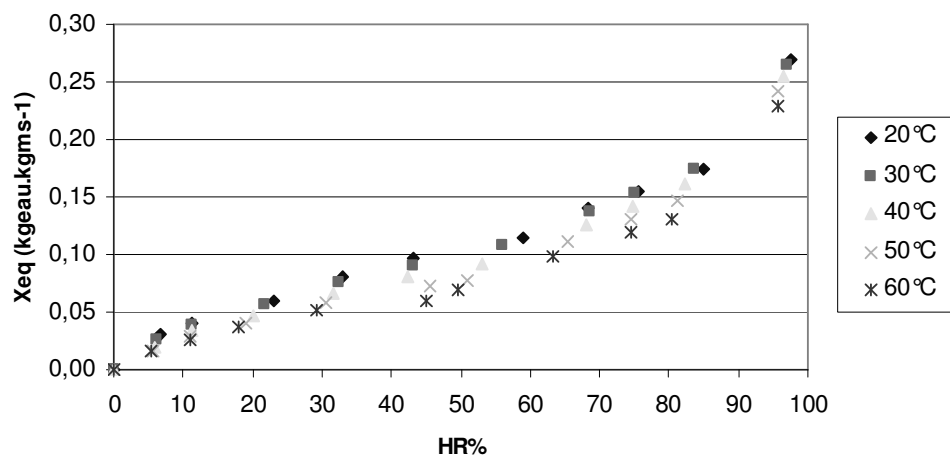


Figure 3.10 : Teneur en eau d'équilibre du pin nordique à différentes températures.

Les valeurs estimées des trois constantes X_m , C et K ainsi que de la surface spécifique S_m calculées par la relation (3.2) sont reportées dans le tableau 3.2. On remarque une diminution continue de la surface spécifique avec l'augmentation de la température, ce qui pourrait être expliqué par la fermeture de certains pores du fait de la dilatation de la matrice solide.

Tableau 3.2 : Constantes X_m , C et K du modèle de GAB et surface spécifique S_m calculées pour différentes températures.

	T (°C)				
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
C	12,60	11,08	8,40	8,84	10,23
X_m ($kg_{eau}.kg_{ms}^{-1}$)	0,072	0,070	0,066	0,055	0,047
K	0,747	0,758	0,770	0,808	0,832
S_m ($m^2.kg^{-1}$)	254,3	247,8	233,0	195,6	166,8

La figure 3.11 représente à titre d'exemple les points expérimentaux et la courbe calculée par le modèle de GAB pour le pin nordique à 20 °C. L'écart-type entre les points expérimentaux et les points simulés par le modèle de GAB est inférieur à 0,73%. Ce résultat montre que les isothermes de

sorption du bois de pin nordique sont bien décrites par le modèle de GAB. On retiendra que la teneur en eau du pin varie assez fortement avec l'humidité relative de l'air ambiant.

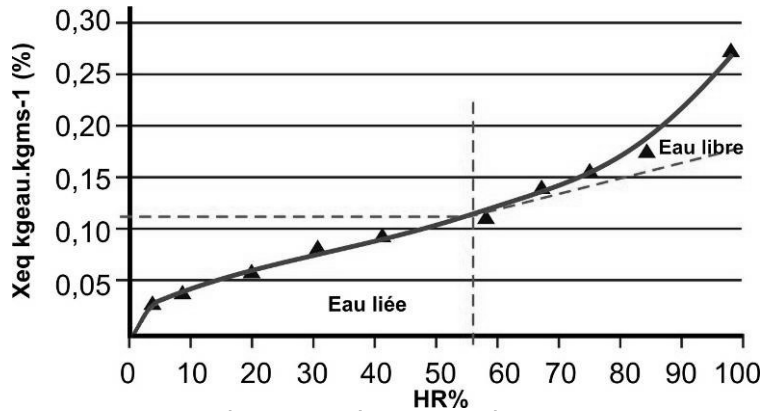


Figure 3.11 : Isotherme de sorption à 20°C simulée par le modèle de GAB (—) et points expérimentaux (▲).

2. 2. 2. Masse volumique

La dispersion importante des valeurs de la masse volumique sèche ρ_{sec} (cf. tableau 3.3) mesurée sur 20 échantillons différents montre l'hétérogénéité du bois de pin utilisé dans cette étude car tous les échantillons utilisés sont issus de la même pièce de bois.

Tableau 3.3 : Masse volumique mesurée et calculée pour les 20 échantillons.

X	ρ	ρ_{sec}	$\rho_{calculé}$	Ecart (%)	X	ρ	ρ_{sec}	$\rho_{calculé}$	Ecart (%)
$kg_{eau}.kg_{ms}^{-1}$	$kg.m^{-3}$	$kg.m^{-3}$	$kg.m^{-3}$	%	$kg_{eau}.kg_{ms}^{-1}$	$kg.m^{-3}$	$kg.m^{-3}$	$kg.m^{-3}$	%
0.038	421	410	399	5.3	0.038	374	364	399	6.6
0.040	406	397	399	1.6	0.041	406	396	400	1.6
0.062	405	390	404	0.1	0.063	413	398	405	2.0
0.079	398	379	408	2.6	0.080	405	387	409	0.9
0.100	401	374	413	3.0	0.095	386	364	412	6.7
0.109	437	408	415	5.1	0.111	418	390	415	0.7
0.127	441	415	419	5.0	0.127	434	407	419	3.5
0.143	424	394	422	0.4	0.143	415	383	422	1.7
0.168	412	384	427	3.7	0.168	431	401	428	0.8
0.255	427	380	445	4.2	0.255	434	387	445	2.6

On constate que l'écart-type de la différence entre les valeurs mesurées ρ et calculées $\rho_{calculé}$ est de 2,0 % avec un écart maximal de 6,6 % ce qui est tout à fait acceptable. En conclusion, le modèle d'additivité des volumes peut être retenu pour le pin nordique et la masse volumique et le volume humide sont calculables avec une bonne précision par les relations (5) et (6) en retenant la valeur $\rho_{sec} = 390 kg.m^{-3}$.

2. 2. 3. Effusivité et conductivité thermique

Les résultats obtenus avec le ruban chaud dans la direction perpendiculaire aux fibres du bois sont représentés sur les figures 3.12 et 3.13. Les valeurs expérimentales de l'effusivité thermique $E_{//}$ ainsi que les valeurs calculées de la conductivité thermique $\lambda_{//}$ dans le sens des fibres sont également représentées sur les mêmes figures.

La dispersion des points expérimentaux représentés sur ces figures s'explique par le fait que les mesures ont été réalisées sur des échantillons différents présentant des variations de masse volumique sèche non négligeables (entre 364 et 415 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) bien que provenant de la même pièce de bois.

On peut remarquer sur les figures 3.12 et 3.13 qu'au faible teneur en eau ($X < 0,012 \text{ kg}_{\text{eau}}\cdot\text{kg}_{\text{m.s.}}^{-1}$) les valeurs de l'effusivité et de la conductivité thermique dans le sens des fibres sont nettement supérieures aux valeurs dans le sens perpendiculaire aux fibres : $E_{//} > E_{\perp}$ et $\lambda_{//} > \lambda_{\perp}$. Ceci s'explique par le fait que la conduction est essentiellement assurée par les fibres en l'absence d'eau libre. Par contre pour $X > 0,012 \text{ kg}_{\text{eau}}\cdot\text{kg}_{\text{m.s.}}^{-1}$, on constate que $E_{\perp} \approx E_{//}$ et $\lambda_{\perp} \approx \lambda_{//}$ car la conduction est alors principalement assurée par l'eau libre présente dans le matériau. Ce résultat est conforme à l'isotherme de sorption obtenue à 20°C représentée sur la figure 3.11 qui fait apparaître le début de la présence de l'eau libre à un teneur en eau proche de 0,012 $\text{kg}_{\text{eau}}\cdot\text{kg}_{\text{m.s.}}^{-1}$.

En conclusion, on peut retenir la dépendance forte des propriétés thermiques du pin vis à vis de sa teneur en eau. Il sera donc difficile de ne considérer qu'une valeur moyenne de cette conductivité dans la simulation de parois soumises à des variations d'humidité. La présence d'un joint de colle n'influence pas les transferts thermiques car sa conductivité thermique est supérieure à celle du pin. Le flux de chaleur qui traverse la paroi à travers le joint en feutre peut être négligé du fait de sa faible épaisseur et de sa faible conductivité thermique mesurée à 0,06 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ par la méthode du ruban chaud.

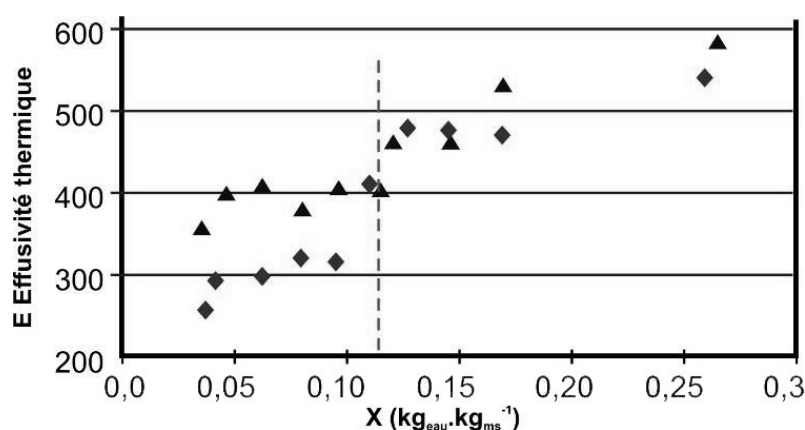


Figure 3.12 : Effusivité thermique $E_{//}$ ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$) dans le sens des fibres (▲) et E_{\perp} dans le sens perpendiculaire aux fibres (◆) par rapport à la teneur en eau X pour les 10 échantillons.

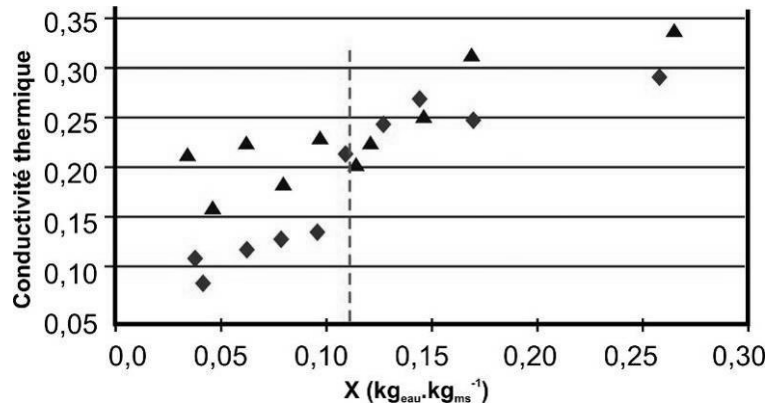


Figure 3.13 : Conductivité thermique $\lambda//$ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) dans le sens des fibres (▲) et λ_{\perp} dans le sens perpendiculaire aux fibres (◆) par rapport à la teneur en eau X pour les 10 échantillons.

2. 2. 4. Coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans le pin a été mesuré par la méthode gravimétrique. A titre d'exemple, les valeurs mesurées des masses des ensembles (petit récipient + échantillon + solution saline saturée) pour les échantillons en bois massif sont présentées sur la figure 3.14. On constate bien une variation linéaire de la masse et on évalue la pente dm/dt de ces courbes par régression linéaire. L'application de la relation (3.10) nous conduit aux valeurs du coefficient de diffusion D_e consignées dans le tableau 3.4.

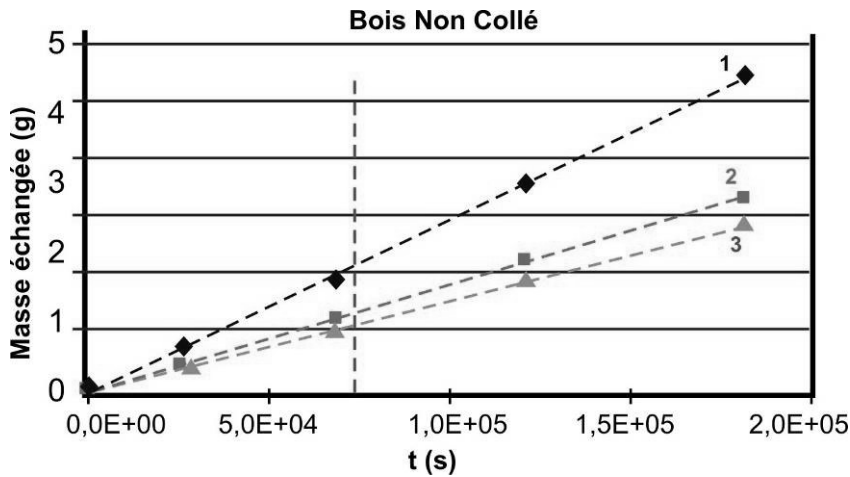
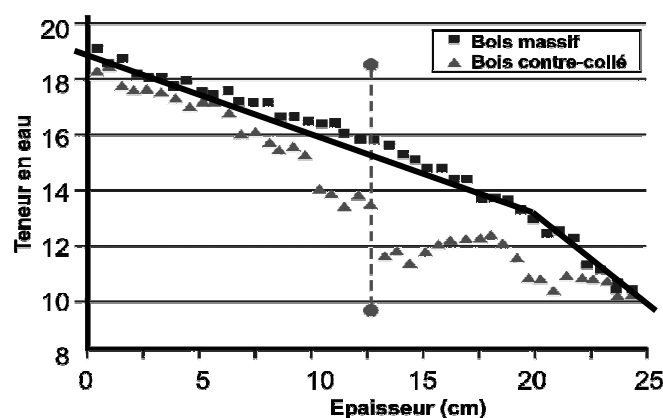


Figure 3.14 : Flux de masse par unité de temps dm/dt ($kg.m^2.s^{-1}$) pour les bois non collés.

Tableau 3.4 : Coefficient de diffusion du bois à 30°C.

E	Couple	Bois Collé	X_1 kg _{eau} .kg _{m.s.} ⁻¹	X_2 kg _{eau} .kg _{m.s.} ⁻¹	X_f kg _{eau} .kg _{m.s.} ⁻¹	m_0 (g)	dm/dt kg.s ⁻¹	v_0 (m ³)	d (m)	D_e m ² .s ⁻¹
1	MgCl2/ K2SO4	Non	0,10	0,186	0,152	34,88	2,54E-05	6,54E-05	5,89E-02	5,37E-09
2	NaBr/ K2SO4	Non	0,11	0,186	0,156	32,24	1,55E-05	6,93E-05	5,83E-02	4,89E-09
3	NaCl/ K2SO4	Non	0,13	0,186	0,164	33,20	1,32E-05	6,61E-05	5,85E-02	4,98E-09
4	MgCl2/ K2SO4	Oui	0,10	0,186	0,135	40,00	1,16E-05	6,96E-05	5,83E-02	2,53E-09
5	NaBr/ K2SO4	Oui	0,11	0,186	0,143	34,86	1,21E-05	6,86E-05	5,83E-02	3,45E-09
6	NaCl/ K2SO4	Oui	0,13	0,186	0,148	38,95	1,23E-05	6,96E-05	5,75E-02	4,70E-09

Le coefficient de diffusion moyen du bois massif est de $5,11.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, par contre on trouve que le coefficient de diffusion pour le bois contre-collé est lié à la valeur de la teneur en eau du bois. La figure 3.15 montre la variation de la teneur en eau dans le bois massif et dans le bois contre-collé avec le même couple de solutions salines. Dans le cas du bois massif on constate que ce profil peut en première approximation être considéré linéaire. Une analyse plus fine montre qu'en fait il n'est pas complètement linéaire mais laisse plutôt apparaître un changement de pente à une teneur en eau correspondant logiquement à l'apparition d'eau libre soit $0,012 \text{ kg}_{\text{eau}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$. Par contre dans le cas du bois contre-collé, le profil est quasi linéaire du côté du bois en contact avec l'humidité relative la plus élevée mais on observe une chute de la teneur en eau au niveau du joint de colle mettant en évidence une résistance à la diffusion à cet endroit. La présence d'un joint de colle réduit donc la diffusion de la vapeur d'eau à travers la paroi.

Figure 3.15 : Profil de teneur en eau ($\text{kg}_{\text{eau}}.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$) dans un bois massif et dans un bois contre-collé

3. Quantification et qualification du caractère « perméable » de parois bois massif empilé

Avant propos

Les expérimentations réalisées en laboratoire visent à quantifier, pour chaque combinaison de paroi en bois massif contrecollé, le taux de renouvellement d'air d'un mètre carré de mur bois massif, via la variation de différentes caractéristiques :

- Section du madrier, épaisseurs et hauteur variables,
- Type de joint de feutre, isopropylène, cellulose ou compribandé,
- Conditions extérieures variables, différence de pression, températures, humidité.

Le but est ensuite de pouvoir intégrer ces données, pour l'optimisation du comportement énergétique et des paramètres de confort dans de futures constructions en bois massif.

De manière plus concrète, il est ici utile de reprendre les 3 questions telles que formulées par les constructeurs :

1. Peut-on considérer qu'un mur en BM est suffisamment « perméable » et « respirant » pour éviter d'installer un système de Ventilation Mécanique ?
2. Peut-on modéliser ces qualités et les calculer d'une manière scientifique simple et précise pour être acceptée, à terme, dans les critères de Réglementation Thermique ?
3. Est-il possible de quantifier et de qualifier dans quelles conditions fonctionne la ventilation naturelle de ces maisons ?

Rappels sur le caractère « respirant » et « perméable » des maisons bois massif

L'objectif premier d'un bâtiment est de permettre de maîtriser les pertes énergétiques en période de chauffage ou de climatisation, et donc d'atténuer les variations de températures extérieures responsables des consommations de chauffage ou de climatisation selon la saison.

Pour y répondre, la solution la plus courante mise en œuvre consiste à apporter une couche d'isolation sur le côté intérieur ou extérieure de la structure mécanique du bâtiment ; la fonction de cette ensemble isolant+parement étant d'isoler, de réduire les transferts hydriques et aérauliques à travers l'enveloppe.

Cependant, un souci d'économie d'énergie et d'amélioration des conditions de confort a conduit à proposer des solutions dites écologiques visant à introduire ou réintroduire des solutions permettant de maîtriser l'ensemble de ces flux afin d'améliorer la qualité intérieure des ambiances, en réduisant les pertes de chaleur en hiver, les risques de condensation intérieure, la pollution de l'air et le réchauffement en été.

Si l'on s'en tient à une simple comparaison entre une paroi dite « étanche » et une paroi dite « respirante », on peut établir le tableau suivant :

PAROI « ETANCHE »	PAROI « RESPIRANTE »
Imperméable à l'air	Permet des échanges gazeux (air, vapeur,...)
Aucune régulation hygro-thermique	Régulation naturelle de l'humidité ambiante, absorbe et restitue suivant les conditions
Impose un système de Ventilation Mécanique Contrôlée	Ventilation naturelle à travers les parois, Permet de réduire l'usage de Ventilation Mécanique
Stockage et stagnation possible de composés gazeux (radon)	Evacuation naturelle à travers les matériaux poreux des composants gazeux

3. 1. Matériels et méthodes

Les madriers considérés dans cette étude sont en bois massif contre-collé verticalement avec des joints entre madriers. Les deux profils de madrier étudiés sont représentés sur la figure 3.16, on les dénomme dans cette étude profil H et profil F.

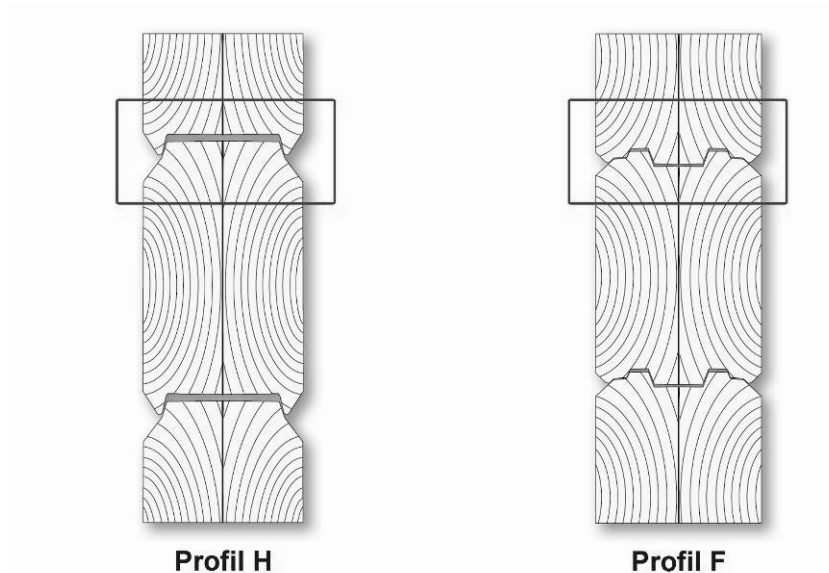


Figure 3.16 : les deux profils de madriers

Selon le profil de madrier, trois types de joint sont utilisés :

1. Joint de feutre isopropylène, largeur 75 mm, et épaisseur 5 mm. (Figure 3.17-a).
2. Joint de feutre cellulose, largeur 50 mm. et épaisseur 1 mm, (Figure 3.17-b).
3. Joint de mousse (compriband) autocollant largeur 8 mm, et épaisseur 3 mm. (Figure 3.17-c).

Les joints d'isopropylène sont utilisés entre des madriers de profil H, les deux autres types de joint sont utilisés entre des madriers de profil F.

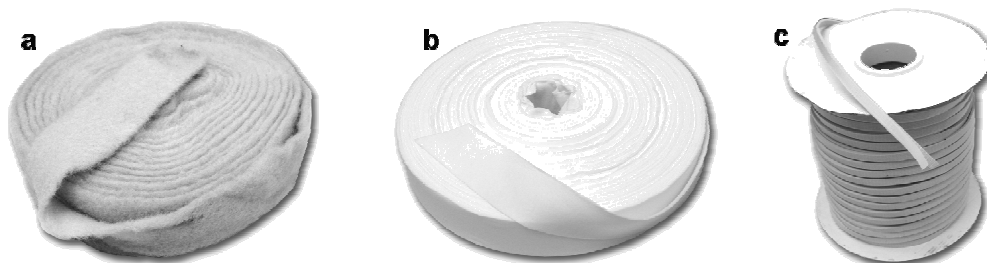


Figure 3.17 : joint entre madriers formé selon les cas par a) un joint de feutre isopropylène. b) un joint de cellulose ou c) un joint de mousse (compriband) autocollant.

Le flux d'air traversant de telles parois sous l'effet de la différence $p_e - p_i$, dépend de la perméabilité (k), de l'épaisseur (e) de la paroi ainsi que des caractéristiques des joints entre madriers.

Ce flux traverse la paroi par deux chemins parallèles en considérant les transferts unidirectionnels (Figure 3.18).

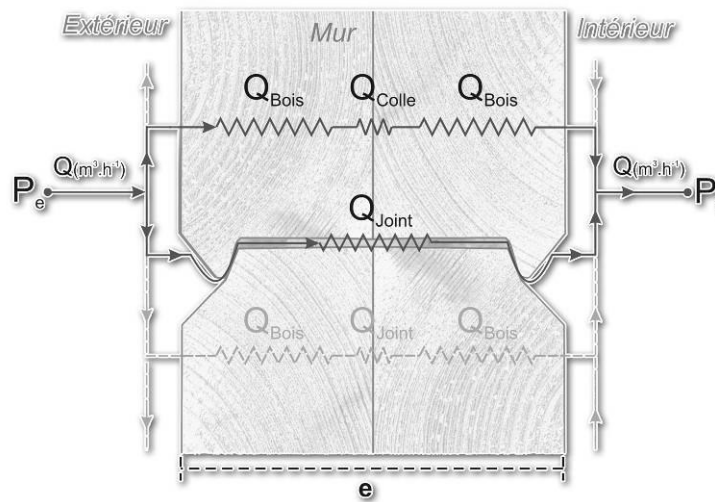


Figure 3.18 : Flux d'air traversent la paroi en bois massif contrecollés avec joint entre madriers.

La détermination de ce flux nécessite de connaître le flux d'air dans chaque branche (bois, bois-colle-bois et joint de feutre). Plusieurs études ont été réalisées pour caractériser le bois de pin sylvestre sur les écoulements fluides « gazeux », mais aucun résultat n'a été publié sur les propriétés d'une paroi composite et en particulier sur l'influence d'un contre-collage et d'un joint entre les madriers.

3. 1. 1. Perméamètre TREFLE

La perméabilité a été mesurée à l'aide du perméamètre TREFLE (Jannot et Lasseux, 2004) représenté sur la figure 3.19. L'échantillon testé est un disque de bois d'épaisseur e variable et de diamètre $D_2 = 170\text{mm}$. Les surfaces latérales et les deux surfaces comprises entre les diamètres $D_1 = 150\text{mm}$ et $D_2 = 170\text{mm}$ sont étanchéifiées avec de la colle. La surface supérieure est soumise à une pression P_1 variable entre 1,1 et 4 bar. Le débit d'air traversant l'échantillon sous l'effet de la différence de pression va provoquer une augmentation de la pression P_2 dans la chambre basse (isotherme et de volume V constant) située sous la face inférieure de l'échantillon. On note que chaque mesure a été répétée 5 fois.

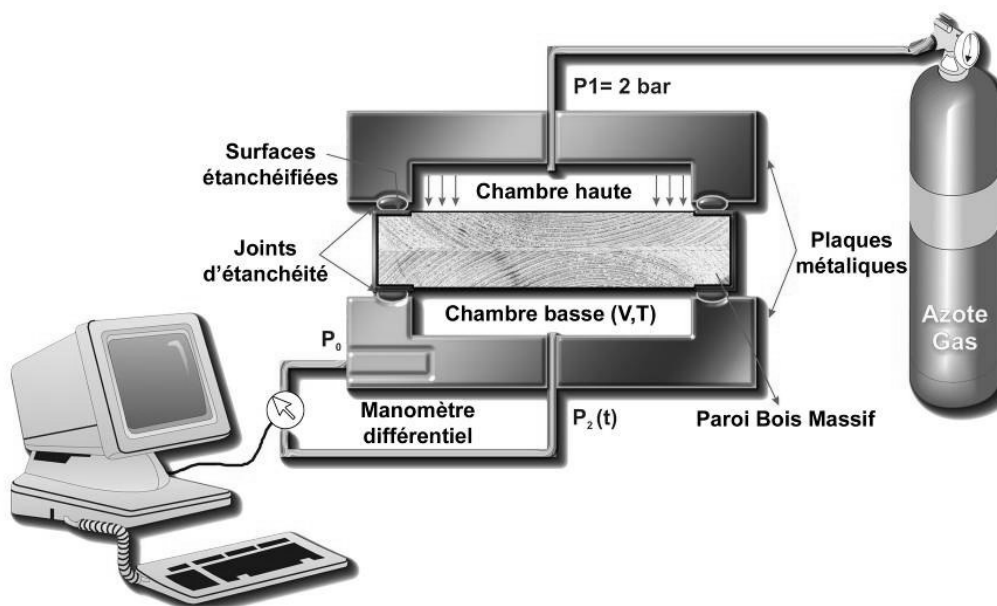


Figure 3.19 : Schéma de principe du perméamètre

En régime semi permanent, la courbe de pression en fonction du temps est une droite dont la pente β est proportionnelle au débit d'air sous réserve que les températures des gaz dans les deux branches du manomètre soient identiques. Pour assurer cette hypothèse d'isothermicité, la branche basse pression du manomètre est reliée à un volume réalisé par perçage dans la plaque métallique inférieure. L'enregistrement de la pression dans la chambre basse est stoppé quand l'augmentation de pression atteint 10 mbar afin de pouvoir faire l'hypothèse d'une différence de pression constante entre les deux faces.

Principe physique de perméamètre TREFLE :

Les variables d'état d'un gaz ne sont pas indépendantes, elles sont reliées par l'équation suivante :

$$PV_0 = n.R.T \quad (3.11)$$

Où : P , pression (Pa),
 V_0 , volume occupé (m³),
 R , constante des gaz,
 n , quantité de matière (mol),
 T , température absolue (K),

Seul le gaz parfait est en accord avec cette relation. Les gaz réels ne s'en approchent qu'à haute température et sous basse pression. Malgré ces restrictions la loi du gaz parfait est souvent utilisée pour évaluer la masse molaire d'une substance volatile.

$$n = \frac{m}{M} \quad (3.12)$$

Où : m , masse du gaz (kg).
 M , masse molaire du gaz kg. Mol⁻¹

$$pV_0 = m \frac{R}{M} T \quad (3.13)$$

$$q_m^\circ = \frac{dm}{dt} = \frac{M V_0}{R T} \frac{dp}{dt} \quad (3.14)$$

$$q_v^\circ = \frac{q_m^\circ}{\rho} \quad \text{avec} \quad \rho = \frac{m}{v} = \frac{M p}{R T} \quad (3.15)$$

$$q_v^\circ = q_m^\circ \frac{R T}{M p} = \frac{M V_0}{R T} \cdot \frac{R T}{M p} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.16)$$

Le débit d'air traversant l'échantillon est calculé par la relation :

$$q_v^\circ = \frac{V_0}{p} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (3.17)$$

À partir des mesures de débit d'air à travers le bois q_{Bois}° (m³. h⁻¹. m². Pa⁻¹) et le débit d'air à travers le joint entre madrier q_{Joint}° (m³. h⁻¹. m^{Linéaire}⁻¹. Pa⁻¹), nous avons calculé le débit d'air à travers un mètre carré d'une paroi en bois massif q_{paroi}° (m³/(m².h. Pa).

$$q_{\text{paroi}}^\circ = q_{\text{Bois}}^\circ + (q_{\text{JOINT}}^\circ \times N) \quad (3.18)$$

où N est le nombre de madrier dans un mètre carré de mur.

La perméabilité k (m²) est ensuite calculée par :

$$k = \frac{q_v^\circ}{\pi D_1^2} \frac{2\mu P_1}{(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3.19)$$

- où q_v° est le débit volumique de sortie à la pression P_2
 μ , viscosité dynamique du fluide (Pa.s)
 D_1 , Diamètre d'échantillon.

Le pas de temps d'enregistrement de la pression P_2 est de 1s avec une précision de 0,025 mbar.

3. 1. 2. Préparation des échantillons

Afin de commencer une étude complète sur la perméabilité de paroi en bois massif contrecollé avec joint entre madriers, nous avons essayé dans un premier temps de déterminer séparément la perméabilité d'un madrier composite de bois, d'un joint de colle et d'un joint de feutre. Dans une deuxième partie, nous avons étudié l'influence du profil de madrier, de l'épaisseur et du type de joint entre madriers sur le débit d'air à travers la paroi.

3. 1. 3. Effet du contre collage et du joint de feutre sur la perméabilité de paroi

Comme nous l'avons indiqué au dessus, la détermination des flux à travers une paroi en bois massif contrecollé verticalement composite de bois et de joint de feutre entre madriers nécessite de connaître le flux d'air dans trois branches (bois, bois-colle-bois et joint de feutre). Pour déterminer ces flux, 3 types d'échantillons représentés sur la figure 3.20 ont été testés à l'aide du perméamètre TREFLE :

- 4 échantillons de bois massif d'épaisseurs 20, 28, 42 et 46mm,
- 3 échantillons de bois contre-collé d'épaisseurs 19, 32 et 120mm,
- 2 échantillons de madrier contre-collé profil H d'épaisseur 120 mm avec un joint de feutre isopropylène médian.

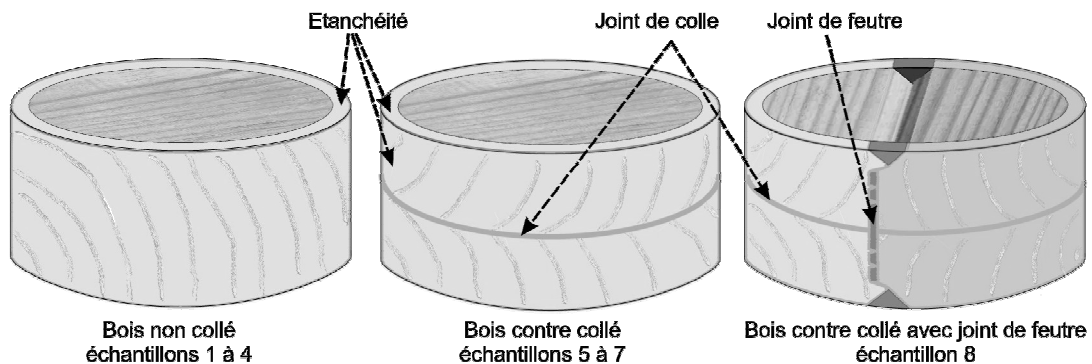


Figure 3.20 : Schéma des échantillons testés

3. 1. 4. Effet de l'épaisseur de madrier et du type de joint sur le débit d'air à travers le joint

Deux séries de manipulations ont été réalisées au niveau du joint entre madriers, la première a pour objectif de déterminer l'influence de l'épaisseur de la paroi sur le débit d'air à travers un mètre linéaire de joint entre madriers. Nous avons préparé 2 échantillons de madriers contre-collé profil H d'épaisseurs 134 mm et 113 mm nommés (H1 et H2) respectivement, avec un joint de feutre isopropylène médian, et 4 échantillons de madrier contre-collé profil F épaisseur de 202, 165, 131 et 112 mm nommés (F1, F2, F3 et F4) respectivement, avec un joint de cellulose ou joint compribandé. Les dimensions des échantillons sont représentées sur la figure (3.21).

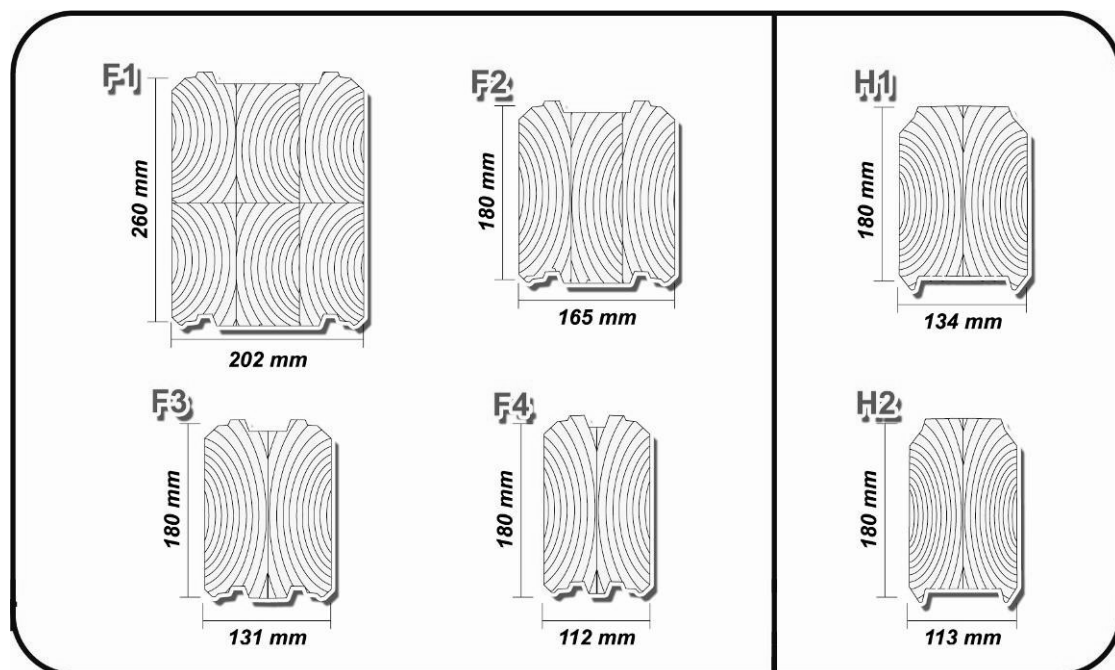


Figure 3.21 : Dimensions des profils étudiés.

La deuxième série de manipulation a pour objectif d'évaluer l'influence du changement de type de joint sur le débit d'air. Nous avons donc réalisé des essais sur quatre échantillons de madrier contre-collé de profil F d'épaisseurs 112, 131, 165 et 202 mm avec des joints de feutre cellulose nommés (FX-1), et d'autres essais sur quatre échantillons de mêmes épaisseurs, mais avec des joints compribandé nommés (FX-2). Le choix des joints entre madriers et leur emplacement sont fait à la demande des constructeurs (Figure 3.22).

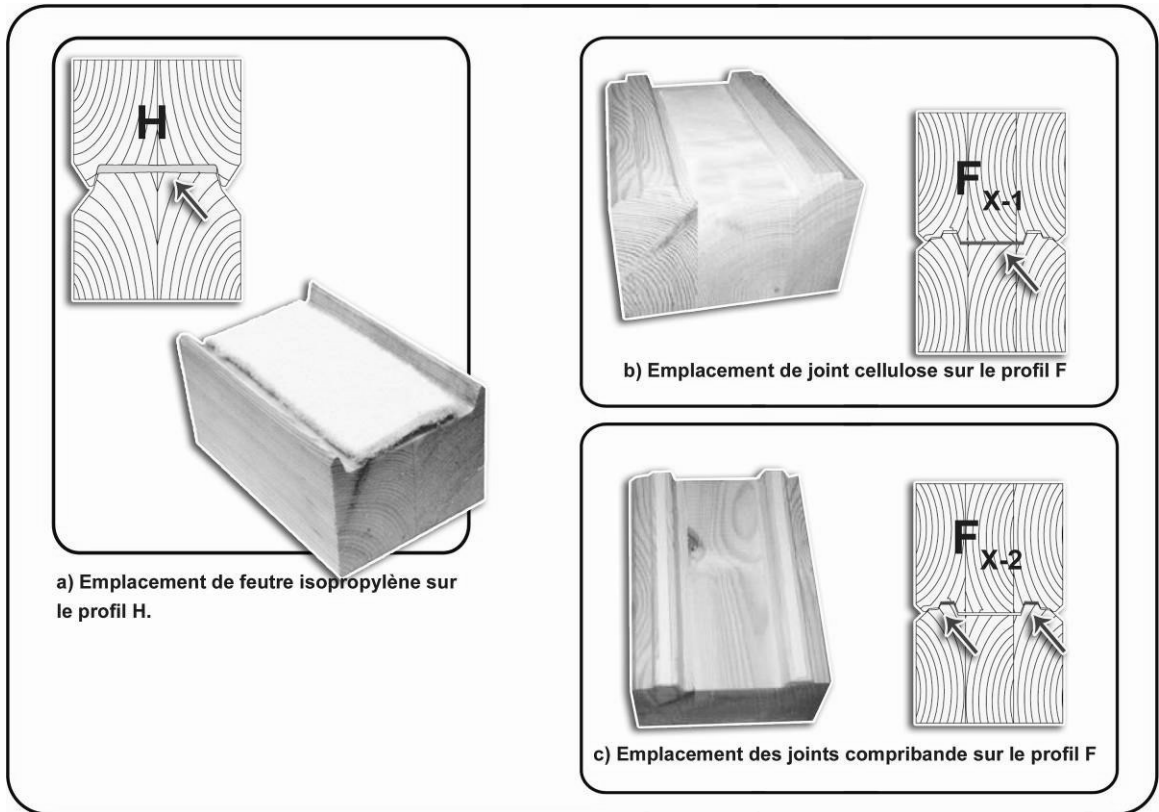


Figure 3.22 : Emplacement des joints sur les profils.

3. 2. Résultats et discussions

3. 2. 1. Influence du contre collage et du joint de feutre sur la perméabilité de parois

On constate que le dispositif expérimental mis au point mesure la perméabilité sur une surface relativement importante (disque de diamètre 150 mm) et permet d'obtenir des résultats reproductibles au vu des faibles écarts-types enregistrés. On note par ailleurs des résultats assez homogènes pour les deux classes d'échantillons massifs et contre-collés. On pourra ainsi retenir les valeurs moyennes suivantes de la perméabilité : $5,80 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ pour le pin massif et $7,75 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ pour le pin contre-collé. La présence d'un joint de colle a donc une influence très forte sur la perméabilité à l'air qui est divisée par un facteur de l'ordre de 10. On trouvera dans le tableau (3.5) les résultats des mesures de perméabilité.

Tableau 3.5 : Résultats des mesures de perméabilité à l'air

N° échantillon	Epaisseur	Contrecollé	Joint feutre	Perméabilité m^2	Ecart-type %
1	20	Non	Non	$4,11 \cdot 10^{-17}$	0,32
2	28	Non	Non	$7,66 \cdot 10^{-17}$	0,19
3	42	Non	Non	$6,26 \cdot 10^{-17}$	0,16
4	46	Non	Non	$5,19 \cdot 10^{-17}$	0,05
5	19	Oui	Non	$8,25 \cdot 10^{-18}$	0,50
6	32	Oui	Non	$8,42 \cdot 10^{-18}$	1,09
7	120	Oui	Non	$6,59 \cdot 10^{-18}$	0,53
8	120	Oui	Oui	$3,40 \cdot 10^{-15}$	0,58
9	120	Oui	Oui	$4,43 \cdot 10^{-15}$	0,44

On constate d'autre part que la perméabilité d'un échantillon profil H incluant un joint de feutre isopropylène présente une perméabilité de l'ordre de 100 fois supérieure à celle du bois massif et de 1000 fois supérieure à celle du bois contre-collé. Compte tenu des écarts très importants entre les valeurs avec et sans joint de feutre on peut assimiler la valeur de la perméabilité des échantillons 8 et 9 à celle du joint de feutre.

3. 2. 2. Influence du profil et de l'épaisseur de madrier sur le débit d'air à travers le joint

La figure (3.23) montre les valeurs de débit d'air à travers les deux types de madrier (H, et F) par rapport à l'épaisseur de madrier.

Le débit d'air moyen varie entre $3,08 \cdot 10^{-7}$ et $4,12 \cdot 10^{-10}$ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$ pour les madriers de profil F et de $7,57 \cdot 10^{-6}$ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$ à $5,67 \cdot 10^{-7}$ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$ pour le profil H.

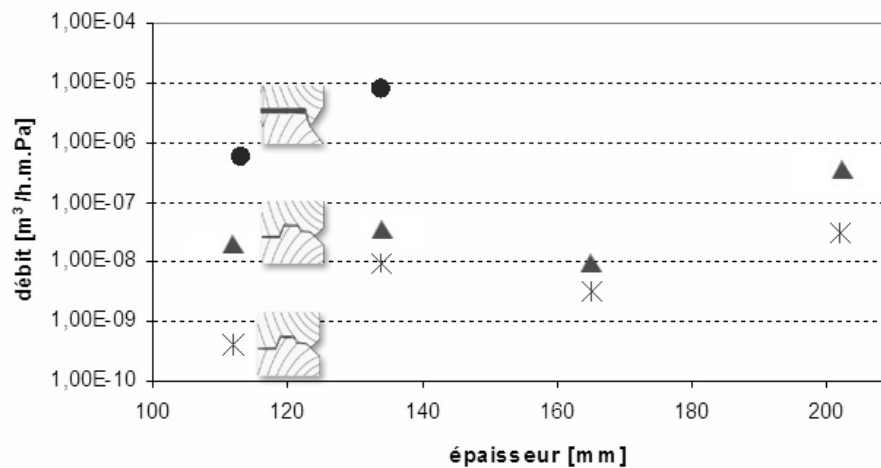


Figure 3.23 : l'influence de profil (H [●], et F [▲]) et de l'épaisseur de paroi sur le débit d'air madrier

Il est à noter que le débit d'air à travers le joint entre madrier n'est pas lié directement à l'épaisseur de parois. Par contre, on remarque un débit plus important vers les madriers les plus épais. Les échantillons F₁₋₁ et F₁₋₂ avec 202 mm d'épaisseur, montre un débit de ($3,08 \cdot 10^{-7}$) et ($2,96 \cdot 10^{-8}$) $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$ respectivement.

En plus, avec un débit moyen de ($9,8 \cdot 10^{-6}$) $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$ au niveau de joint entre madriers, la perméabilité des parois profil H est 100 fois supérieure à celui de parois profil F.

On pourrait donc penser que le débit d'air à travers le joint entre madrier est lié au profil et à la qualité d'usinage de madriers.

3. 2. 3. Influence de joint entre madrier sur le débit d'air à travers la paroi

On constate que les débits d'air à travers les joints de cellulose sont plus élevés que ceux à travers les joints de comprimande. La figure (3.24) représente l'influence de type de joint entre madriers sur le débit d'air à travers la paroi.

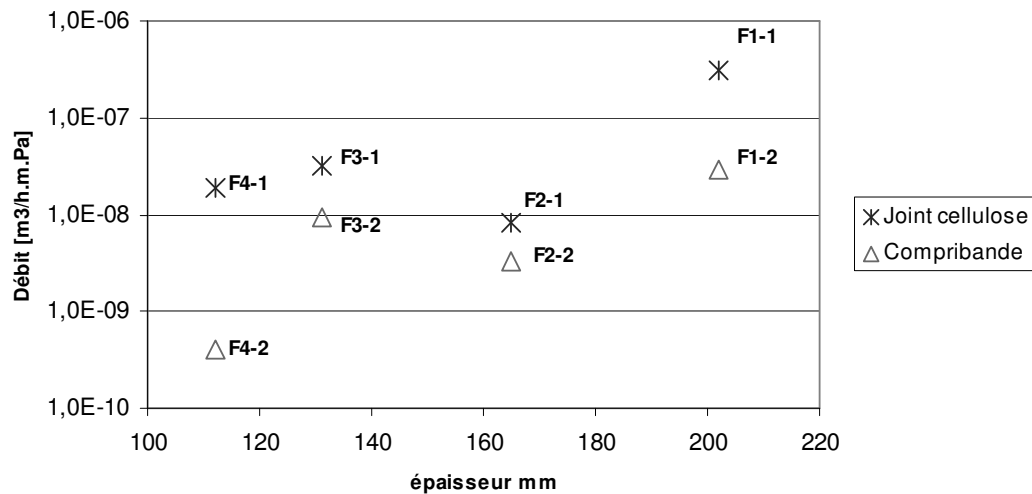


Figure 3.24 : Influence de type de joint sur le débit d'air

Avec une épaisseur de 112 mm, les échantillons F4 présentent un débit d'air plus important lors du changement de type de feutre entre madriers, le joint de cellulose montre un débit 100 fois plus élevé de celui de compribande. Les échantillons F₁₋₁ et F₁₋₂ avec 202 mm d'épaisseur présentent les mêmes résultats avec un débit d'air de $4,08 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$ pour les joints de cellulose et de $3,96 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{pa}^{-1}$ pour les joints de compribande.

Les échantillons F₂ et F₃ montrent l'effet de joint de cellulose sur l'augmentation du débit d'air à travers les joints entre madriers, mais la différence est moins importante que celle entre F₁ et F₄, cette variation est liée à la qualité d'usinage de madriers.

Nous pouvons retenir que le type de joint entre madrier ralentit fortement le passage de l'air dans le bois sous l'influence d'une différence de pression, le choix de feutre est très important pour augmenter ou diminuer la perméabilité de parois en bois massif selon l'objectif final de ce type de construction.

3. 2. 4. Etude comparative entre les résultats de perméabilité à l'échelle de laboratoire et à l'échelle de bâtiment.

Nous avons présenté dans le premier chapitre que la perméabilité de mur moyenne à l'échelle de bâtiment était $1,32 \text{ (m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2))$ à 4 Pa.

En parallèle, et à partir des mesures de débit d'air à travers le bois $q^\circ_{\text{Bois}} = 4,3 \cdot 10^{-7} \text{ (m}^3 / (\text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1}))$ et le débit d'air à travers le joint entre madrier $q^\circ_{\text{Joint}} = 9,8 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$, nous pouvons calculer le débit d'air à travers un mètre carré d'une paroi en bois massif q°_{paroi} en appliquant l'équation 5 avec $N=5$ et $\Delta P=4 \text{ Pa}$

$$q^{\circ}_{paroi} = 4,3 \cdot 10^{-7} \times 4 + (9,8 \cdot 10^{-6} \times 4 \times 5) = 1,98 \cdot 10^{-4}$$

On trouve que le débit d'air à travers une paroi en bois massif avec joint de feutre obtenu en laboratoire est inférieur à celui obtenu à l'échelle de bâtiment. On peut constater que l'essai de perméabilité réalisée au laboratoire dans des conditions optimales de serrage de madriers, peut être utilisé pour analyser l'influence du profil, de l'épaisseur de paroi ou du type de joint sur la perméabilité de paroi, mais on ne peut pas estimer la perméabilité réelle à l'échelle de bâtiment à partir des échantillons mesurés en laboratoire.

La perméabilité mesurée à l'échelle de bâtiment intègre les passages d'air à travers les parois, les liaisons, les menuiseries et les défauts d'étanchéité. Par ailleurs, les essais de perméabilité réalisés en laboratoire donnent la perméabilité réelle à l'échelle d'un échantillon de parois (18 * 18 cm), les conditions de l'essai ne prennent pas en compte les défauts liés à la construction du bâtiment.

4. CONCLUSIONS

L'étude hygro-thermique d'une paroi en bois massif contre-collé verticalement met en évidence trois flux traversant une telle paroi : flux de chaleur, flux d'air humide et flux (diffusif) de vapeur d'eau. Ces trois flux traversent la paroi par deux chemins parallèles en considérant des transferts unidirectionnels. Les propriétés physiques de chacun des éléments constitutifs de la paroi ont été déterminées.

L'isotherme de sorption est obtenue à l'utilisation de la méthode isostatique des solutions salines saturées. Nous avons trouvé une forte variation de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} avec l'humidité relative de l'air φ . Ensuite, la méthode du volumétre à mercure a été utilisée pour estimer la masse volumique humide ρ_{humide} et la masse volumique sèche ρ_{sec} .

Les propriétés thermiques du pin nordique ont été estimées dans la direction des fibres et dans la direction perpendiculaire par les méthodes du fil chaud et du ruban chaud respectivement, Il est ressorti de cette étude expérimentale la forte dépendance des propriétés thermiques du bois avec l'humidité.

On a utilisé la méthode gravimétrique statique pour estimer le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau à travers la paroi, le coefficient de diffusion moyen du pin massif est de $5,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. On remarque une forte résistance au transfert de vapeur d'eau au niveau du joint de colle. Nous pouvons retenir que la présence d'un joint de colle ralentit fortement le passage de vapeur d'eau dans le bois, cette résistance peut avoir comme effet négatif la formation de « zones humides » au centre de la paroi.

La perméabilité à l'air a été mesurée à l'aide du perméamètre TREFLE, deux profils de madriers et 3 types de joints entre madrier sont testés, les mesures sont effectuées sur trois éléments (bois, bois-colle-bois, et joint entre madriers). Les résultats montrent que le débit d'air à travers 1 m linéaire de joint entre madrier est proche de celui à travers 1 m² de bois massif, et 10 fois supérieur à celui traversant 1 m² de bois contre collé.

A l'échelle du simple madrier, l'influence de l'épaisseur est faible ; compte tenu de la forte perméabilité de la paroi (composite des madriers contrecollés avec joint entre madriers), c'est au niveau du joint en feutre que s'effectuera principalement l'écoulement de l'air.

L'influence du profil de madrier et du type de joint entre madriers est très importante sur le débit d'air. Le profil H présent un débit 100 fois plus important que le profil F. Le joint de cellulose présente un débit d'air 10 à 100 fois plus important de celui du joint compribandé.

On peut constater que l'essai de perméabilité réalisé au laboratoire dans des conditions optimales de serrage de madriers peut utiliser pour comparer l'influence du profil, de l'épaisseur de paroi ou de type de joint sur la perméabilité de paroi, mais il ne peut pas évaluer la perméabilité réelle à l'échelle de bâtiment.

Les valeurs de propriétés obtenues dans cette étude vont servir de données à un modèle permettant de simuler l'évolution des flux traversant une paroi en bois massif contre-collé en régime transitoire.

Transport couplé de masse et de chaleur dans des parois en bois massif

Modèles de transfert et caractérisation « in situ »

1. Introduction	129
2. Matériels et méthode	130
2.1. Description de la paroi	130
2.2. Evolution « in situ » de l'état thermo - hydrique de la paroi	130
3. Évolution thermo hydrique au sein de la paroi	133
3.1. Modèle détaillé de transferts couplés de masse et de chaleur au sein de la paroi	133
3.1.1. Mécanismes et lois phénoménologiques de transfert	133
3.1.2. Equations de conservation	134
3.1.3. Paramètres et coefficients de transfert	136
3.1.4. Ecriture du modèle de transferts	138
3.2. Validation expérimentale du modèle des transferts	140
3.2.1. Simulation de référence n°1	141
3.2.2. Simulation de référence n°2	143
3.2.3. Un regard critique sur la qualité des mesures d'humidité	144
3.3. Modèles de transfert « dégradés » à précision semblable à celle du modèle complet ...	146
3.3.1. Découplage partiel des transferts de chaleur et d'humidité	147
3.3.2. Comparaison du MDF au modèle de référence	147
3.4. Modèle de simulation du comportement hygrothermique réel	149
3.4.1. Représentation en modélisation 2D	153
3.4.2. Effet observé en régime permanent, du joint de colle interne aux madriers	154
3.4.3. Effet de la régulation hydrique de la paroi BM	154
4. Conclusion	156

①

20 mm

Notation

c_l	Chaleur massique de l'eau liquide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
c_s	Chaleur massique de la matrice solide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
c_v	Chaleur massique de la vapeur d'eau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
c^*	Chaleur massique apparente du milieu ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
D_e	Diffusivité effective de la vapeur d'eau dans l'espace poreux ($m^2.s^{-1}$)
D_{Tl}	Coefficient de diffusion de l'eau liquide sous l'effet d'un gradient thermique ($m^2.s^{-1}.K^{-1}$)
D_{Tv}	Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient thermique ($m^2.s^{-1}.K^{-1}$)
D_{wl}	Coefficient de diffusion de l'eau liquide sous l'effet d'un gradient en teneur d'eau ($m^2.s^{-1}$)
D_{wv}	Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient en teneur d'eau ($m^2.s^{-1}$)
g	Accélération de gravité ($m.s^{-2}$)
h	Coefficient de transferts convectifs - radiatifs paroi - air ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
h_m	Coefficient de transfert de masse paroi - air ($kg.m^{-2}.s^{-1}.Pa^{-1}$)
K_l	Conductivité hydraulique du milieu ($m.s^{-1}$)
K_v	Conductivité de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de succion capillaire ($m.s^{-1}$)
L	Épaisseur de la paroi (m)
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$)
P	Pression atmosphérique (Pa)
P_v	Pression partielle de la vapeur d'eau (Pa)
P_{vs}	Pression saturante de la vapeur d'eau (Pa)
q	Densité de flux solaire absorbé par la face extérieure de la paroi ($W.m^{-2}$)
R_v	Constante des gaz pour la vapeur d'eau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
T	Température (K)
t	Temps (s)
x	Coordonnée spatiale (m)
w_l	Teneur en eau liquide ($b.s^{-1}$)
w_v	Teneur en vapeur d'eau ($b.s.$)
<u>Symboles grecs</u>	
ε_a	Fraction du volume occupée par le gaz (-)
ε_l	Fraction du volume occupée par le liquide (-)
ε_s	Fraction du volume occupée par le solide (-)
φ	Humidité relative (-)
λ_o	Conductivité thermique effective du milieu ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
λ^*	Conductivité thermique apparente du milieu ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
ρ_l	Masse volumique de l'eau liquide ($kg.m^{-3}$)
ρ_o	Masse volumique apparente de la matrice solide ($kg.m^{-3}$)
ρ_s	Masse volumique de la phase solide ($kg.m^{-3}$)
ρ_v	Masse volumique de la vapeur d'eau ($kg.m^{-3}$)
ψ	Succion capillaire (m)

1- Introduction

Les bases théoriques pour modéliser les phénomènes couplés de transport de chaleur et de masse dans un milieu poreux ont été développées depuis l'année 1957 par De Vries *et al.* et plus tard par Luikov (1966) et Whitaker (1977). A ce jour de nombreuses modélisations sont disponibles et appliquées à des situations particulières de matériaux et de problèmes.

Plus précisément pour prévoir et suivre les évolutions de température et de teneur en eau dans l'enveloppe d'un bâtiment, on retiendra, parmi les nombreux outils disponibles, le modèle (MOIST) proposé et validé par Zarr *et al.* (1995) où sont décrits les transferts thermo hydriques dans un mur en bois, une approche sur un mur multicouche à base de bois a été développée Douglas (1995).

Une étude comparative sur trois modèles décrivant le comportement hydro thermique : 1D-HAM, Match et WUFI 2D a été proposée par Kalamees *et al.* (2002). Plus avant Künzle *et al.* (2005) ont validé un modèle thermo hydrique (WUFI+) en utilisant des mesures effectuées sur un bâtiment test. Harmeury a présenté en 2005 une étude sur les transferts thermo hydriques dans un mur en bois massif en étendant 1D-HAM en un code IDA.

Les outils de simulations mentionnés ci-dessus nécessitent comme données en entrée des caractérisations techniques et des données thermo-physiques des murs (matériaux, épaisseurs, etc...), et à partir des modèles déjà installés sur les programmes, ils donnent comme résultats, l'évolution au cours du temps de l'état thermo hydrique de la paroi ou du bâtiment. Les modèles de base pour ces outils sont toujours établis à partir des travaux initiaux de De Vries et Luikov. Les degrés de développement et de simplification sont bloqués dans les codes et dans ce cadre sont à considérer comme des boîtes « noires ».

Le mur en bois massif que nous avons présenté au chapitre 3 est caractérisé par l'existence d'une couche non perméable au milieu du madrier, les feutres entre les madriers jouent un rôle important tout particulièrement sur le transfert aéraulique à travers la paroi. Les outils de simulations existants ne permettent pas d'intégrer les particularités et les spécificités du mur en bois massif lors des calculs.

L'objectif de cette partie du travail est de proposer dans un premier temps un modèle simple mais suffisamment complet et flexible pour décrire les transferts couplés de masse et de chaleur dans des parois en bois massif. En second lieu il s'est agi de valider ce modèle par des mesures « in situ » réalisées sur un mur en situation d'échange entre une ambiance intérieure et une ambiance extérieure. Pour cela, nous avons installé des capteurs de température et d'humidité relative sur 6 points au sein de la paroi. En plus, nous avons effectué des mesures complémentaires sur les caractéristiques ambiantes, température et humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment et densité de flux solaire reçu par la face extérieure de la paroi.

Ce modèle permettra par la suite de caractériser numériquement l'évolution thermo hydrique dans une maison en bois massif.

2- Matériels et méthode

2.1. Description de la paroi

La paroi étudiée fait partie d'un bâtiment en bois massif contre collé. Nous avons montré expérimentalement que la colle joue le rôle de résistance hydrique vis-à-vis des transferts de vapeur d'eau. Des joints de feutre posés entre les madriers assurent l' « étanchéité » de la paroi (Fig.4.1). La paroi orientée au nord a 130 mm d'épaisseur. Les 6 capteurs de température et d'humidité relative de type SENSIRION SHT7x ont été placés à l'intérieur de la paroi afin de suivre son évolution thermo hydrique au cours du temps (Fig. 4.1). De plus des capteurs de mesure de la densité de flux solaire global sur la paroi, de la température et de l'humidité relative de l'air de part et d'autre de la paroi ont été installés.

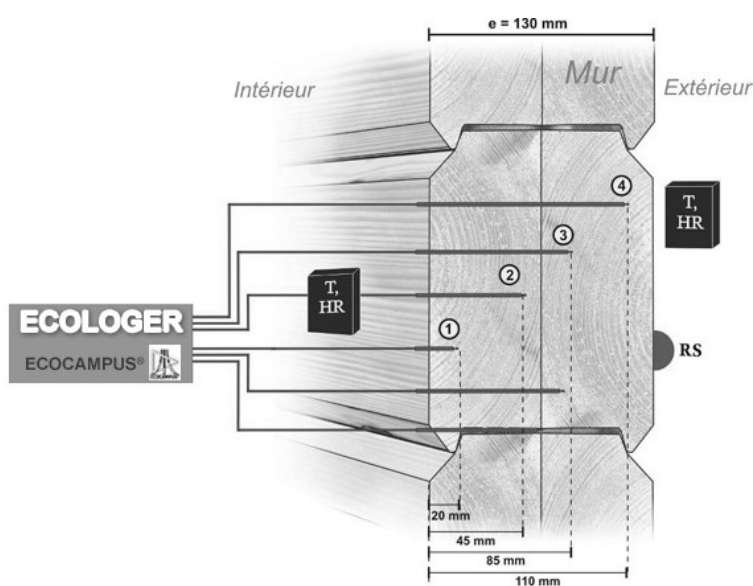


Figure 4.1. Instrumentation de la paroi :

T = capteur de température ; HR = capteur d'humidité relative ; RS = capteur d'éclairement énergétique solaire.

Afin de déterminer les grandeurs caractérisant les transferts thermo physiques et les propriétés d'équilibre du matériau bois utilisé, des mesures en laboratoire ont été effectuées sur des échantillons prélevés dans les madriers. Les résultats de ces travaux ont été présentés tout au long du chapitre précédent.

2.2. Evolution « in situ » de l'état thermo - hydrique de la paroi

L'évolution thermo hydrique de la paroi a été suivie pendant plus d'un an. Nous présentons ici les résultats qui feront l'objet de l'étude. Ils correspondent à la période du 27/09/2004 au 10/11/2004. Les grandeurs physiques mesurées sont comme déjà indiqué : la température et l'humidité relative sur quatre points à l'intérieur de la paroi (voir Fig. 4.1), la densité de flux solaire global sur la paroi, la température et l'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de mur. La période

d'échantillonnage est de 10 min. L'analyse visuelle des figures 4.2 à 4.9 permet de constater la cohérence de ces différents résultats de mesure.

La teneur en eau dans la paroi a été calculée à partir du modèle de sorption et des données de température et d'humidité relative. Les résultats obtenus sont contenus dans la figure 4.8. Sur la figure 4.9, nous avons représenté la teneur en eau en fonction de l'humidité relative. Cette représentation permet de constater que la paroi évolue dans le domaine de l'eau libre. Elle met également en évidence une faible sensibilité de la teneur en eau vis-à-vis de la température (faible dispersion des points autour de l'isotherme moyenne de sorption), celle-ci étant comprise entre 10 et 25°C la plupart du temps (voir Fig. 4.5).

Les spectres de puissance contenus dans la figure 4.7 montrent que la paroi est sollicitée essentiellement aux basses fréquences. L'information dynamique (variance) de toutes les sollicitations, exception faite du rayonnement solaire, est concentrée à plus de 95% sur des fréquences inférieures à 2.3×10^{-5} Hertz (soit une période de 12h). Le rayonnement solaire est le signal le plus riche en fréquences. Toutes les sollicitations ont une composante périodique marquée sur 24 h, avec des pics de spectrales observés à 24h, 12h, 6h ...

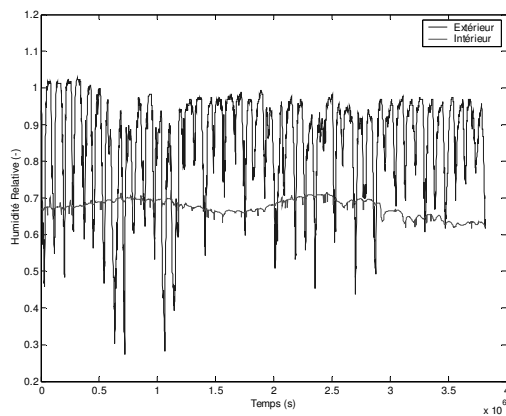


Figure 4.2. Evolution au cours du temps de l'humidité relative de l'air à l'intérieur (rouge) et à l'extérieur (bleu) du bâtiment.

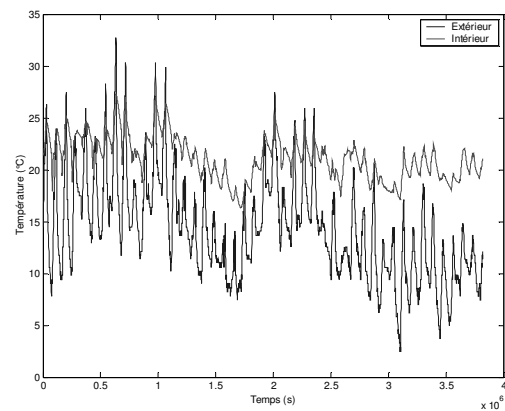


Figure 4.3. Evolution au cours du temps de la température de l'air à l'intérieur (rouge) et à l'extérieur (bleu) du bâtiment.

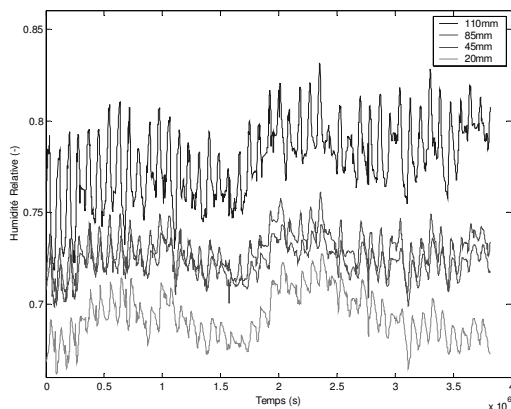


Figure 4.4. Evolution au cours du temps de l'humidité relative de l'air dans la paroi.

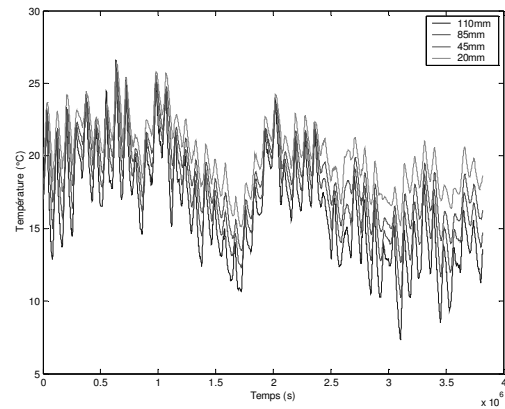


Figure 4.5. Evolution au cours du temps de la température de l'air dans la paroi.

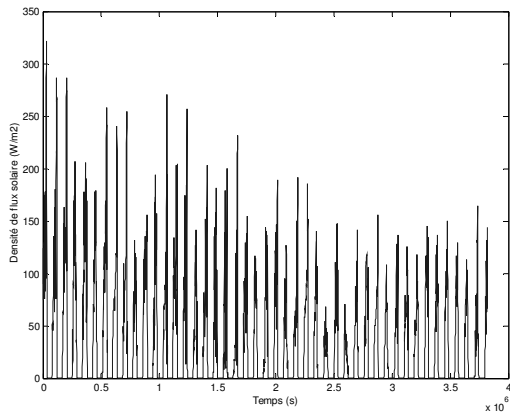


Figure 4.6. Evolution au cours du temps de la densité de flux solaire sur la paroi.

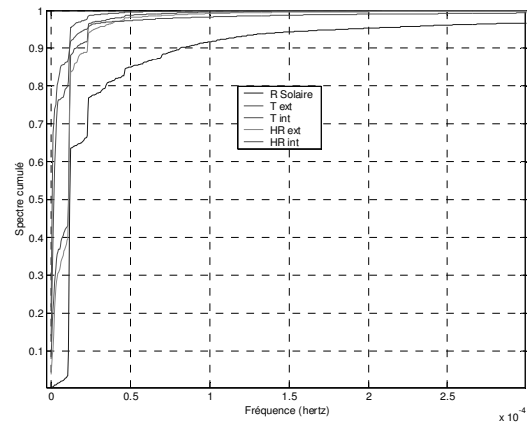


Figure 4.7. Spectre cumulé de puissance des sollicitations.

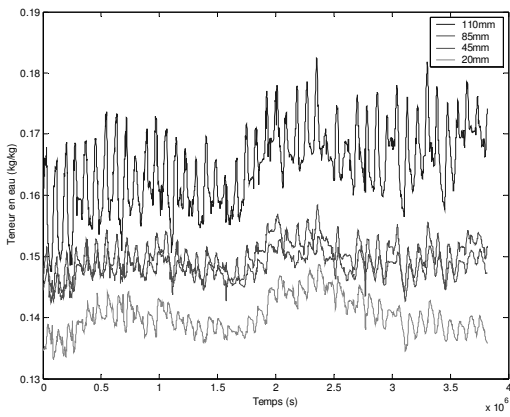


Figure 4.8. Evolution au cours du temps de la teneur en eau dans la paroi, calculée à partir de l'isotherme de sorption.

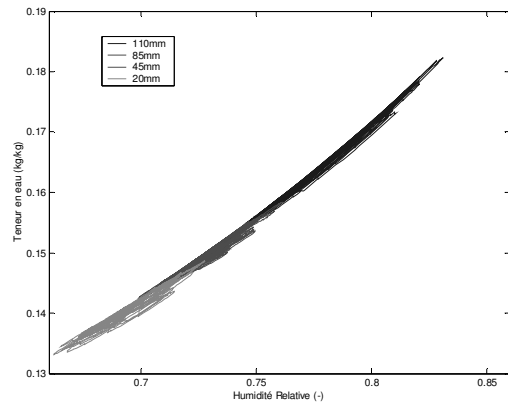


Figure 4.9. Teneur en eau dans la paroi versus l'humidité relative de l'air.

3- Évolution thermo-hydrrique de la paroi

3.1. Modèle détaillé de transferts couplés de masse et de chaleur au sein de la paroi

On considère une paroi verticale infinie d'épaisseur L (Fig. 4.10). Elle sépare deux ambiances, intérieure et extérieure, avec lesquels elle échange de l'énergie (convection, rayonnement) et de la vapeur d'eau (convection), un film de colle est placé au milieu de la paroi et divise son épaisseur en deux domaines.

La paroi est un milieu constitué par une phase solide (matrice bois), une phase liquide (eau liquide libre et liée) et une phase gazeuse (air et vapeur d'eau) discontinues. Néanmoins, elle peut être assimilée à un milieu fictif continu dont l'état des éléments différentiels de volume est défini par une température et une teneur en eau (ou grandeur équivalente). La pertinence d'une telle hypothèse a été formellement justifiée par Whitaker en (1977) et elle aboutit aux modèles de transferts couplés de masse et de chaleur proposés par De Vries en (1957), puis par Luikov en (1966). Dans tout ce qui suit, on supposera que les transferts de masse et d'énergie dans la paroi sont strictement monodimensionnels. Les différents rappels qui sont faits pour construire les équations de conservation sont assez généraux et acquis pour ne pas nécessiter de démonstrations, le lecteur pourra se référer, si nécessaire, aux articles déjà cités.

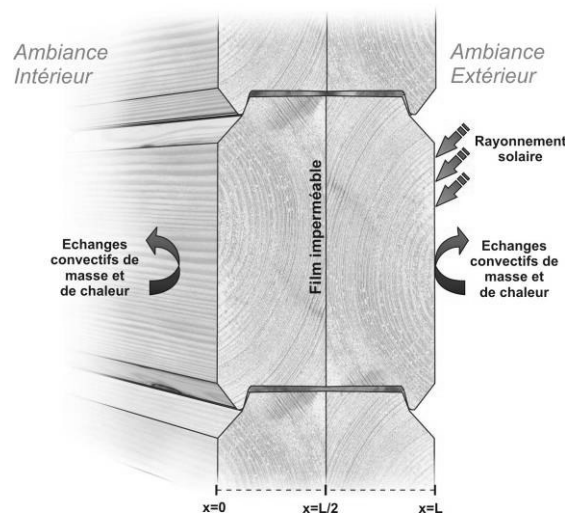


Figure 4.10 : Échanges d'énergie et de vapeur d'eau de part et d'autre de la paroi

3.1.1. Mécanismes et lois phénoménologiques de transfert

L'eau liquide dans un milieu poreux peut migrer sous l'effet d'un gradient de pression capillaire, par des effets d'adsorption - désorption et sous l'effet de la pesanteur. En négligeant ces deux derniers mécanismes de migration, on peut montrer que la densité de flux massique d'eau liquide \bar{J}_l ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) est localement donnée par :

$$J_l|_x = -\rho_l \left(D_{wl} \frac{\partial w_l}{\partial x} + D_{Tl} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

où T (K) et w_l ($kg.kg^{-1}$) représentent respectivement la température et la teneur en eau liquide. ρ_l ($kg.m^{-3}$) est la masse volumique de l'eau liquide et D_{wl} ($m^2.s^{-1}$) et D_{Tl} ($m^2.s^{-1}.K^{-1}$) sont respectivement les coefficients de diffusion de l'eau liquide sous l'effet soit d'un gradient de teneur en eau $\vec{\nabla}w_l$, soit d'un gradient de température $\vec{\nabla}T$.

Le moteur de migration de la vapeur d'eau dans le milieu est le gradient de la pression partielle de vapeur. La densité de flux massique de vapeur \vec{J}_v ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) suit de la loi de Fick en milieu poreux. Elle peut s'exprimer par :

$$J_v|_x = -\rho_l \left(D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} + D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.2)$$

D_{wv} ($m^2.s^{-1}$) et D_{Tv} ($m^2.s^{-1}.K^{-1}$) sont les coefficients de diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet des gradients $\vec{\nabla}w_l$ et $\vec{\nabla}T$, respectivement.

La densité de flux de chaleur \vec{J}_q ($W.m^{-2}$) est le résultat de trois mécanismes de transfert : la conduction, la convection et le changement de phase liquide/vapeur. En négligeant les transferts convectifs devant les transferts par conduction et par changement de phase, on peut écrire :

$$J_q|_x = -\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_l L_v D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \quad \lambda^* \text{ est précisé dans le Tableau 4.1} \quad (4.3)$$

où λ_o ($W.m^{-1}.K^{-1}$) et λ^* ($W.m^{-1}.K^{-1}$) sont, respectivement, la conductivité thermique effective et la conductivité thermique apparente du milieu, L_v ($J.kg^{-1}$) représente la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

3.1.2. Equations de conservation

Les équations de conservation de la masse et de l'énergie peuvent s'écrire localement sous la forme :

$$\rho_o \frac{\partial}{\partial t} (w_l + w_v) = -\frac{\partial}{\partial x} (\vec{J}_l + \vec{J}_v) \quad (4.4)$$

$$\rho_o \frac{\partial}{\partial t} (h_s + w_l h_l + w_v h_v) = -\frac{\partial}{\partial x} \vec{J}_q \quad (4.5)$$

ρ_o ($kg.m^{-3}$) est la masse volumique apparente de la matrice en bois sèche et w_v ($kg.kg^{-1}$) est la teneur en vapeur. Les enthalpies des trois phases présentes (solide, eau liquide et vapeur d'eau) sont :

$$h_s = c_s(T - T_{ref}) \quad h_l = c_l(T - T_{ref}) \quad h_v = c_v(T - T_{ref}) + L_v \quad (4.6)$$

où c_s ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), c_l ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) et c_v ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) sont les chaleurs massiques respectives.

Par ailleurs, on peut montrer que : $\frac{\partial w_v}{\partial t} = A \frac{\partial w_l}{\partial t} + C \frac{\partial T}{\partial t}$ (4.7)

Les coefficients $A(-)$ et $C(K^{-1})$ dépendent de la température et de la teneur en eau, leurs expressions sont rappelées dans le tableau 4.1.

En reportant les équations (4.1) à (4.3) et (4.6) et (4.7) dans (4.4) et (4.5), on obtient dans le domaine d'étude :

$$0 < x < L$$

$$\begin{aligned} \rho_o(c^* + L_v C) \frac{\partial T}{\partial t} + L_v \rho_o A \frac{\partial w_l}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l L_v D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \right) \\ \rho_o C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_o (1 + A) \frac{\partial w_l}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l (D_{Tl} + D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l (D_{wl} + D_{wv}) \frac{\partial w_l}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

où $c^* (J.kg^{-1}.K^{-1})$ est la chaleur massique apparente du milieu (Tableau 4.1).

En supposant des conditions aux limites de troisième espèce de part et d'autre de la paroi, on peut écrire (Battaglia, 1995) :

$$x = 0$$

$$\begin{aligned} -\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} - \rho_l L_v D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=0} &= -h_{int} (T \Big|_{x=0} - T_{int}) - L_v h_{m,int} (P_v \Big|_{x=0} - P_{v,int}) \\ -\rho_l (D_{Tl} + D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} - \rho_l (D_{wl} + D_{wv}) \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=0} &= -h_{m,int} (P_v \Big|_{x=0} - P_{v,int}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$x = L$$

$$\begin{aligned} -\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} - \rho_l L_v D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=L} &= q - h_{ext} (T \Big|_{x=L} - T_{ext}) - L_v h_{m,ext} (P_v \Big|_{x=L} - P_{v,ext}) \\ -\rho_l (D_{Tl} + D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} - \rho_l (D_{wl} + D_{wv}) \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=L} &= -h_{m,ext} (P_v \Big|_{x=L} - P_{v,ext}) \end{aligned}$$

$q (W.m^{-2})$ est la densité de flux solaire absorbée par la face extérieure de la paroi. $T_{int} (K)$ et $T_{ext} (K)$ représentent, respectivement, la température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment. Pareillement, $P_{v,int} (Pa)$ et $P_{v,ext} (Pa)$ sont les pressions partielles de vapeur respectives aux deux ambiances. $h_{int/ext} (W.m^{-2}.K^{-1})$ et $h_{m,int/ext} (kg.m^{-2}.s^{-1}.Pa^{-1})$ sont les coefficients de transferts convectifs de chaleur et de masse aux surfaces de la paroi.

Au niveau du film de colle, on adopte d'une part pour le flux de masse une condition d'imperméabilité, c'est-à-dire flux nul à l'interface :

$$x = L/2$$

$$\begin{aligned} -\rho_l (D_{Tl} + D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L/2}^{(+)} - \rho_l (D_{wl} + D_{wv}) \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=L/2}^{(+)} &= 0 \\ -\rho_l (D_{Tl} + D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L/2}^{(-)} - \rho_l (D_{wl} + D_{wv}) \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=L/2}^{(-)} &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

et, d'autre part, des conditions de continuité en température (contact parfait) et en flux de chaleur :

$$x = L/2$$

$$\begin{aligned} -\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L/2}^{(+)} - \rho_l L_v D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=L/2}^{(+)} &= -\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L/2}^{(-)} - \rho_l L_v D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=L/2}^{(-)} \\ T \Big|_{x=L/2}^{(+)} &= T \Big|_{x=L/2}^{(-)} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Il convient de noter que dans les simulations qui seront faites par la suite la condition d'imperméabilité du film n'a pas toujours été retenue, une résistance aux transferts hydriques pourra être utilisée, de même que la possibilité d'un film perméable.

3.1.3. Paramètres et coefficients de transfert

Comme le montre le tableau 4.1, la conductivité thermique et la chaleur massique apparentes du milieu, ainsi que les différents coefficients de diffusion qui interviennent dans les équations de conservation ci-dessus, sont fonction de la température et du contenu en eau. La dépendance avec la température apparaît soit explicitement, soit à travers la pression saturante de la vapeur d'eau (P_{vs}). Quant aux dépendances avec le contenu en eau, elles s'établissent à travers la teneur en eau liquide (w_l), l'humidité relative (φ) et/ou la succion capillaire (Ψ). Nous rappelons que ces trois grandeurs physiques sont reliées par les isothermes de sorption, d'une part, et par la loi de Kelvin, d'une autre :

$$\text{Isotherme de sorption : } w_l = \frac{w_{lm} CK \varphi}{(1 - K \varphi)(1 + CK \varphi - K \varphi)}$$

(4.12)

$$\text{Loi de Kelvin : } \varphi = \exp\left(\frac{g \Psi}{R_v T}\right) \quad (4.13)$$

où les paramètres w_{lm} , C et K dépendent de la nature du milieu et de la température. R_v est la constante des gaz pour la vapeur d'eau et g l'accélération due à la pesanteur.

Tableau 4.1. Paramètres et coefficients de transfert

<p>Coefficients de diffusion de l'eau liquide et de la vapeur d'eau :</p> $D_{wl} = K_l \left(\frac{\partial \Psi}{\partial w_l} \right)_T ; D_{Tl} = K_l \left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_{w_l} ; D_{wv} = K_v \left(\frac{\partial \Psi}{\partial w_l} \right)_T ; D_{Tv} = K_v \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_{w_l} + \left(\frac{L_v - g \Psi}{g T} \right) \right]$ <p>avec $K_l = f(w_l)$ et $K_v = D_e \frac{P}{P - \varphi P_{vs}} \left(\frac{1}{R_v T} \right)^2 \frac{P_{vs} g \varphi}{\rho_l}$</p>
<p>Conductivité thermique et chaleur massique et diffusivité massique apparentes :</p> $\lambda^* = \lambda_o + \rho_l L_v D_{Tv} ; c^* = c_s + c_l w_l + c_v w_v ; D_e = \varepsilon_a D_{eo} = \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_s} - \frac{\rho_o}{\rho_l} w_l \right) D_{eo}$ <p>avec $\lambda_o = \lambda_{sa} + \lambda_{la} w_l ; w_v = \frac{\varepsilon_a \rho_v}{\rho_o} = \frac{\varepsilon_a \varphi P_{vs}}{\rho_o R_v T} ; \varepsilon_a = 1 - \varepsilon_s - \varepsilon_l = 1 - \frac{\rho_o}{\rho_s} - \frac{\rho_o}{\rho_l} w_l$</p>
<p>Paramètres A et C :</p> $A = - \frac{1}{\rho_l} \frac{P_{vs} \varphi}{R_v T} + \frac{\varepsilon_a g}{\rho_o} \frac{P_{vs} \varphi}{(R_v T)^2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial w_l} \right)_T ; C = \frac{\varepsilon_a g}{\rho_o} \frac{P_{vs} \varphi}{(R_v T)^2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_{w_l} + \frac{\varepsilon_a P_{vs} \varphi}{\rho_o R_v T} \left[\frac{L_v}{R_v T^2} - \frac{g \Psi}{R_v T^2} - \frac{1}{T} \right]$

Notre objectif ici est de mettre en cohérence les mesures effectuées en laboratoire sur des échantillons en bois avec les paramètres et les coefficients de transfert ci-dessus. Dans le tableau 4.2 à gauche sont répertoriés les propriétés physiques du bois qui ont été mesurées, à droite, l'ensemble des paramètres qui interviennent dans le modèle de transferts (équations 4.8 à 4.11 et Tableau 4.1). Parmi les paramètres du modèle qui sont inconnus en l'état actuel, nous allons montrer qu'il est possible d'estimer un certain nombre d'entre eux à partir des mesures disponibles.

Tableau 4.2. Propriétés du bois mesurées en laboratoire et paramètres physiques du modèle de transferts

Propriétés du bois mesurées en laboratoire	Paramètres physiques requis par le modèle
Propriétés directement mesurées - Isothermes de sorption $w_l = f(\varphi)$ - Masse volumique apparente de la matrice en bois sèche $\rho_o = 390 \text{ kg.m}^{-3}$ - Conductivité thermique apparente $\lambda^* = f(w_l)$ - Effusivité thermique apparente $E \equiv \sqrt{\rho_o c^* \lambda^*} = f(w_l)$ - Coefficient de diffusion de l'eau sous l'effet d'un gradient en teneur en eau liquide $D_{wt} + D_{wv} = 4.9 - 5.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2 . \text{s}^{-1}$ Propriétés estimées - Chaleur massique apparente de la matrice en bois sèche $c_o = 1276 \text{ J.kg}^{-1} . \text{K}^{-1}$	Paramètres mesurés - Masse volumique apparente de la matrice en bois $\rho_o = 390 \text{ kg.m}^{-3}$ - Chaleur massique apparente de la matrice en bois $c_o = 1276 \text{ J.kg}^{-1} . \text{K}^{-1}$ - Paramètres définissant les isothermes de sorption $w_{lm} = -1.3786 \times 10^{-5} T^2 + 0.0004558 T + 0.069$ $C = 0.0064 T^2 - 0.58 T + 22$ $K = 3.7143 \times 10^{-5} T^2 - 0.00077 T + 0.747$ Paramètres à déterminer - Conductivité hydraulique du milieu, $K_l = f(w_l)$ - Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'espace poreux, D_e - Coefficients λ_{sa} et λ_{la} définissant la conductivité thermique effective λ_o du milieu - Coefficients h_{int} , $h_{m,int}$, h_{ext} et $h_{m,ext}$ de transferts convectifs en surface Paramètres connus par ailleurs Pression atmosphérique, $P = 101325 \text{ Pa}$ Constante des gaz pour la vapeur d'eau, $R_v = 461.52 \text{ J.kg}^{-1} . \text{K}^{-1}$ Accélération gravitationnelle, $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ Masse volumique de la cellulose, $\rho_s = 1200 \text{ kg.m}^{-3}$ Masse volumique de l'eau liquide, $\rho_l = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ Chaleur massique de l'eau liquide, $c_l = 4181 \text{ J.kg}^{-1} . \text{K}^{-1}$ Chaleur massique de la vapeur d'eau, $c_v = 1868 \text{ J.kg}^{-1} . \text{K}^{-1}$ Chaleur latente de vaporisation, $L_v = 2,44 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}$

Deux domaines de teneur en eau liquide ont été différenciés : le domaine de l'eau liée ($w_l \leq 0.12 \text{ kg.kg}^{-1}$) et le domaine de l'eau libre ($w_l > 0.12 \text{ kg.kg}^{-1}$). Les calculs d'humidité relative et de succion capillaire (voire ses dérivées par rapport à la température et à la teneur en eau) ont été effectués à partir des isothermes de sorption (Eq. 4.12) et de la loi de Kelvin (Eq. 4.13). Les résultats obtenus sont :

	$w_l \leq 0.12 \text{ kg.kg}^{-1}$	$w_l > 0.12 \text{ kg.kg}^{-1}$
$\lambda_{sa} (\text{W.m}^{-1} . \text{K}^{-1})$	0.1053	0.1298
$\lambda_{la} (\text{W.m}^{-1} . \text{K}^{-1})$	0 (<i>imposé</i>)	0.0084
$D_{eo} (\text{m}^2 . \text{s}^{-1})$	3.905×10^{-5}	1.046×10^{-4}

La figure 4.11 montre une bonne concordance entre les mesures et les prédictions de conductivité thermique apparente réalisées à l'aide des modèles du Tableau 4.1. On arrive également à des estimations raisonnables de l'effusivité thermique : $E = \sqrt{\rho_o c^* \lambda^*}$ avec

$$c^* = c_s + c_l w_l + c_v w_v \quad (4.14)$$

Sur la figure 4.12 sont représentés les mesures disponibles et les estimations issues des modèles du Tableau 4.1 et de l'équation 4.14.

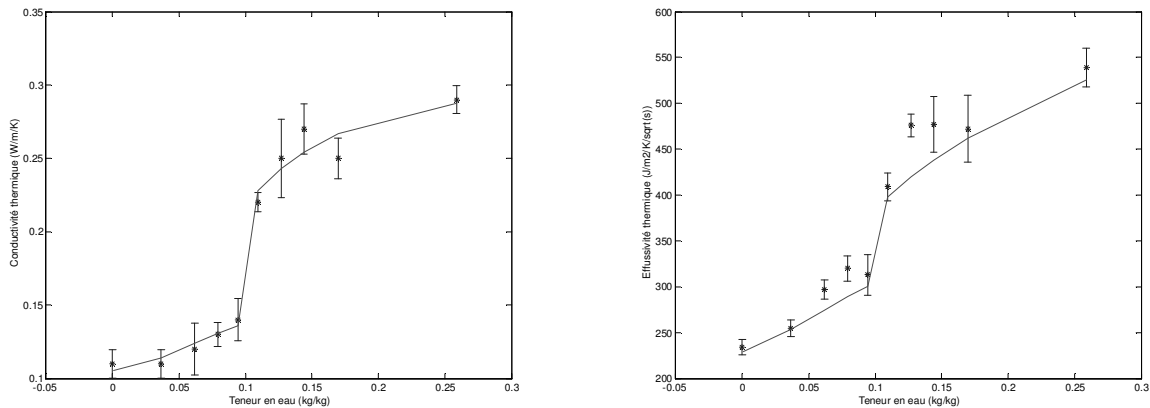


Figure 4.11. Conductivité thermique apparente du milieu : **Figure 4.12. Effusivité thermique apparente du milieu :** *mesures (points bleus) et modèle (ligne continue rouge).*

Par ailleurs, nous avons utilisé le modèle du tableau 4.1 pour estimer le coefficient D_{wv} de diffusion de la vapeur sous l'effet d'un gradient de teneur en eau liquide :

Les résultats obtenus (voir tableau ci-dessous) montrent une concordance frappante avec les mesures du coefficient global de diffusion de l'eau ($D_{wl} + D_{wv}$) effectuées en laboratoire. Ceci nous porte à penser que la conductivité hydraulique du milieu est négligeable face à la conductivité de la vapeur d'eau « $K_l \ll K_v$ ». Cette hypothèse sera adoptée par la suite.

		$w_l = 0.152 \text{ kg.kg}^{-1}$	$w_l = 0.164 \text{ kg.kg}^{-1}$
Mesures sur échantillon	$D_{wl} + D_{wv} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	5.4×10^{-9}	4.9×10^{-9}
Modèle	$D_{wv} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	5.5×10^{-9}	4.8×10^{-9}

3.1.4. Ecriture du modèle de transferts

Afin de mieux apprécier les contributions relatives de chacun des phénomènes contribuant au comportement thermo-hydrigue du mur, une écriture adimensionnelle du modèle que nous venons de décrire est proposée.

Le changement de variables est le suivant :

$$\tau = \frac{\alpha_{ref} t}{L_{ref}^2} ; \quad \zeta = \frac{x}{L_{ref}} ; \quad \vartheta = \frac{T - T_{ref}}{\Delta T_{ref}} \quad w = \frac{w_l - w_{ref}}{\Delta w_{ref}} ; \quad \pi_v = \frac{P_v - P_{ref}}{\Delta P_{ref}}$$

où α_{ref} et L_{ref} sont, respectivement, une diffusivité thermique et une dimension de référence. De même, f_{ref} ($f = T, w, P_v$) et Δf_{ref} , représentent des valeurs de référence qui peuvent être choisies arbitrairement. On notera que $\alpha_{ref} = \lambda_{ref} / (\rho_o c_{ref})$, où λ_{ref} et c_{ref} sont la conductivité thermique et la chaleur massique de référence.

Par ailleurs, on écrira :

$$D_{Tv} = \delta_T D_{wv} ; \quad D_{wl} = \delta_w D_{wv} ; \quad D_{\eta l} = \delta_v D_{Tv} = \delta_v \delta_T D_{wv}$$

$$\text{avec } \delta_T = \frac{\left(\frac{\partial \psi}{\partial T}\right)_{w_l} + \left(\frac{L_v - g \psi}{g T}\right)}{\left(\frac{\partial \psi}{\partial w_l}\right)_T} (K^{-1}); \quad \delta_w = \frac{K_l}{K_v} (-); \quad \delta_v = \frac{\delta_w}{\delta_T} \left(\frac{\partial \psi}{\partial T}\right)_{w_l} \left(\frac{\partial \psi}{\partial w_l}\right)_T^{-1} (-)$$

Le modèle simplifié (Palomo, 2005) suivant peut être retenu :

<p>Aux points $0 < x < L$:</p> $\begin{bmatrix} \gamma_{q1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \tau} \begin{bmatrix} \vartheta \\ w \end{bmatrix} = \frac{\partial}{\partial \zeta} \begin{bmatrix} \gamma_{q3} + Ko Pn Lu & Ko Lu \\ \gamma_{w3} Pn Lu & \gamma_{w4} Lu \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \zeta} \begin{bmatrix} \vartheta \\ w \end{bmatrix} \quad (4.15)$
<p>Au point $x = 0$:</p> $-\begin{bmatrix} \gamma_{q3} + Ko Pn Lu & Ko Lu \\ Pn & 1 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \zeta} \begin{bmatrix} \vartheta \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Bi_q & Ko Lu Bi_w \\ 0 & Bi_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vartheta \\ \pi_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Bi_q & Ko Lu Bi_w \\ 0 & 0 & Bi_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_{int} \\ \vartheta_{int} \\ \pi_{v,int} \end{bmatrix} \quad (4.16)$
<p>Au point $x = L$:</p> $-\begin{bmatrix} \gamma_{q3} + Ko Pn Lu & Ko Lu \\ Pn & 1 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \zeta} \begin{bmatrix} \vartheta \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Bi_q & Ko Lu Bi_w \\ 0 & Bi_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vartheta \\ \pi_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Bi_q & Ko Lu Bi_w \\ 0 & 0 & Bi_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_{ext} \\ \vartheta_{ext} \\ \pi_{v,ext} \end{bmatrix} \quad (4.17)$
<p>Au point $x = L/2$:</p> $-\begin{bmatrix} Pn & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Pn & 1 \\ \gamma_{q3} + Ko Pn Lu & Ko Lu & \gamma_{q3} + Ko Pn Lu & Ko Lu \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \zeta} \begin{bmatrix} \vartheta^{(-)} \\ w^{(-)} \\ \vartheta^{(+)} \\ w^{(+)} \end{bmatrix} = \vec{0} \quad (4.18)$
<p>et $\vartheta^{(-)} - \vartheta^{(+)} = 0$ (4.19)</p>

avec les nombres adimensionnels :

$$Lu = \frac{D_{wv}}{\alpha_{ref}} \text{ (Luikov)} ; \quad Ko = \frac{\rho_l L_v \Delta w_{ref}}{\rho_o c_{ref} \Delta T_{ref}} \text{ (Kossovitch)} ; \quad Pn = \frac{\delta_T \Delta T_{ref}}{\Delta w_{ref}} \text{ (Possnov)} ;$$

$$Bi_q = \frac{h L_{ref}}{\lambda_{ref}} \text{ (Biot - chaleur)} ; \quad Bi_w = \frac{h_m \Delta P_{ref} L_{ref}}{\rho_l D_{wv} \Delta w_{ref}} \text{ (Biot - masse)} ; \quad \eta = \frac{q L_{ref}}{\lambda_{ref} \Delta T_{ref}} \text{ (flux d'énergie)}$$

$$\gamma_{q1} = \frac{c^*}{c_{ref}} ; \quad \gamma_{q3} = \frac{\lambda_o}{\lambda_{ref}} ; \quad \gamma_{w2} = 1 ; \quad \gamma_{w3} = \gamma_{w4} = \frac{\rho_l}{\rho_o}$$

3.2. Validation expérimentale du modèle des transferts

Les expériences « in situ » présentées dans le paragraphe 2 vont nous servir à valider le modèle de transferts décrit par les équations (4.15). Pour nous affranchir dans un premier temps des inconnus (nombres de Biot et flux solaire absorbé) qui apparaissent dans les conditions aux limites, équations (4.16) et (4.17), nous remplacerons celles-ci par des conditions aux limites de type Dirichlet en température et en teneur en eau. Pour ce faire, il est nécessaire de modifier le domaine de définition du problème. On considère que la paroi s'étend entre les points 1 et 4 de la Fig. 4.1, où la température et l'humidité relative sont connues à tout instant grâce aux capteurs qu'on y a installés. Le modèle (4.15) s'applique donc à une paroi de 90mm d'épaisseur (au lieu de 130mm), avec comme conditions aux limites :

$$\begin{aligned} x=0 \quad \vartheta|_{x=0} &= \vartheta_{int}(t) \quad w|_{x=0} = w_{int}(t) \\ x=L \quad \vartheta|_{x=L} &= \vartheta_{ext}(t) \quad w|_{x=L} = w_{ext}(t) \end{aligned} \quad (4.20)$$

où $\vartheta_{int}(t)$ et $\vartheta_{ext}(t)$ sont les températures (adimensionnelles) mesurées par les capteurs situés aux points 1 et 4 respectivement. $w_{int}(t)$ et $w_{ext}(t)$ représentent les teneurs en eau associées à ces deux points. Elles sont calculées à partir des mesures correspondantes d'humidité relative et des isothermes de sorption.

La discrétisation spatiale des équations (4.15) est réalisée par la méthode de volumes finis, elle conduit au système matriciel d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} M_{qq} & 0 \\ 0 & M_{ww} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\vartheta}(t) \\ \bar{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{qq} & A_{qw} \\ A_{wq} & A_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\vartheta}(t) \\ \bar{w}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_q \\ E_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vartheta_{int}(t) \\ \vartheta_{ext}(t) \\ w_{int}(t) \\ w_{ext}(t) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$\bar{\vartheta}(n \times 1)$ et $\bar{w}(n \times 1)$ sont les vecteurs de température et de teneur en eau aux nœuds de la maille de discrétisation. Les matrices $M_{qq}(n \times n)$ et $M_{ww}(n \times n)$ résultent de la discrétisation des termes capacitifs de l'équation (4.15).

Les matrices $A_{qq}(n \times n)$, $A_{qw}(n \times n)$, $A_{wq}(n \times n)$ et $A_{ww}(n \times n)$ découlent de la discrétisation des termes diffusifs. Quant aux matrices $E_q(n \times 4)$ et $E_w(n \times n)$, elles représentent le couplage du système avec ses frontières. Toutes ces matrices dépendent de l'état thermo-hydrique du système.

L'intégration en temps des équations (4.21) se fait par une méthode de type Rosenbrock modifiée (Shampine *et al.* 1999). Parmi les sorties du modèle, seules la température et la teneur en eau aux points 2 et 3 de mesure feront l'objet de notre attention au vu de la validation expérimentale du modèle. Les valeurs des paramètres du modèle utilisées lors des simulations sont données dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3. Paramètres physiques du modèle de transferts

Masse volumique apparente de la matrice en bois $\rho_o = 390 \text{ kg.m}^{-3}$	Coefficients définissant la conductivité thermique effective λ_o
Chaleur massique apparente de la matrice en bois $c_o = 1276 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$	$\lambda_{sa} = 0.129 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$ $\lambda_{la} = 0.0084 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$
Paramètres définissant les isothermes de sorption	Pression atmosphérique, $P = 101325 \text{ Pa}$

$w_{lm} = -1.3786 \times 10^{-5} T^2 + 0.0004558 T + 0.069$ $C = 0.0064 T^2 - 0.58 T + 22$ $K = 3.7143 \times 10^{-5} T^2 - 0.00077 T + 0.747$ Coefficient de diffusion binaire de la vapeur d'eau dans l'air (D_o) et paramètre de tortuosité $D_o = 0.26 \times 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1} \quad (1/\tau) = 4.0255$	Constante des gaz pour la vapeur d'eau, $R_v = 461.52 J.kg^{-1}.K^{-1}$ Accélération gravitationnelle, $g = 9.81 m.s^{-2}$ Masse volumique de la cellulose, $\rho_s = 1200 kg.m^{-3}$ Masse volumique de l'eau liquide, $\rho_l = 1000 kg.m^{-3}$ Chaleur massique de l'eau liquide, $c_l = 4181 J.kg^{-1}.K^{-1}$ Chaleur massique de la vapeur d'eau, $c_v = 1868 J.kg^{-1}.K^{-1}$ Chaleur latente de vaporisation, $L_v = 2440000 J.kg^{-1}$
---	--

3.2.1. Simulation de référence n°1

Sur la figure 4.13 est représentée l'évolution au cours du temps de la température de la paroi aux points $x = 55mm$ et $x = 75mm$. Les lignes en continu représentent les mesures tandis que les lignes avec des croix correspondent aux simulations effectuées avec le modèle de transferts. On constate une excellente concordance entre mesures et simulations. Les écarts observés entre mesures et simulations sont la plupart du temps contenus dans l'erreur de mesure ($\pm 0.5^\circ C$).

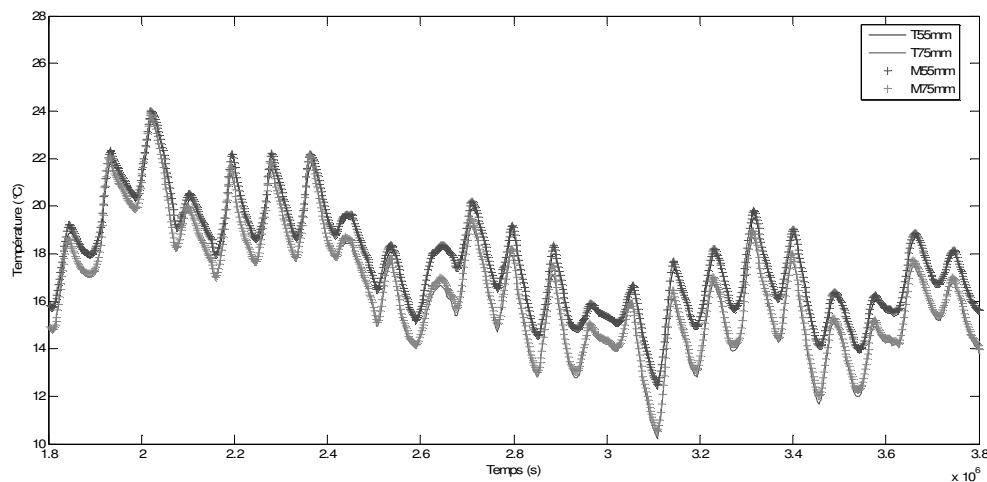


Figure 4.13. Evolution au cours du temps de la température aux points $x=55mm$ et $x=75mm$: Mesures (lignes continues) et simulations (croix).

L'évolution au cours du temps de la teneur en eau aux points $x = 55mm$ et $x = 75mm$ est représentée dans la Fig. 4.14. Cette fois-ci, les dynamiques des mesures et des simulations diffèrent significativement. Au point $x = 55mm$, même les tendances aux temps longs sont en désaccord. Les écarts entre simulations et mesures se situent la plupart du temps dans l'intervalle $\pm 10 mg/kg$ (erreur $\approx 6\%$). Au point $x = 55mm$, l'erreur peut atteindre jusqu'à 11%.

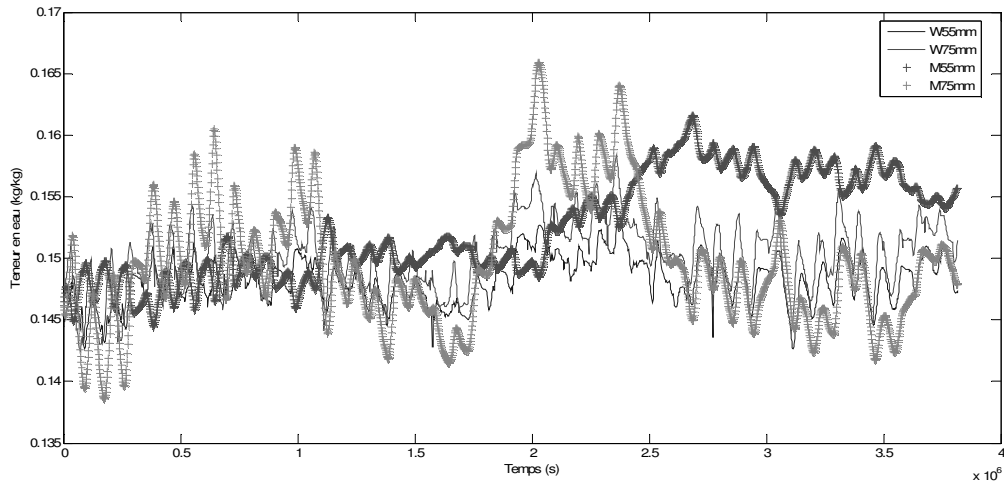


Figure 4.14. Evolution au cours du temps de la teneur pondérale en eau aux points $x=55\text{mm}$ et $x=75\text{mm}$: Mesures (lignes continues) et simulations (croix).

Le même type de remarques peut se faire par rapport à l'humidité relative. Les figures 4.15 et 4.16 montrent des différences significatives en termes de tendances et de dynamiques entre les simulations et les mesures. En valeur absolue, l'écart maximal rencontré est néanmoins de 5%.

Les équations de transferts de masse et d'humidité étant fortement couplées, il est surprenant que l'on puisse reproduire l'évolution thermique de la paroi avec une très bonne précision et n'être capable que de se caler sur l'ordre de grandeur pour ce qui est de l'humidité. Les erreurs dans la prédiction de l'évolution hydrique devraient se répercuter sur l'évolution thermique. On peut penser qu'une compensation d'erreurs vient expliquer cette contradiction apparente, mais on peut également soupçonner la qualité des mesures d'humidité. Les sections suivantes viennent appuyer cette hypothèse.

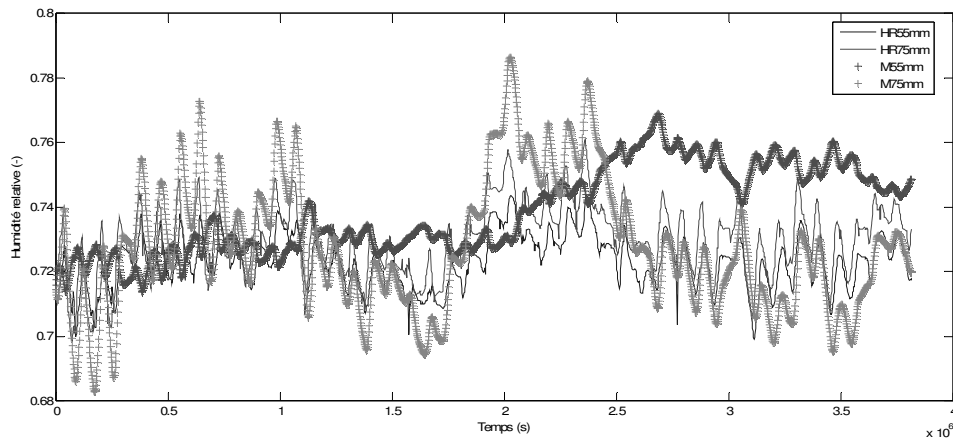


Figure 4.15. Evolution au cours du temps de l'humidité relative aux points $x=55\text{mm}$ et $x=75\text{mm}$: Mesures (lignes continues) et simulations (croix)

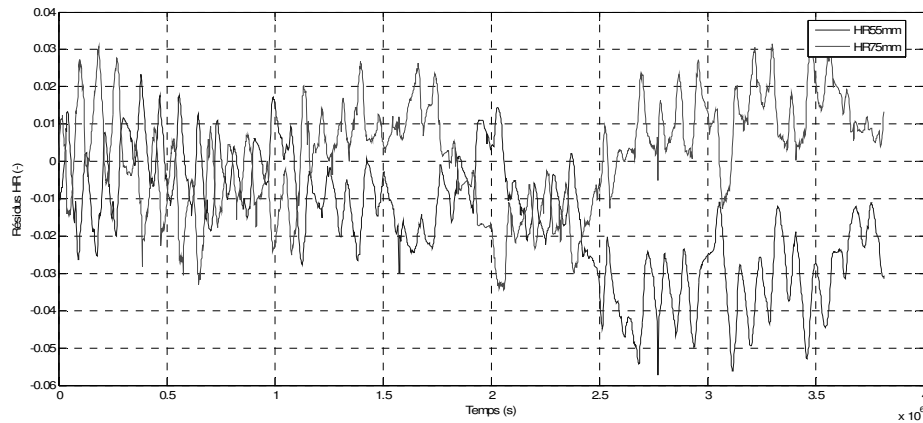


Figure 4.16. Ecarts entre mesures et simulations aux points $x=55\text{mm}$ et $x=75\text{mm}$.

3.2.2. Simulation de référence n°2

Les simulations précédentes ont été répétées en supposant l'absence de film imperméable dans la paroi. Une bonne concordance est à nouveau trouvée entre les mesures de température et les simulations. Les écarts observés restent en dessous de la précision des mesures ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). En ce qui concerne l'humidité, on note une sensible amélioration des résultats par rapport au cas précédent. Cette fois-ci, le modèle reproduit correctement la dynamique lente (tendances) et l'ordre de grandeur des mesures (Fig. 4.17). Par ailleurs, on constate une réduction significative des écarts. Les différences entre les mesures de teneur en eau et les simulations correspondantes se situent dans l'intervalle $[-4\text{mg/kg } 8\text{mg/kg}]$ (erreur $< 5-6\%$) la plupart du temps. Pour l'humidité relative, la différence entre mesures et simulations est presque tout le temps inférieure à 3%. Il faut néanmoins signaler que le modèle surestime en moyenne la teneur en eau (voire l'humidité relative).

L'amélioration nette des résultats par rapport au cas précédent (référence n°1) indiquerait soit l'absence, soit la dégradation du film imperméable au milieu de la paroi que l'on formalisera par la suite au travers d'une résistance interne aux transferts.

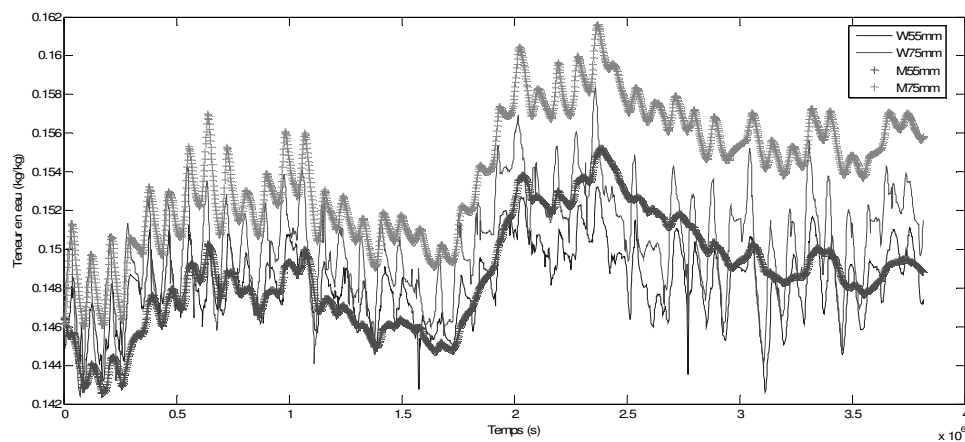


Figure 4.17. Evolution au cours du temps de la teneur pondérale en eau aux points $x=55\text{mm}$ et $x=75\text{mm}$: Mesures (lignes continues) et simulations (croix).

3.2.3. Un regard critique sur la qualité des mesures d'humidité

Bien que la simulation de référence n°2 (paroi sans film) conduite à des résultats tout à fait convenables en termes d'ordres de grandeur et des réponses à très basses fréquences (tendances), on constate que les mesures d'humidité (voire teneur en eau) ont des amplitudes de fluctuation à l'échelle de la journée bien plus fortes que celles des simulations correspondantes. Cette différence de comportement dynamique est probablement due à une implantation imparfaite (faute d'étanchéité par rapport à l'ambiance intérieure) des capteurs d'humidité dans le mur. L'analyse spectrale des mesures effectuées donne déjà une première indication dans ce sens. Dans la figure 4.18 sont représentés les spectres cumulés de puissance des mesures de température et de teneur en eau dans la paroi. En les comparant, on constate que les signaux en teneur en eau sont bien plus riches en fréquences que les signaux en température : 20% de la variance des signaux en teneur en eau se situe à des fréquences supérieures à 24h contre 10% pour les signaux en température ; à des fréquences supérieures à 12h, il n'y a plus d'information en température, alors qu'environ 5% de la variance des signaux en teneur en eau se place au-delà de cette fréquence. Ceci constitue un premier symptôme d'une perturbation dans la mesure de teneur en eau (voire humidité relative) car en général les temps caractéristiques de diffusion de la vapeur d'eau dans le milieu sont bien plus petits que ceux de la chaleur.

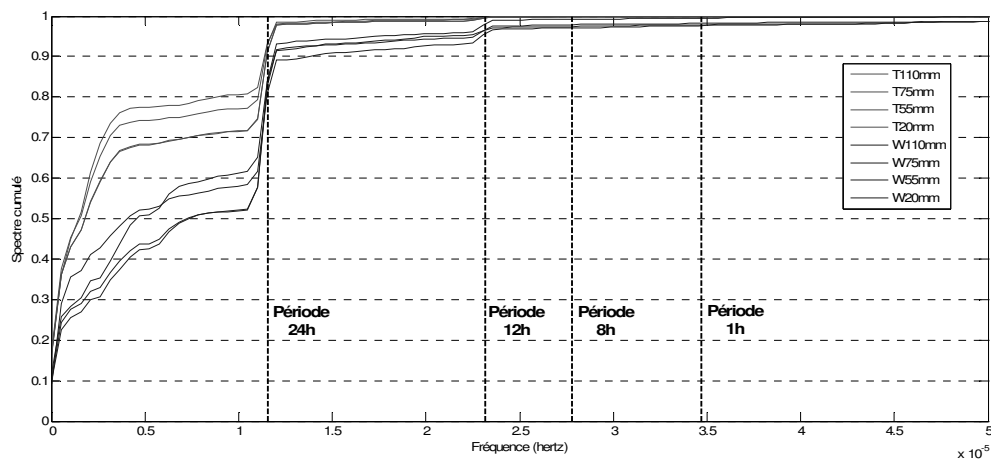


Figure 4.18. Spectre cumulé de puissance des mesures en température (lignes rouges) et en teneur en eau (lignes bleues).

Nous allons plus loin dans l'hypothèse d'une mauvaise mesure des humidités relatives à l'intérieur de la paroi en supposant qu'il existe une connexion vapeur directe entre les points de mesure et l'ambiance intérieure du bâtiment. Nous signalons que la paroi a été percée dès l'intérieur pour implanter les capteurs, la tête de ceux-ci étant logée dans une petite cavité creusée dans le bois. Même si des précautions ont été prise pour assurer une bonne étanchéité au niveau de la cavité, la vapeur d'eau peut se faufiler par le moindre recoin. Si cette connexion directe entre le capteur et l'ambiance intérieure domine les transferts, on devrait pouvoir représenter l'évolution de l'humidité aux points de mesure par un simple modèle d'état de la forme :

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{X}(t)}{dt} &= A\vec{X}(t) + B\vec{U}(t) \\ \vec{Y}(t) &= C\vec{X}(t) + D\vec{U}(t) \end{aligned} \quad \text{avec :} \quad \vec{Y}(t) = \begin{bmatrix} w_{55mm}(t) \\ w_{75mm}(t) \end{bmatrix} \quad \vec{U}(t) = \begin{bmatrix} w_{20mm}(t) \\ w_{110mm}(t) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

où $\vec{X} (n \times 1)$ est un vecteur d'état sans signification physique particulière. Les matrices $A (n \times n)$, $B (n \times 2)$, $C (2 \times n)$ et $D (2 \times 2)$ sont appelées matrice d'état, matrice de commande, matrice de sortie et matrice de gain direct respectivement. Notez qu'un modèle de ce type, s'affranchissant de la température en tant que force motrice des transferts de vapeur, ne peut être pertinent que si les gradients en teneur en eau dominent carrément les transferts. Pour que cela puisse être vrai, des mécanismes de transport autres que la diffusion à travers le bois doivent exister.

Le régime stationnaire du modèle (24) est donnée par :

$$Y = SU \Rightarrow \begin{bmatrix} w_{55mm} \\ w_{75mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{55,0} & s_{55,L} \\ s_{75,0} & s_{75,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{20mm} \\ w_{110mm} \end{bmatrix} \quad \text{avec :} \quad S = (D - CA^{-1}B) \quad (4.23)$$

On peut noter que les coefficients S sont en rapport avec les résistances au transfert de vapeur entre les points de mesure internes ($x = 55, 75mm$) et les points externes ($x = 20, 110mm$). Notons, par exemple, $r_{55,0}$ et $r_{55,L}$ les résistances qui relient le point $x = 55mm$ avec les points $x = 20mm$ et $x = 110mm$. Un simple bilan de masse en régime stationnaire nous permet d'écrire :

$$w_{55mm} = \frac{r_{55,L}}{r_{55,0} + r_{55,L}} w_{20mm} + \frac{r_{55,0}}{r_{55,0} + r_{55,L}} w_{110mm}$$

On a donc :

$$s_{55,0} = \frac{r_{55,L}}{r}; \quad s_{55,L} = \frac{r_{55,0}}{r}; \quad s_{75,0} = \frac{r_{75,L}}{r}; \quad s_{75,L} = \frac{r_{75,0}}{r} \quad (4.24)$$

où $r = r_{55,0} + r_{55,L} = r_{75,0} + r_{75,L}$ représente la résistance totale au transfert de vapeur entre les points $x = 20mm$ et $x = 110mm$. Si l'on note $\beta_1 \dots \beta_n$ les valeurs propres de la matrice $A (n \times n)$, les temps caractéristiques (constantes de temps) du modèle sont donnés par : $\tau_i = -1 / \beta_i$ ($i = 1 \dots n$).

Un modèle (4.22) à l'ordre 3 ($n = 3$) a été identifié sur les mesures disponibles. La méthode dite de prédiction d'erreur a été utilisée pour estimer l'ensemble des paramètres du modèle (coefficients des matrices A, B, C et D). La figure 4.19 montre la bonne qualité des résultats obtenus, les mesures et les simulations concordant cette fois-ci à moins de 2 mg/kg près. Par ailleurs, les constantes de temps du modèle sont : $\tau = 1.4h, 3.4h, 88.3h$, et la matrice de couplages statiques correspondante est :

$$S = \begin{bmatrix} 0.2066 & 0.1419 \\ 0.2184 & 0.3090 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} r_{55,L} = 1.4562 r_{55,0} \\ r_{75,0} = 1.4147 r_{75,L} \end{cases}$$

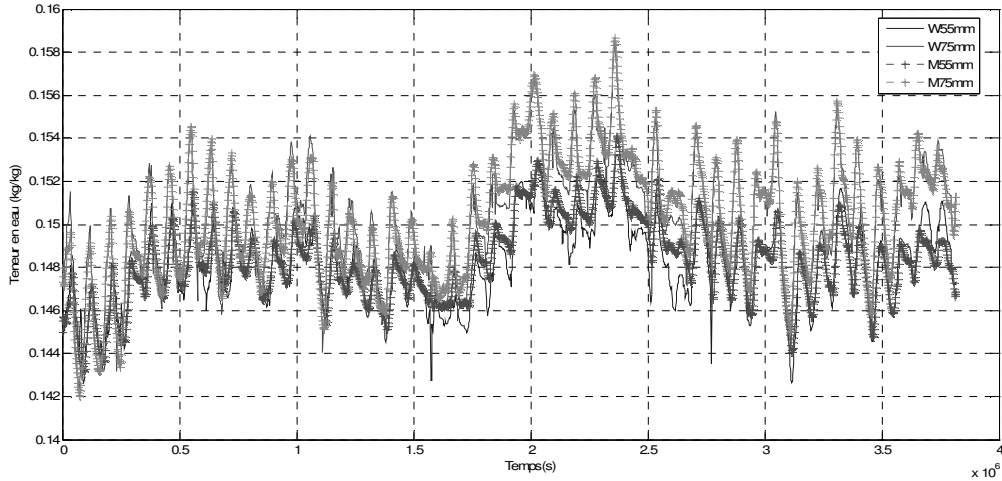


Figure 4.19. Evolution au cours du temps de la teneur pondérale en eau aux points $x=55\text{mm}$ et $x=75\text{mm}$: Mesures (lignes continues) et simulations (croix).

En conclusion, Le modèle de transferts proposé (modèle de référence) permet de reproduire convenablement l'évolution thermo-hydrrique de la paroi. Les différences entre mesures et simulations sont contenues la plupart du temps dans les intervalles d'incertitude des mesures. Le film imperméable situé au milieu de la paroi est soit dégradé, soit mal posé.

Les mesures d'humidité relative au sein de la paroi sont biaisées. Les cavités où résident les têtes des capteurs ne sont pas complètement étanches à la vapeur d'eau. L'humidité relative dans la cavité est alors le résultat de deux mécanismes distincts de transfert : la diffusion de la vapeur dans le bois et le transfert de vapeur entre l'ambiance intérieure du bâtiment et la cavité qui loge le capteur. Néanmoins, les mesures effectuées permettent de situer l'ordre de grandeur de la teneur en eau dans la paroi. Aussi, les tendances d'évolution sur des temps longs semblent bien identifiables.

3.3. Modèles de transfert « dégradés » à précision semblable à celle du modèle complet

Un modèle de transferts couplés de masse et d'humidité a été introduit et validé expérimentalement dans la section précédente. En variables naturelles, il s'écrit :

$$\begin{aligned} \rho_o c^* \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda_o + \rho_l L_v D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l L_v D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \right) \\ \rho_o \frac{\partial w_l}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \right) \end{aligned} \tag{4.25}$$

À l'intérieur du domaine de définition du problème. Les conditions aux limites s'écrivent :

$$\begin{aligned}
-\lambda_o \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,L} &= \alpha_{x=0,L} \varphi_{x=0,L} - h_{x=0,L} (T_{x=0,L} - T_\infty) \\
-\rho_l D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,L} - \rho_l D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \Big|_{x=0,L} &= -h_{m,x=0,L} (P_{v,x=0,L} - P_{v,\infty})
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Ce modèle va être réexaminé ici en vue d'identifier l'ensemble des simplifications qui peuvent s'opérer sur lui sans dégrader significativement sa précision. Bien entendu, l'objectif à terme est de trouver des structures mathématiques parcimonieuses et justes adaptées à la caractérisation « in situ » des parois en bois massif.

3.3.1. Découplage partiel des transferts de chaleur et d'humidité

Lors de l'analyse dimensionnelle réalisée, on a pu constater que le rapport adimensionnel $KoLu / (\gamma_{q3} + KoPnLu)$ du modèle (4.15) prenait des valeurs inférieures à 0,18. Ce rapport mesure le poids relatif des transferts d'enthalpie provoqués par les gradients de teneur en eau face aux transferts induits par des gradients thermiques : $KoLu \frac{\partial w}{\partial \xi}$ vs. $(\gamma_{q3} + KoPnLu) \frac{\partial \vartheta}{\partial \xi}$

On constate donc une dominance des derniers par rapport aux premiers sans que ceux-ci soient pour autant négligeables, sauf si $\frac{\partial w}{\partial \xi} < 0.1 \frac{\partial \vartheta}{\partial \xi}$

Dans ce cas, on pourra négliger les transferts d'enthalpie induits par les gradients de teneur en eau. L'équation (4.25) devient alors :

$$\begin{aligned}
\rho_o c^* \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda_o + \rho_l L_v D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\
\rho_o \frac{\partial w_l}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_l D_{wv} \frac{\partial w_l}{\partial x} \right)
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Le couplage de l'équation de conservation de l'énergie avec l'humidité ne se fait qu'à travers la conductivité apparente du milieu : $\lambda^* = \lambda_o + \rho_l L_v D_{Tv}$. Par la suite, nous ferons référence à ce modèle comme « modèle à découplage faible », MDF.

La pertinence de ce découplage va être montrée d'abord par comparaisons des simulations issues du modèle MDF avec celles du modèle de référence. Ensuite, le MDF sera confronté aux mesures.

3.3.2 Comparaison du MDF au modèle de référence

Comme précédemment, les simulations se font avec des conditions aux limites de type Dirichlet en température et en teneur en eau. Les valeurs des paramètres physiques sont données dans le Tableau 4.3. Les deux modèles sont sollicités par les mesures de température et de teneur en eau effectuées aux points $x = 20mm$ et $x = 110mm$.

Dans les deux cas, on considère une paroi sans film imperméable.

La qualité du MDF est jugée à travers l'examen des écarts entre les simulations provenant des deux modèles.

Sur la figure 4.20 est représentée l'évolution au cours du temps des températures mesurées et simulées aux points $x = 55mm$ et $x = 75mm$. Pareillement, les figures 4.21 représentent l'évolution au cours du temps des teneurs en eau mesurées et simulées. Si on compare ces résultats aux résultats de la simulation de référence, on conclut que le MDF s'accorde aux mesures aussi bien que le modèle de référence.

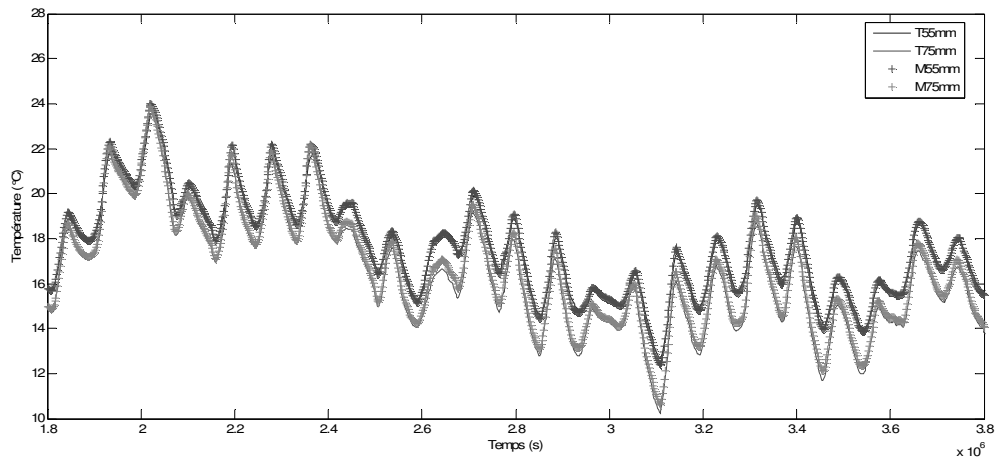


Figure 4.20. Evolution au cours du temps de la température aux points $x=55mm$ et $x=75mm$: Mesures (lignes continues) et simulations (croix).

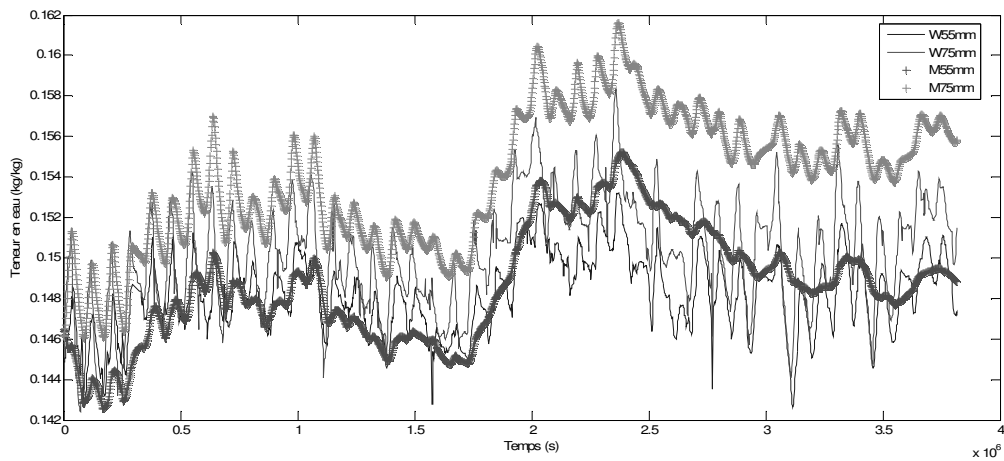


Figure 4.21. Evolution au cours du temps de la teneur pondérale en eau aux points $x=55mm$ et $x=75mm$: Mesures (lignes continues) et simulations (croix).

3. 4. Modèle de simulation du comportement hygrothermique réel

Lors de la modélisation hygrothermique de la paroi en bois massif sur la section 3-1 et 3-2, les simulations se font avec des conditions aux limites de type Dirichlet en température et en teneur en eau. Les modèles sont sollicités par les mesures de température et de teneur en eau effectuées aux points $x = 20\text{mm}$ et $x = 110\text{mm}$. Dans les deux cas « modèle de référence et MDF », nous n'avons pas pris en compte ni les conditions aux limites sur les deux cotés de la paroi, ni le profil de madrier et l'existence de feutre polypropylène entre madriers.

Dans cette section, nous avons simulé un modèle du comportement hygrothermique réel, en appliquant le modèle MDF, que nous avons jugé suffisamment pertinent, sur une paroi verticale infinie d'épaisseur L . Elle sépare deux ambiances, intérieure et extérieure, avec lesquelles elle échange de l'énergie (convection, rayonnement) et de la vapeur d'eau (convection). Nous insistons ici sur le film de colle placé au milieu de la paroi et qui divise son épaisseur en deux, un feutre de polypropylène est placé entre les deux madriers.

Pour réaliser les simulations bidimensionnelles, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics™. C'est un logiciel avancé pour la modélisation et la simulation de tout processus physique décrit par des équations aux dérivés partielles. Un des principaux avantages de ce logiciel est sa capacité de coupler et de résoudre simultanément les équations.

Par rapport au modèle MDF (Eq. 4.25), la simulation du comportement hygrothermique réel « réalisée en utilisant le logiciel COMSOL » permet, d'une part d'appliquer des conditions aux limites mixtes sur les deux cotés de la paroi, et d'autre part d'évaluer le transfert de masse et d'énergie sur une paroi en bois massif contre collé, il prend en compte le profil de madrier et la présence du feutre polypropylène entre madrier.

En premier temps et à partir de l'interface graphique interactive de COMSOL, nous avons dessiné la paroi « madriers contrecollés avec joints de feutre » en 2D à l'échelle réelle (Figure 4.22), Ensuite, nous avons décrit les équations de transfert de masse et d'énergie du modèle MDF pour chaque partie de paroi. Les paramètres physiques du modèle de transferts utilisés pour chaque sous domaine sont présentés sur le tableau 4.2.

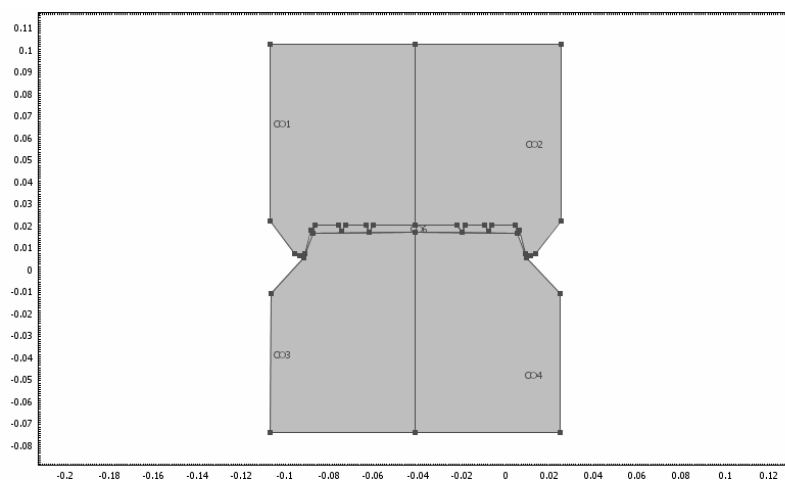


Figure 4.22 : Représentation de paroi en bois massif sur l'interface graphique de COMSOL

Nous avons quantifié les conditions aux limites mixtes (équations 4.26) sur les deux cotés du mur en utilisant les fichiers de mesures réalisés sur site pour la température et l'humidité relative. La température et la teneur en eau initiales sont également appliquées sur les quatre points de mesure au début de la simulation numérique (Figure 4.23).

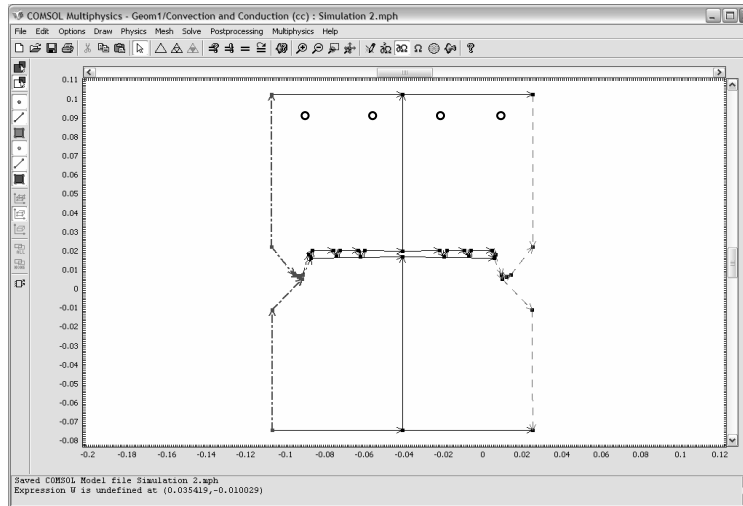


Figure 4.23 : application des conditions aux limites sur les deux cotés de paroi.

La simulation du comportement hygrothermique a été réalisée sur une période de trois mois (octobre, novembre et décembre 2005).

Les premiers résultats de simulation du comportement hygrothermique sont représentés sur la figure 4.24

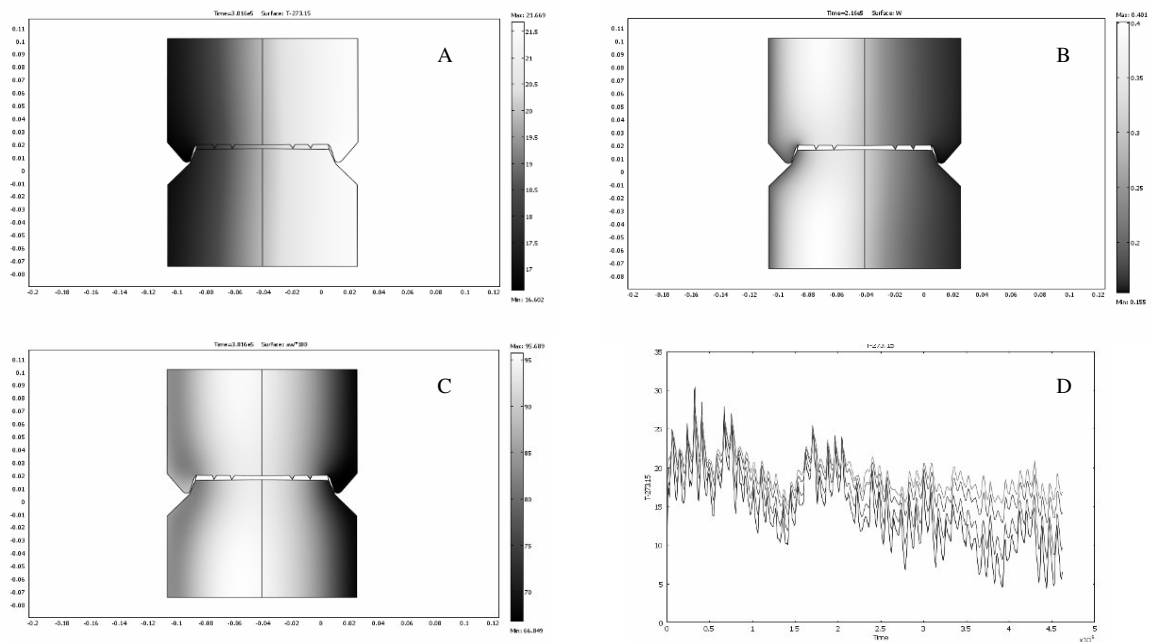


Figure 4.24 : résultats de simulation du comportement hygrothermique sur une paroi en bois massif
 A, B,C) profils de température de teneur en eau et d'humidité relative respectivement à l'instant $3,8 \cdot 10^5$ s,
 D) simulation de l'évolution de la température sur les quatre points pour la période d'essai.

Sur la figure 4.25 est représentée, l'évolution au cours du temps des températures mesurées et simulées aux points ($x = 25 \text{ mm}$, $x = 55 \text{ mm}$, $x = 75 \text{ mm}$ et $x = 105 \text{ mm}$). On constate une excellente concordance entre les mesures et la simulation, les écarts observés entre mesures et simulations sont la plupart du temps contenus dans l'erreur de mesure ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). Ces commentaires sont à rapprocher de ceux déjà faits à partir de la simulation MDF en situation simplifiée pour les échanges et en monodimensionnel.

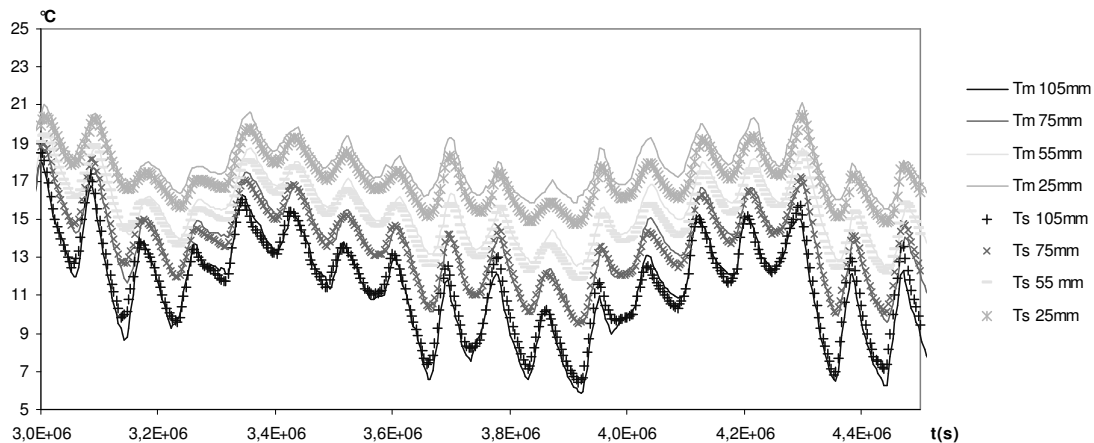


Figure 4.25 : évolution au cours du temps de la température aux points $x=25 \text{ mm}$, $x=55 \text{ mm}$, $x=75 \text{ mm}$ et $x=105 \text{ mm}$, Mesures (lignes continues) et Simulations (croix).

Pareillement, l'évolution au cours du temps de l'humidité relative mesurée et simulée aux points ($x=25 \text{ mm}$, $x=55 \text{ mm}$, $x=75 \text{ mm}$ et $x=105 \text{ mm}$) est représentée sur la figure 4.26, on trouve que les simulations reproduisent correctement la tendance et l'ordre de grandeur des mesures. Surtout, sur le point le plus proche de l'intérieur ($x=25 \text{ mm}$). Les écarts entre mesures et simulations sur les points $x=55 \text{ mm}$ et $x=75 \text{ mm}$ sont la plupart du temps contenus dans l'erreur de mesure ($\pm 3\%$). En valeur absolue, l'écart maximal rencontré sur le point $x = 105 \text{ mm}$ est néanmoins de 7%. Nous avons indiqué sur la section 3.2 que cette différence est probablement due à une fuite d'étanchéité par rapport à l'ambiance intérieure.

On conclut que la simulation de comportement hygrothermique permet de reproduire convenablement l'évolution hygrothermique réelle de la paroi en bois massif contrecollé verticalement avec joint de feutre entre madriers. Ce modèle sera intégré dans un modèle numérique d'évolution hygrothermique dans un bâtiment en bois massif.

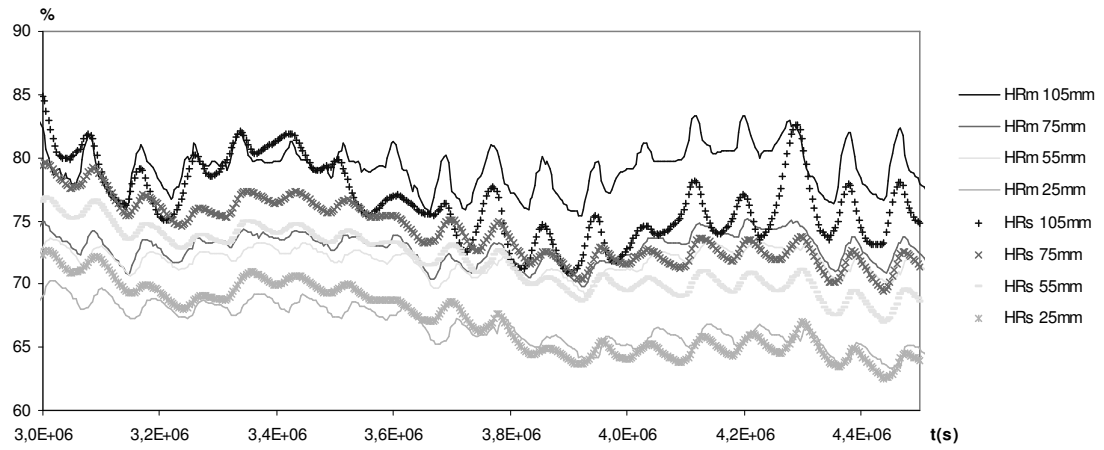


Figure 4.26 : évolution au cours du temps de l'humidité relative aux points ($x = 25$ mm, $x = 55$ mm, $x = 75$ mm et $x = 105$ mm), Mesures (lignes continues) et simulations (croix).

3.4.1. Représentation en modélisation 2D

Nous avons effectué une étude thermographique sur un bâtiment BM afin de comparer les résultats de simulation numérique avec la température de surface de la paroi BM avec joint de feutre entre madriers. Sur la figure 4.27 sont présentées les photos Infrarouge de la façade ouest du bâtiment B.BU ; on observe que la température du bois est inférieure à celui du joint entre madriers, nous retrouvons que le comportement global de la paroi diffère du modèle « unidirectionnel » construit à partir des seules caractéristiques thermiques du matériau bois.

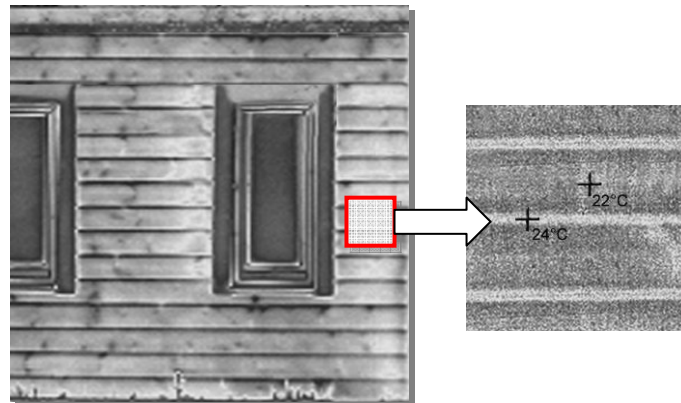


Figure 4.27 : Image thermographique sur un mur BM

La simulation numérique réalisée en utilisant le modèle de comportement hygrothermique et le logiciel de COMSOL FEMLAB[®] en régime permanent confirme ces résultats. Il montre que le transfert thermique dans un mur en bois massif varie sur le même coup vertical (figure 4.28). Dans le modèle de référence et le modèle MDF, on a supposé que les transferts de masse et d'énergie dans la paroi sont monodimensionnels. Les résultats de simulation de comportement et les photos IR montrent que ces transferts sont strictement bidimensionnels.

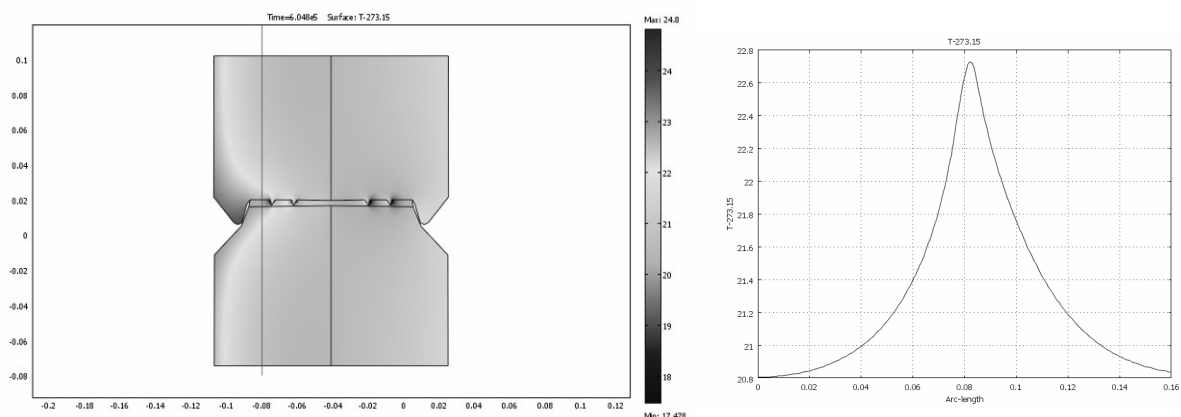


Figure 4.28 : A) simulation numérique du transfert thermique à travers un mur BM, B) coupe verticale de variation de la température dans la paroi BM.

3.4.2. Effet observé en régime permanent, du joint de colle interne aux madriers

Nous avons trouvé dans le chapitre 3 que le joint de colle joue un rôle très important sur le transfert de masse dans la paroi BM en régime stationnaire. Nous avons montré expérimentalement que la colle joue le rôle de résistance hydrique vis-à-vis des transferts de vapeur d'eau.

La comparaison réalisée dans ce chapitre entre le modèle MDF et les mesures sur site en régime dynamique montre que cet effet est moins important, et même négligeable. Sur la figure 4.29 est représentée la variation de la masse dans une paroi BM en régime dynamique en utilisant le modèle de comportement hygrothermique. Il confirme que le transfert de masse est bidimensionnel et la résistance hydrique joue un rôle moins important sur le transfert de masse en régime variable. On constate que la présence de lame de colle dans les madriers ne change pas le caractère « respirant » de ce type de construction.

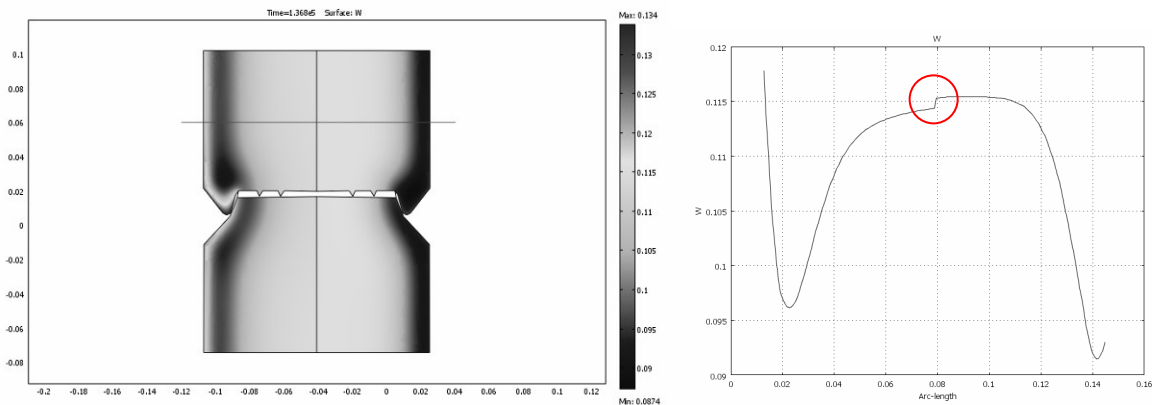


Figure 4.29 :

- A) simulation numérique du transfert de masse à travers un mur BM,**
- B) coupe horizontale montre l'effet du joint de colle sur le transfert de masse en régime variable.**

3.4.3. Effet de la régulation hydrique de la paroi BM

Dans les deux premiers chapitres, nous avons trouvé un niveau de confort hydrique très satisfaisant pendant la période d'hiver comme pendant la période chaude pour la plupart des MBM. Afin de déterminer les grandeurs caractérisant les transferts de masse et les propriétés d'équilibre du matériau sur la régulation hydrique à l'intérieur du bâtiment, nous avons réalisé une simulation numérique sur une paroi en bois massif contrecollé avec joint de colle entre madriers sur 7 jours à l'intervalle d'une heure. La température sur les deux côtés de mur maintenue à 20°C, l'humidité relative à l'extérieur est à 55% et l'humidité relative à l'intérieur varie pendant la journée comme montre la figure 4.30B.

Les résultats de la simulation numérique réalisée sont représentés sur la figure 4.30A ; elle montre que la variation d'humidité est plus importante sur les premiers centimètres de paroi, on conclut

que la paroi en bois massif joue un rôle de régulateur hydrique à l'intérieur du bâtiment dans des conditions normales d'utilisation.

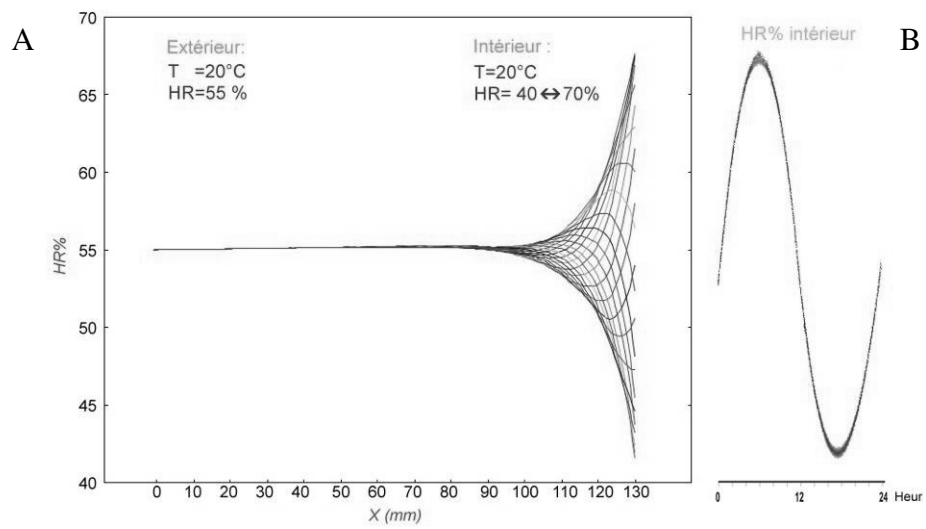


Figure 4.30 : A) Evolution de l'humidité relative dans une paroi en bois massif dont l'humidité relative varie à l'intérieur de bâtiment.

B) Evolution au cours du temps de l'humidité relative à l'intérieur.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié sur site (bâtiment CBC), une paroi, faisant partie d'un bâtiment en bois massif, contre collée verticalement. Les 6 capteurs de température et d'humidité relative ont été placés à l'intérieur de la paroi afin de suivre son évolution thermo-hydrrique au cours du temps. De plus, des capteurs de mesure de la densité de flux solaire global sur la paroi et de température et d'humidité relative de l'air ont été installés de part et d'autre de la paroi. L'évolution thermo-hydrrique de la paroi a été suivie pendant plus d'un an.

Nous avons proposé en premier temps, un modèle de transferts thermo hydrrique résultant d'un modèle classique de transport couplé de masse et de chaleur de type De Vries – Luikov couramment utilisé sur les outils de calcul thermo-hydrrique de l'enveloppe de bâtiment (modèle de référence). Il permet de reproduire convenablement l'évolution thermo hydrrique de la paroi. Les différences entre mesures et simulations sont contenues, la plupart du temps, dans les intervalles d'incertitude des mesures.

Le modèle de référence a été ensuite, soumis à différents types de dégradations en vue d'une éventuelle simplification du processus ultérieur de caractérisation « in situ » des parois en bois, un découplage partiel entre les équations de conservation de l'énergie et de la masse a été opéré. Les transferts d'enthalpie liés aux transferts de vapeur et provoqués par les gradients en teneur en eau ont été négligés face aux transferts induits par des gradients de température. Les gradients thermiques restent le seul moteur des transferts dans l'équation de conservation de l'énergie du modèle noté MDF, le couplage avec la teneur en eau se faisant uniquement à travers les coefficients de transferts (conductivité thermique apparente et capacité thermique effective du milieu). L'équation de conservation de la masse reste intacte.

Le modèle de référence et le modèle MDF ont été comparés entre eux et confrontés aux mesures. Les résultats obtenus indiquent que la simplification contenue dans le modèle MDF est tout à fait pertinente.

Enfin, une simulation de comportement hygrothermique a été réalisée en utilisant le modèle MDF sur l'ensemble de paroi en bois massif contrecollé avec joint de feutre entre madriers.

Le modèle de comportement hygrothermique de la paroi en bois massif contre collé empilé est donc validé à partir des mesures effectuées sur site ; il permet de bien présenter le transfert de chaleur et de masse à travers une telle paroi composite. Ce modèle sera intégré dans un outil de simulation de comportement hygrothermique d'un bâtiment en bois massif qui fait l'objet de nos développements actuels.



Conclusions et perspectives



Conclusions générales

Le bois, matériau renouvelable, nécessite peu d'énergie pour être mis en œuvre au cours des étapes d'une construction. Intégré à l'enveloppe d'un bâtiment, ce matériau permet, de par ses bonnes qualités thermiques, de bénéficier d'un très bon confort intérieur et de réaliser des économies d'énergie lors de l'exploitation du bâtiment. Le développement de la construction bois constitue un enjeu fondamental et une réponse assez efficace pour la réduction des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment. Mais il convient aussi de rester proche des préceptes liés à la gestion durable du patrimoine forestier.

Le travail présenté dans ce mémoire avait deux objectifs principaux :

- Le premier consistait à évaluer les performances énergétiques réelles de constructions en Bois Massif, et à les comparer à la fois, aux calculs réglementaires RT2000 et aux valeurs calculés avec les méthodes usuelles.
- Le deuxième était de formaliser cette connaissance par un modèle de transferts couplés de masse et de chaleur dans une paroi en bois massif contrecollé verticalement avec joint de colle entre madriers.

Ceci a été décliné en diverses actions et à trois échelles de réflexion.

1) L'analyse in situ des performances thermiques et énergétiques réalisées sur 20 constructions en bois massif montre un niveau de confort hygrothermique très satisfaisant pendant la période de chauffage comme pendant les périodes les plus chaudes. A conditions égales, la consommation mesurée pour le chauffage des maisons en bois massif pendant la période de chauffage est en moyenne de 15% inférieure à celle calculée par la méthode de la RT2000.

Par ailleurs, on peut observer à partir des mesures de consommation sur les 20 maisons MBM, que :

- la moyenne générale de ces consommations pour le chauffage est de 85 kWh/m^2 ,
- seules 3 MBM, dépassent une valeur de 140 kWh/m^2 ,
- plus d'un tiers (soit 7 MBM) ont une consommation annuelle mesurée pour le chauffage inférieure à 60 kWh/m^2 , ce qui correspond à un très bon niveau de performance énergétique par rapport à l'habitat standard.

L'influence de l'épaisseur du mur sur la consommation d'énergie n'est pas très marquée par rapport aux autres critères. L'effet d'atténuation thermique et de confort d'été des maisons en bois massif est très insuffisamment traduit par les résultats des calculs de T_{ic} comme le montre le fort écart entre les valeurs mesurées sur 20 sites et les valeurs de T_{ic} calculées pour ces mêmes maisons.

Tant par sa méthode que ses données de calcul, la RT2000 prend assez mal en compte le comportement et les performances réelles de bâtiments à isolation répartie et inertie thermique. En particulier, les qualités réelles de constructions Bois à ossature massive sont mal traduites par les 3 critères de consommation, coefficient de déperditions $U_{bât}$ et confort d'été. Le critère « garde fou » qui caractérise la paroi en régime thermique permanent est sûrement bien adapté à l'évaluation de parois

légères (faible amortissement et faible déphasage des différents flux) mais s'avère inadapté à l'évaluation des performances de parois lourdes comme les parois en bois massif et représente une indication incomplète sur la qualité thermique réelle de ces solutions.

2) Les résultats d'une campagne de mesure menée sur le confort hygrothermique et la qualité de l'air dans deux bâtiments tests en bois massif à usages différents en l'absence de ventilation mécanique montre que :

- Le confort thermique est optimal dans le bâtiment d'habitation tant pendant la période de chauffage que pendant les périodes chaudes. Comparé à la zone de confort basée sur la norme proposée par Brager, on mesure bien le maintien et l'adaptation permanente des niveaux thermiques intérieurs. Par contre, dans les bâtiments à usage de bureaux, on trouve un taux de surchauffe trop important et une difficulté à maintenir le confort thermique.
- Dans le bâtiment d'habitation, la charge d'humidité est dans la zone « nuit » supérieure à celle de la zone « jour », observation sûrement liée à une moindre ventilation naturelle dans les chambres. Dans le bâtiment de bureaux, la charge d'humidité est supérieure dans la salle de réunion pendant la période froide ($T_{ext} \leq 5^\circ\text{C}$) à celle des autres bureaux, mais elle reste toujours inférieure à celle du bâtiment d'habitation. Dans tous les cas, il est important d'assurer un temps minimum et régulier d'ouverture d'ouvrants pour renouveler l'air dans ces locaux.
- Le taux de confort basé sur les normes ASHRAE 55a-1995 et NF ISO 7730 corrigées est très satisfaisant pour les deux bâtiments pendant la période Hiver (chauffage) ; cette indication est aussi vérifiée à l'échelle de l'étude des 20 maisons. Le taux de « sur chauffe » en période Eté atteint 25% du temps de mesure pour le bâtiment d'habitation et 60% pour le bâtiment de bureaux. On en conclut que le taux de confort dans les maisons en bois massif est lié à l'usage du bâtiment.
- Les mesures de qualité d'air intérieur (QAI) montrent que la concentration en CO_2 dans le bâtiment d'habitation est maintenue à un niveau satisfaisant (taux de CO_2 moyen de 580 ppm) par rapport aux valeurs de référence. Par ailleurs, le taux de CO_2 dans le bâtiment de bureaux varie bien avec le nombre d'occupants. En particulier, un taux de CO_2 trop élevé est relevé dans un bureau de « faible volume » en comparaison au bureau « principal » ; nous estimons que cette concentration élevée est ici liée directement à l'absence d'une ventilation mécanique modulable indispensable pour ce type de bâtiments.
- Le taux de renouvellement d'air dans ces bâtiments en madriers bois massif empilés est très variable, allant de 0,14 à 1,15 volume par heure en fonction de l'exposition au vent et vitesse du vent mesurée. La méthode de dépression utilisée pour mesurer la perméabilité du bâtiment d'habitation, montre que la perméabilité moyenne à 4 Pa (I_4) est égale à $1,32 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; ratio prenant en compte le volume de l'habitation et les surfaces donnant sur l'extérieur. Cette valeur est légèrement supérieure à la valeur (I_4)

de référence demandée par la RT 2000, elle correspond à la valeur par défaut de la réglementation. Il sera donc indispensable de sensibiliser les constructeurs de maisons Bois Massif à la nécessité de réduire les entrées d'air au niveau des ouvrants et de limiter tous les défauts d'étanchéité aux liaisons.

3) Pour bien comprendre les comportements hygrothermiques des constructions en bois massif, une étude plus détaillée à l'échelle de mur et des constituants de paroi a été réalisée.

La caractérisation hygrothermique d'un mur en madriers bois massif empilés, « madriers contrecollés verticalement avec joint de colle entre madriers » met en évidence trois flux traversant une telle paroi par deux chemins parallèles avec une hypothèse de transferts unidirectionnels.

Les propriétés physiques de chacun des éléments constitutifs de la paroi ont été déterminées. L'isotherme de sorption a été obtenue par l'utilisation de la méthode statique des solutions salines saturées. La méthode du volumétre à mercure a été utilisée pour estimer la masse volumique du bois. Les propriétés thermiques du bois ont été mesurées dans la direction des fibres et dans la direction perpendiculaire par les méthodes du fil chaud et du ruban chaud respectivement. Il est ressorti de cette étude expérimentale la forte dépendance des propriétés thermiques du bois avec l'humidité.

La méthode gravimétrique statique a été utilisée pour estimer le coefficient de diffusion de vapeur d'eau à travers la paroi ; on remarque une forte résistance au transfert de vapeur au niveau du joint de colle. Nous pouvons retenir que la présence d'un joint de colle ralentit fortement le passage de vapeur d'eau dans le bois ; cette résistance peut avoir comme effet négatif la formation de « zones humides » au milieu de paroi.

La perméabilité à l'air a été mesurée à l'aide du perméamètre TREFLE ; deux profils de madriers et 3 types de joints entre madriers sont testés, les résultats montrent que le débit d'air à travers un mètre linéaire de joint entre madriers est proche de celui mesuré à travers un m² de bois massif, et 10 fois supérieur à celui traversant 1 m² de bois « contre collé ». On en conclut que l'influence de l'épaisseur de madrier sur le débit d'air à travers le bois reste très faible ; compte tenu de la forte perméabilité, c'est au niveau du joint en feutre que s'effectuera principalement l'écoulement aéraulique.

Les valeurs de perméabilité obtenues en laboratoire à l'échelle de l'échantillon, sont de beaucoup inférieures à celles obtenues à l'échelle de bâtiment ; on peut constater que les essais de perméabilité réalisés au laboratoire dans des conditions optimales de serrage de madriers permettent de comparer l'influence du profil, l'épaisseur de paroi ou du type de joint sur la perméabilité, mais ils ne donnent pas la perméabilité réelle globale à l'échelle du bâtiment. Comme on l'a vu précédemment, cette perméabilité globale de l'enveloppe résulte principalement des défauts d'étanchéité et ensuite, des entrées d'air au niveau des empilements entre madriers.

Les valeurs et les propriétés obtenues à cette échelle ont servi de données de base à un modèle de transport couplé de masse et de chaleur à l'échelle de la paroi. Cette paroi faisant partie d'un bâtiment en bois massif, contre collée verticalement, plusieurs capteurs ont été placés au sein de

la paroi afin de suivre son évolution thermo-hydrigue au cours du temps, suivi effectué en conditions réelles sur plus d'une année.

Nous avons présenté d'abord, un modèle de transferts thermo-hydrigues, « modèle de référence » couramment utilisé dans les outils de calcul thermo hydrigue d'enveloppe de bâtiments. Il permet de reproduire convenablement les évolutions et les transferts au sein de la paroi.

Ensuite, ce modèle a été soumis à une « dégradation » en vue d'une éventuelle simplification du processus ultérieur de caractérisation « in situ » des parois en bois. Dans ce nouveau modèle, les transferts d'enthalpie liés aux transferts de vapeur et provoqués par les gradients de teneur en eau ont été négligés face aux transferts induits par des gradients de température. Nous faisons référence à ce modèle comme « modèle à découplage faible (MDF) ».

Enfin, une simulation de comportement hygrothermique a été réalisée en utilisant le modèle MDF sur l'ensemble de la paroi en bois massif contrecollé avec joint de feutre entre madriers. Le modèle de comportement hygrothermique de la paroi a été validé à partir des mesures effectuées sur site ; il permet de bien présenter le transfert de chaleur et de masse à travers une telle paroi composite.

Ce modèle, intégré dans un modèle complet de comportement de parois en bois massif, nous permettra de calculer l'écart existant entre un modèle « simple » prenant en compte seulement les caractéristiques thermiques moyennes d'une couche de bois massif et un modèle « hygrothermique détaillé » intégrant toutes les caractéristiques et la géométrie de ce type de paroi.

Perspectives

Pour aller plus loin dans l'étude thermique d'un bâtiment en bois massif, on se propose d'intégrer le modèle de comportement thermo-hydrrique de la paroi BM dans un environnement de simulation bâtiment (SIMSPARK) bien adapté à la comparaison de différents modèles.

On pourra alors déterminer et optimiser :

- L'influence réelle du transfert couplé (chaleur, air, vapeur) sur la performance énergétique de MBM,
- les conditions de confort hygro-thermique,
- l'adaptation du mur « respirant » à un bâtiment ventilé naturellement.

D'autres perspectives possibles dans le cadre d'un nouveau projet, consisterait à :

- Transférer la modélisation de l'échelle « paroi » vers l'échelle « bâtiment » en prenant en compte des conditions climatiques diverses et plusieurs typologies de construction,
- Simplifier et réduire le modèle par une formulation adaptée prenant en compte les performances spécifiques des enveloppes BM,
- Exploiter les résultats expérimentaux et les calculs pour, au plan réglementaire, préparer :
 - o Un « dossier d'étude pour cas particulier » (procédure annexe V de la RT2005) et intervenir auprès des pouvoirs publics,
 - o Les modalités de calcul de la prochaine réglementation thermique 2010 et en particulier les nouveaux critères environnementaux qui pourraient être intégrés,
- Optimiser la conception des parois (épaisseur, géométrie, joint) en lien en particulier, avec la ventilation naturelle des MBM,

Au plan plus général des performances énergétiques des MBM, la campagne de mesure des consommations pour le chauffage donne une valeur moyenne pour les 20 maisons testées, de 90 kWh/m²/an. Pour plus de la moitié de ces maisons, la valeur est inférieure à 80 kWh/m²/an ; ces performances traduites ensuite en consommations « conventionnelles » sont suffisantes pour répondre aux exigences réglementaires, RT2000 et RT2005.

Tout en conservant les qualités et caractères spécifiques des MBM, à savoir, comportement hygro-thermique, confort hiver et été, qualité environnementale et durabilité, le prochain objectif est d'atteindre un label « basse énergie » (type EFFINERGIE¹) soit une consommation pour chauffage, Eau Chaude Sanitaire et ventilation réduite à 50 kWh EP/m²/an (donc moins de 40 kWh EP/m²/an pour le seul chauffage) .

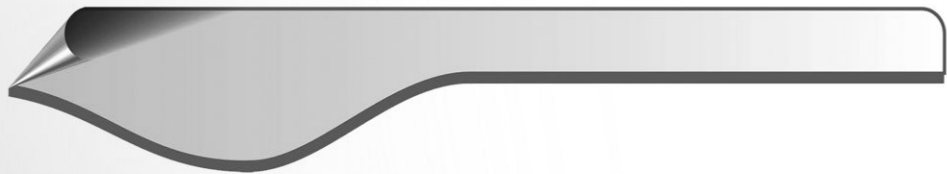
Cet objectif oblige à un travail de conception thermique des constructions très détaillé intégrant en particulier,

- une conception bioclimatique optimisée en lien avec la zone climatique et l'implantation,,

¹ Label « Basse énergie » présenté par l'association EFFINERGIE

- un système de chauffage performant (PAC eau/eau) avec des solutions solaires thermiques actives (chauffage et ECS),
- une ventilation « réduite » prenant en compte le caractère « respirant » des parois et intégrant des solutions performantes (puit « canadien », gestion par sonde CO2),
- une étanchéité améliorée au niveau des ouvrants et réduisant les défauts souvent constatés,
- un bon comportement et une gestion adaptée des occupants.

Concernant le point initial de l'étude lié aux parois « Bois Massif », de nouveaux produits multiplis (KLH, Ligntrend, Thoma Holz) sont maintenant utilisés sur le marché de la construction, avec ou sans isolation extérieure supplémentaire. Le lien entre le travail effectué dans cette thèse et ces nouveaux produits pourra être réalisé avec les constructeurs, en vue de développer de nouvelles solutions MBM plus performantes.



Références



Références

1. (ASHRAE) 1992: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE).. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ASHRAE Standard 55-1992). Atlanta.
2. (ASHRAE) 1995: ANSI/ASHRAE 55a-1995, Addendum to Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Standard 55a, 1995.
3. (ASHRAE) 2001: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). (2001).
4. (ASHRAE) 2002: Ventilation for acceptable indoor air quality. Interpretation IC 62-2001-07 of ANSI/ASHRAI standard 62-2001.
5. (ASHRAE) 2004: ANSI/ASHRAE Standard-55-2004: Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2004.
6. Agoua E., Zohoun S., Patrick P. 2001: Utilisation d'une double enceinte pour déterminer le coefficient de diffusion d'eau liée dans le bois en régime transitoire ; International journal of heat and mass transfer 44 (2001) 3731 - 3744
7. Alvarez J.C. 1998: EVALUATION OF MOISTURE DIFFUSION THEORIES IN POROUS MATERIALS. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. August, 1998.
8. ASTM, 2000: Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution. BIBINF USA, American Society for Testing and Materials, E 741-00, 16pp. 2000.
9. Atthajariyakul S., Leephakpreeda T., 2004: Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage, Energy and Buildings 36 (2004) 720–733
10. Aussourd Ph., Follenfant Ph., Slama R. ; 2006 : comparaison européenne sur les mesures destinées à améliorer la performance énergétique des bâtiments, Conseil général des ponts et chaussées N° 2005-0247-01. Inspection générale de l'Environnement, N° IGE/05/049
11. Axley, J.W. 2001: Application of Natural Ventilation for U.S. Commercial Buildings. GCR-01-820 NISTIR 6781, National Institute of Standards and Technology. 2001.
12. Aynsley, R. 1999: Unresolved Issues in Natural Ventilation for Thermal Comfort. in HybVent Forum '99. 1999. Sydney, Australia.
13. Barhoun H., 2006: Influence des transferts aérauliques dans les parois sur leurs performances thermiques, Thèse ADEME Soutenance en 2006 Spécialité : Thermique des bâtiments.
14. Battaglia J. L. 1995: Recherche de modèles simplifiés pour le comportement thermique et hygrothermique d'un bâtiment viticole, thèse présenté à l'Université Bordeaux 1, 1995.
15. Battaglia J.L., Jomaa W., Gounot J., Modèle simplifié du comportement hygrothermique d'un chais, Journal de Physique III, vol.6, pp. 1535-1553, 1995.
16. Bertolo L., Delaunay, D., Dormeau J. P., Nibel S., Zirngibl J. 1996 : Contribution à l'évaluation des dépenses énergétiques des logements, cahiers 2884 du CSTB, livraison 369 – mai 1996
17. Bhattacharyya, S., Claridge D. E., 1995: The energy impact of air leakage through insulated walls. Journal of solar energy engineering 117 (3). PBD: Aug 1995
18. Bilali L., Kouhila M., Benchanaa M., Mokhlisse A., Belghit A., 2001: Experimental study and modelling of isotherms of sorption of humid natural phosphate. Energy Conversion and Management 42, 467 – 481, 2001.

19. Billand F, 2002 : Une maison en bois pour bien être et bien vivre, CNDB, Construire en bois, c'est construire humain. P 5.
20. Billand F., 2006 : Maisons en bois - Douceur de vivre, 1ère édition. Hoëbeke ISBN : 2-84230-257-5, EAN13 : 9782842302573, 222 pages
21. Bizot H, Riou N, Multon J.L., 1987: Guide pratique pour la Détermination des Isothermes de Sorption et de l'Activité de l'Eau. Sciences des Aliments, numéro hors série, 1987.
22. Brager, G. S., Fountain, M. E., Benton, C. C., Arens, E. A., & Bauman, F. S., 1994: A comparison of methods for assessing thermal sensation and acceptability in the field. In N. A. Oseland & M. A. Humphreys (Eds.), Thermal Comfort: Past, Present and Future (pp. 17-39). Garston, UK: Building Research Establishment.
23. Brager, G.S. and Gear R. 2000: "A Standard for Natural Ventilation" ASHRAE Journal, October 2000.
24. Brill, M., Margulis, S. T., Konar, E., & BOSTI. 1984: Using Office Design to Increase Productivity (Vol. 1). Buffalo, NY: Workplace Design and Productivity, Inc.
25. Buchanan C. R., Sherman M. H. 2000: A Mathematical Model for Infiltration Heat Recovery, Energy Performance of Buildings Group, University of California. 49 Pages.
26. Bugge G., 1983: Stave Churches in Norway. Dreyers Forlag A/S, 1983. ISBN 82-09-01929-5. NA
27. Burch D.M., Remmert W.E., Krintz D.F., and Barnes C.S. 1982: A Field Study of the Effect on Wall Mass on the Heating and Cooling Loads of Residential Buildings. National Bureau of Standards, Washington, D.C. 1982,
28. Certu, 2003 : Le confort thermique « Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques », Ministère de l'équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer. Juillet 2003.
29. Charles, K.E. 2003: Fanger's Thermal Comfort and Draught Models, IRC-RR-162, National research council Canada, October 10, 2003
30. Cheong K. W. D., Lau, H.Y.T. 2003: Development and application of an indoor air quality audit to an air-conditioned tertiary institutional building in the tropics. Building and environment 38 (2003) 605 – 616.
31. Choong E. T., 1965: Diffusion coefficients of softwood by steady state and theoretical methods. Forest Products Journal, 15 (1), 21-27, 1965.
32. Desmorieux H., Moyne C., 1992: Analysis of dryer's performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept. In drying. Elsevier Amsterdam. 834 – 843, 1992.
33. Devel C., 2003 : Introduction des systèmes d'information dans l'amélioration de performance énergétique des bâtiments tertiaires. Thèse de doctorat UNIVERSITE BORDEAUX 1, 2003
34. Douglas, M. Burch, A. 1995: Computer Analysis of Wall Constructions in the Moisture Control Handbook, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899. NISTIR 5627, Mars, 1995
35. Edminster A., Yassa S., 1998: Efficient Wood Use in Residential Construction; A Practical Guide to Saving Wood, Money, and Forests. Natural Resources Defense Council ; 1998
36. EN 13829. 2001: Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments. Méthode de pressurisation par ventilateur. Performance thermique des bâtiments. Février 2001.
37. Erdmann CA., Steiner KC., and Apte MG., 2001: Indoor carbon dioxide concentrations and sick building

- syndrome symptoms in the base study revisited: analyses of the 100 building dataset; Indoor Environment Dept., Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA. 2001.
38. Ferrasse J. H., Lecomte D., 2004: Simultaneous heat-flow differential calorimetry and thermogravimetry for fast determination of sorption isotherms and heat of sorption in environmental or food engineering. *Chemical Engineering Science* 59 (2004) 1365 – 1376
39. Gobbé C., Iserna S., Ladevie B. 2004: Hot strip method: application to thermal characterisation of orthotropic media. *International Journal of Thermal Sciences* 43 (2004) 951–958
40. Grimsrud D.T. Sherman M.H. Diamond R.C. 1993: Infiltration – pressurization correlations: detailed measurements on a California house. *BIBINF ASHRAE trans.* vol.85 no.1. p.851-865,1993.
41. Grimsrud D.T. Sherman M.H. Janssen J.E. Pearman A.N. Harrje D.T. 1980 : An intercomparison of tracer gases used for air infiltration measurements. *BIBINF Lawrence Berkeley Laboratory. University of California paper LBL- 8394. ASHRAE trans,* 1980. vol. 86 no 1.
42. Grønli M. 1996: A theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass. ISBN 82-471-0009-6, Academic Dissertation, The Norwegian University of Science and Technology, 1996.
43. Guillot, K. Litvak, A. 2000 : étanchéité à l'air des constructions campagne de mesures de perméabilité à l'air et de ventilation de 70 logements. Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon, Rapport n° 00.173 Septembre 2000.
44. Gustavsson, T., Bornehag, C.-G. and Samuelsson, I. 2004: Temperature, Relative Humidity and Air Exchange Rate in 390 Dwellings, CIB W40 meeting in Glasgow 31st August–3rd September, 2004.
45. Hameury S., 2005: Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study, *Building and Environment*, Volume 40, Issue 10, pp. 1400-1412, 2005.
46. Harris L. & Associates, Inc. 1980: The Steelcase National Study of Office Environments, No. II: Comfort and Productivity in the Office of the 80's. Grand Rapids, MI: Steelcase.
47. Heidt F D, Werner H, 1986: Microcomputer-aided measurement of air change rates. *BIBINF Energy Bldgs,* Vol 9, 1986, p313-320.
48. Henrik T., Bo L., 2002: Thermal conductivity of wood-models for different stages of combustion. *Biomass and Bioenergy* 23 (2002) 47 – 54.
49. Hens, H. 1992: Package of Climatological Data measured in Belgian Buildings, Internal Report T2–B–92/01, International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, Annex 24 Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts (HAMTIE).
50. Hernandez Jean-Michel. 1991 : Séchage du chêne, caractérisation, procédés convectif et sous vide. Thèse à l'université Bordeaux 1; 1991.
51. Holmes O. W., 2006: Historic St. Augustine, The Weekly Newsletter of the English Language Institute Volume 99, Issue 12 April 7, 2006
52. International Standards Organization (ISO). 1994: Moderate Thermal Environments: Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort (ISO 7730). Geneva, Switzerland: ISO.
53. Jannot Y, Lasseux D, 2004 : Etude d'un perméamètre pour plaques de faibles perméabilité, rapport d'étude de contrat TREFLE / EDF. 2004
54. Jannot Y. and Meukam P., 2004: Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity

- and thermal conductivity using a low cost hot strip. *Measurement Sciences and Technology* 15 (2004) 1932-1938, 2004.
55. Jenssen, J.A., Geving, S. and Johnsen, R. 2002: Assessments on Indoor air Humidity in Four Different Types of Dwelling Randomly Selected in Trondheim, Norway. In: *Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, Trondheim, Norway, 17th– 19th June, 2002, pp. 729–735.
56. Kalamees, T. Vinha J. 2003: Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. *Building and Environment* 38 (2003) 689 – 697
57. Kalamees, T. Vinha J. 2006: Indoor Humidity Loads and Moisture Production in Lightweight Timber-frame Detached Houses, *Journal of BUILDING PHYSICS*, Vol. 29, No. 3 January 2006
58. Kent, A.D., Handegord, G.O. and Robson, D.R. 1966: A Study of Humidity Variations in Canadian Houses, *Transactions from the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 72, Part II, NRC 9648.
59. Künzel, H. M., Holm, A. Zirkelbach, D. et Karagiozis, A. N. 2005: Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Solar Energy* 78 (2005) 554 – 561
60. Lee S. C., Chang M., and Chan K.Y., 1999: Indoor and outdoor air quality investigation at six residential buildings in Hong Kong. *Environment International*, Vol. 25, No. 4, pp. 489-496. 1999.
61. Litvak, A. 2000 : Etanchéité à l'air des constructions. Etat de l'art et recensement des pratiques. Rapport CETE DVT noOO.41. Avril 2000.
62. Luikov AV. 1966: Heat and mass transfer in capillary-porous bodies. Pergamon Press; 1966.
63. MacLean JD. 1941: Thermal conductivity of wood. *Transactions American Society of Heating and Ventilating Engineers*. 1941;47:323–54.
64. Malsot, J., Deroubaix G., Paquet Ph., Raji S., Prieur A., Lochu S., 2005: Extention de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble des stocks de la filière bois. VIIIème Colloque ARBORA, Carbone, Forêt, Bois. ISTAB 2005
65. Mandallena, C., 2006 : Elaboration et application d'une méthode d'évaluation et d'amélioration de la qualité environnementale de bâtiments tertiaire en exploitation, Thèse Université Bordeaux 1, Juillet 2006
66. Mejri O., Palomo E., 2005: Développement d'une méthode de diagnostic des bâtiments en phase d'exploitation. Rapport Master énergétique, U. bordeaux1. 2005
67. Míguez J.L., Porteiro J., Lopez-Gonzalez L.M., Vicuna, J.E., Murillo S., Moran J.C., Granada E. 2006 : Review of the energy rating of dwellings in the European Union as a mechanism for sustainable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (2006) 24–45
68. NAHB, 1991: EVALUATION OF LOG HOMES' HEATING ENERGY PERFORMANCE IN NORTHERN CLIMATES, NAHB Research Center 400 Prince George's Boulevard Upper Marlboro, MD 20772-8731. Project No.: 2132
69. Nepveu, G ; 1994 : Le bois matériau d'ingénierie ; textes rassemblés par Philippe Jodin. Association pour la recherche sur le bois en lorraine ; A.R.BO.LOR. Nancy 1994.
70. Oliva J-P., Bosse-Platière A., Aubert C. 2002 : Maison écologiques d'aujourd'hui, Terre vivante, l'écologie pratique, ISBN : 2-904082-99-9. France 2002
71. Pauly M., Baeten F., Lagièrre P., Artistigui C. 2005: Etude expérimentale du comportement thermique de

- maison en bois massif et définition d'outils de conception. TREFLE, Septembre, 2005.
72. Pénicaud, H et GECOB conseil Environnement, 2004 : Bois construction, Guide d'orientation environnementale, ARENE Ile-de-France (Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies). Mars 2004
73. Pérré P., 1987: Measurement of softwoods' permeability to air : importance upon the drying model, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.14, n°5, pp. 519-529, 1987.
74. Petersen A.K., Solberg B., 2002: Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction. *Environmental Science & Policy* 5 (2002) 169–182
75. Philip JR, De Vries DA. 1957: Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions, American Geophysical Union* 1957;38(2):222–32.
76. Picandet, V., 2001 : Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons. Thèse de doctorat. École doctorale de Mécanique, Thermique, et Génie civil de Nantes, 2001.
77. Pickett, R. 2003: The energy performance of log homes. Documented energy-efficiency and thermal mass benefits; Technical Committee of the Log Homes Council, Building Systems Councils; National Association of Home Builders© . 2003
78. Prieur A., 2004 : Les ressources forestières : produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage du carbone. Thèse de doctorat, laboratoire TREFLE. Université Bordeaux1. 2004
79. Raji S., Jannot Y., Lagièrre P., Puiggali JR. 2006: Multiscale thermophysical characterization of a laminated solid-wood wall. Article in press, *Building and Environment*, 2006
80. Raji S., Lagièrre P., Puiggali JR. 2006 : Rapport d'étude expérimentale sur 10 maisons du réseau AFCOBOIS (financement Fédération Française du Bâtiment, TREFLE 2005/2006)
81. Raji S., Lagièrre P., Puiggali JR., 2004 : Rapport Pôle Environnement Aquitain, juin TREFLE 2004
82. Raji S., 2003 : Méthodologie de l'évaluation et de l'éligibilité des stocks de carbone en aval de la forêt, Le stock de carbone dans un scénario de référence 2010 pour les filières : papier-carton, bois d'emballage et bois d'ameublement, mémoire de stage de DEA Science du bois. Université Bordeaux 1. 2003
83. Ribéron J., O'Kelly P., Maupetit F. and Robine E., 2002: Indoor air quality in schools: the impact of ventilation conditions and indoor activities. Sustainable Development Dept., Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, France. *Indoor Air* 2002.
84. Rose, W.B. and Francisco, P.W. 2004: Field Evaluation of the Moisture Balance Technique to Characterize Indoor Wetness, In: *Proceeding of Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX Conference*, Florida.
85. Schiller, G. E., 1990: A comparison of measured and predicted comfort in office buildings. *ASHRAE Transactions*, 96(1), 609-622.
86. Schwach, P., 2000 : La réglementation thermique 2000 ; *CSTB Magazine* 132 novembre - décembre 2000 P 4-6
87. Shampine L. F., Reichelt M. W., and Kierzenka J. A., 1999: "Solving Index-1 DAEs in MATLAB and Simulink", *SIAM Review*, 41-3, 1999.
88. Shaw C.Y. 1997 : Une qualité de l'air acceptable dans les immeubles de bureaux, c'est possible grâce à la

- ventilation. Institut de recherche en construction, Solution constructive no 3. Conseil national de recherches du Canada. ISSN 1206-1239. Janvier 1997.
- 89.Skaar, C. 1972: Water in wood. Syracuse University Press. New York. p. 218.
- 90.Steven J. Emmerich, Andrew K. Persily, W. Stuart Dols, James W. Axley, 2003: Impact of Natural Ventilation Strategies and Design Issues for California Applications, Including Input to ASHRAE Standard 62 and California Title 24, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7062 , October 2003
- 91.Talla A. 2003 : séchage de fruits tropicaux par l'air chaud et étude du coût énergétique dans un séchoir électrique prototype ; thèse présentée à l'université de Yaoundé 1, l'école nationale supérieure polytechnique pour obtenir le grade de PHD génie énergétique. 2003
- 92.Talla A., Jannot Y., Nkeng G., Puiggali J.-R., 2005: "Desorption isotherms of tropical foodstuff. Application to banana, mango and pineapple", *Drying Technology*, vol.23, n° 7, pp. 1477-1498, 2005.
- 93.Talla A., Puiggali J.-R., Jomaa W., Jannot Y., 2003: Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, 64, 103–109, 2003.
- 94.Thermal comfort. In *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (p. 8.1-8.29). Atlanta, GA: ASHRAE.
- 95.Visier J. C., 2000 : Réglementation thermique 2000 ; *CSTB Magazine* 132 novembre - décembre 2000. P-3
- 96.Whitaker, S. 1977: Toward a Diffusion Theory of Drying. *Ind. Eng. Chem., Fundam.*, Vol. 16, No. 4, 1977
- 97.Wong N. H., Huang B., 2004: Comparative study of the indoor air quality of naturally ventilated and air-conditioned bedrooms of residential buildings in Singapore. *Building and Environment* 39 (2004) 1115 – 1123.
- 98.Zarr R. R., Burch D. M. and Fanney A. H., 1995: Heat and Moisture Transfer in Wood-Based Wall Construction: Measured Versus Predicted. National Institute of Standards and Technology Building Science Series 173. *Natl. Inst. Stand. Technol. Bldg. Sci. Ser. 173*, 83 pages (Feb. 1995). CODEN: NBSSES
- 99.Zhang X.X., Degiovanni. A., 1993 : Mesure de l'effusivité thermique de matériaux solides et homogènes par une méthode de « sonde » plane. *J. Phys. III France* 3, pp.1243-1265, 1993.
100. Zhao L, Zhang Y, Wang X, Riskowski G L, Christianson L., 1999: Development of PIV techniques to measure airflow patterns in ventilated airspaces. *BIBINF USA, ASHRAE Transactions, Annual Meeting 1999, Seattle*, 9 pp, 11.

Annexes

Annexe 1 : Exemple de dossier MBM-AFCOBOIS	175
Annexe 2 : Exemple de résultats mesures MBM-AFCOBOIS	183
Annexe 3 : Méthode de calcul $U_{\text{bât}}$ et $U_{\text{bât Réf}}$	187
Annexe 4 : RT 2005 : Bases et principes d'application	191
Annexe 5 : Etude sur 2 constructions BM	203
Annexe 6 : Multi gaz moniteur INNOVA® 1314 et échantillonneur / doseur INNOVA®	209
Annexe 7 : Mesure de perméabilité par la méthode de Gaz Traceur	211
Annexe 8 : Mesure de perméabilité par la méthode de «Blowerdoor ou porte soufflante »	213



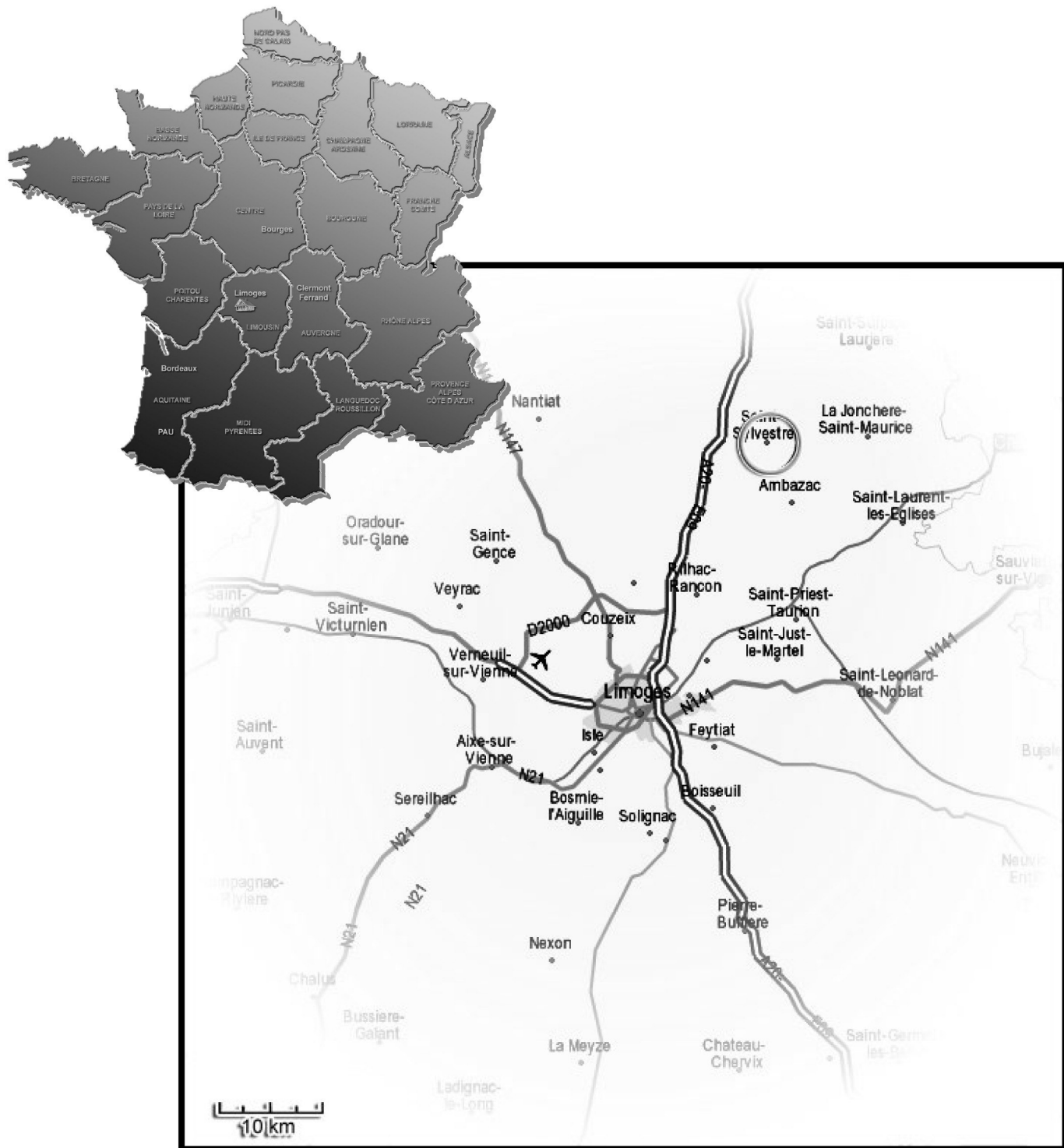
Annexe 1 : Exemple de dossier Maison Bois Massif -AFCOBOIS

Maison N° : 37
M. et Mme. GINOUVES



Constructeur : AALAND

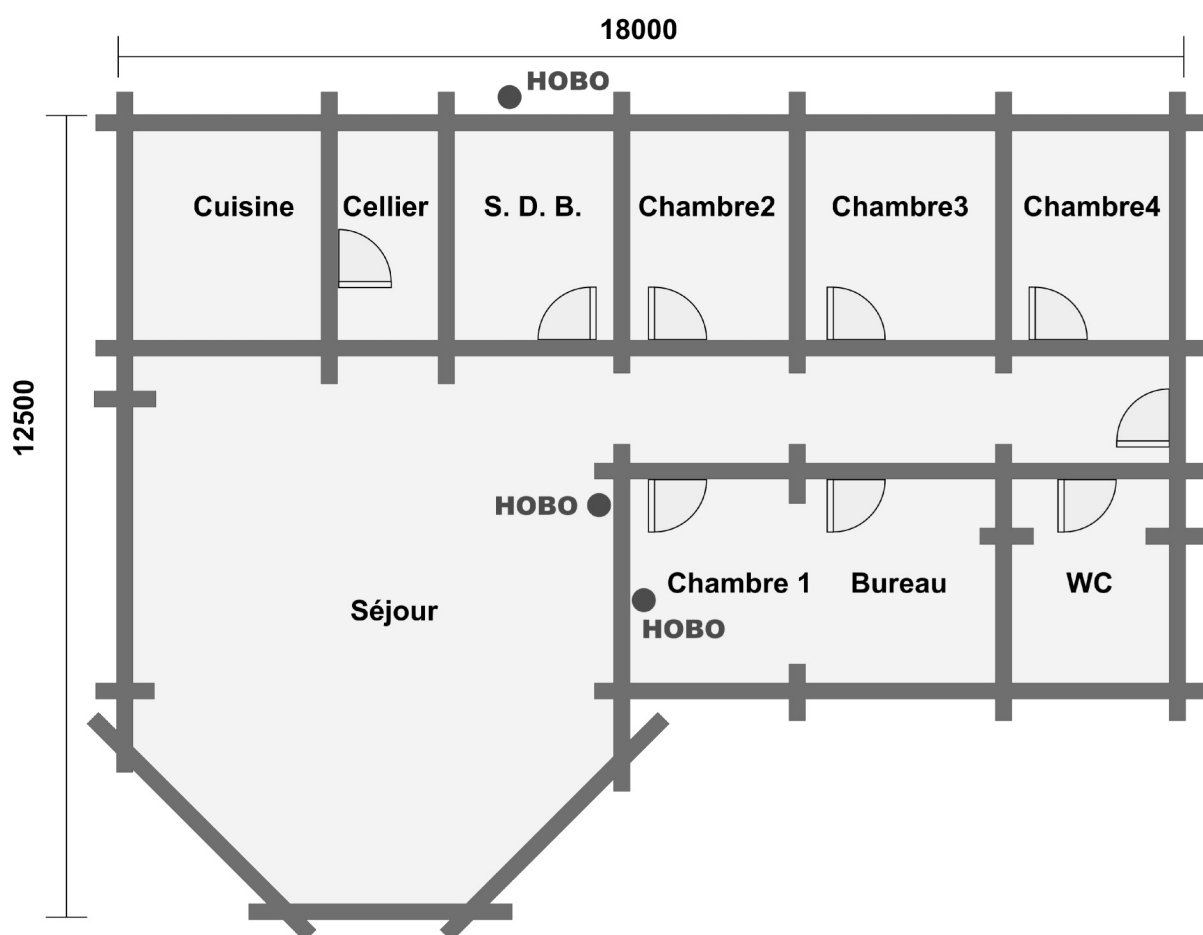
Situation Géographique de la maison



*Rue Grandmont – L'Écluse
87240 Saint Sylvestre*

Instrumentation

1. Pose de 3 enregistreurs HOBO :
 - a. Température extérieure
 - b. Température intérieure séjour
 - c. Température intérieure chambre
2. Pose de compteur électrique DELTADORE Multiwatt 50 pour enregistrement de la consommation d'électricité de Chauffage (Plancher chauffant).



Enregistreurs HOBO dans la maison



Vue Extérieure



Vue séjour



Vue cuisine



Vue Bureau



Vue chambre



Convecteur électrique



thermostat programmable

Fiche Technique

❑ Référence du logement n° ...37.

Date enquête : 23/02/2005

Nom : **M. et Mme. GINOUVES**

Adresse : **Rue Grandmont – L'Ecluse**

Ville : **Saint Sylvestre**

Code postal : **87240**

Téléphone :

Horaire appel : **19:00 – 20:00**

E-mail :

Fréquence utilisation :

❑ Informations générales

1. Nombre de personnes dans le logement :

	Nom bre	âges
Enfants (<15 ans)		
Adultes (<65 ans)	2	
Seniors (>65 ans)		

La fille a quitté la maison il y a 3 ans, le garçon y a quitté il y a 1 ans

❑ Equipement du logement

Puissance des appareils que vous possédez.

Cuisine	
Réfrigérateur avec congélateur	1
Réfrigérateur	
Congélateur	1
Four électrique	1
Four au gaz	
Plaque de cuisson électrique	1
Plaque de cuisson gaz	1
Lave vaisselle	1
Micro ondes	1
Cafetière électrique	1
Buanderie	
Lave linge	1
Sèche linge	1
Fer à repasser	1
Séjour et chambres	
TV (précisez le nombre)	1
Magnétoscope	1
Décodeur (satellite ou canal +)	1
Chaîne HIFI - Radio	1
Console de jeux	
Ordinateur	1
Scanner	1
Imprimante	1

❑ Eclairage du logement

Indiquez le nombre d'ampoules présentes dans la pièce et leur puissance unitaire.

Lieu	Nombre d'ampoules utilisées ...			
	Classiques	Halogènes	Economiques	Tubes Fluo
Cuisine	2*60			
Séjour	4*50	4*25	1*40	
Chambre 1	1*40			
Chambre 2	1*30	4*25		
Chambre 3	1*100			
Chambre 4			1*15	
Salle de bains	1*75			
WC	1*60			
Garage	?			
Extérieur	?			
Cellier	1*75			
Bureau	1*60			
Couloire	3*40			

❑ Confort été : Pendant les fortes chaleurs

1. Trouvez vous que le logement conserve bien la fraîcheur pendant la journée ?

Oui



Commentaires :

- | | |
|---|--|
| 2. L'été, fermez vous, pendant la journée ... | 3. L'été, ouvrez vous, pendant la nuit ... |
| ... les fenêtres ? Oui | ... les fenêtres ? Non |
- Pas des Volets**

☑ Système de chauffage de base : Electrique

Description sommaire de l'installation : **PLANCHER CHAUFFANT, Résistance électrique**
Des convecteurs électriques dans les Chambres et le bureau (à vérifier la puissance)
Informations d'installation (M. Ginouves vas les nous envoyer en quelque semaine)

☑ Utilisation du système de programmation et régulation

- | | |
|--|--|
| 1. Y a-t-il un programmateur horaire pour le chauffage ?
Oui | 5. Si oui, connaissez vous les températures indiquées ?
Jour 20°C, Nuit 17°C |
| 2. Avez-vous utilisé le programmateur depuis que vous êtes dans le logement ?
Non | 6. Y a-t-il des robinets thermostatiques sur les radiateurs ?
Non |
| 3. Si oui, quelles sont vos heures de chauffe ?
En semaine : 7:00 – 9:00
12:00-14:00
Le Week End : 18:00 – 22:00 | 7. Pendant l'Hiver, modifiez vous le réglage de ces robinets ?
Non |
| 4. Y a-t-il un thermostat d'ambiance pour le chauffage ?
Oui | 8. Coupez vous le chauffage si vous êtes absents du logement plus de 2 jours ?
Non |
- Exemple de robinet thermostatique 
- Exemple de thermostat d'ambiance 

☑ Ventilation

- | | |
|---|--|
| 1. Y a-t-il un système de ventilation mécanique ?
Non | 1. Utilisez-vous la ventilation naturelle (ouverture de fenêtres) pour aérer le logement ?
Le matin (15 min) |
|---|--|

☑ Eau chaude sanitaire

Description sommaire de l'installation ECS :

Ballon électrique DE DEITRICH, 3000 W, 300 LITRES, CHAUF 360 MIN,

Équipements :

Douche :
Baignoire : **1**

Nombre :

▣ Suivi des consommations

1. Quel type de suivi des consommations réalisez vous pour ...

... l'eau ?				
... l'électricité ?		annuel		
... le gaz ?				

2. Surveillez vous régulièrement votre compteur

... d'eau ?		Non
... d'électricité ?	Oui	

Pour la consommation électrique, on va voire une consommation plus élevée les dernières 2 ans à cause de la chauffe moto

▣ En générale, quels sont les horaires où le logement n'est pas occupé :

Heurs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1 ^{ere}								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
2 ^{eme}								X	X	X	X	X		X	X	X	X	X						
3 ^{eme}																								
4 ^{eme}																								

Annexe 2 : Exemple de Résultats MBM

M. GINOUVES

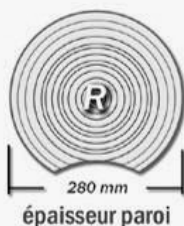
37

Constructeur

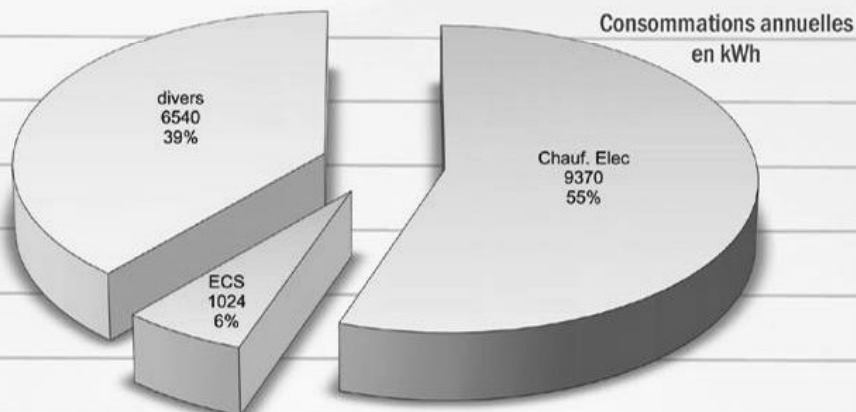


Construit le 01/01/1997

Type de paroi



Nombre de personnes



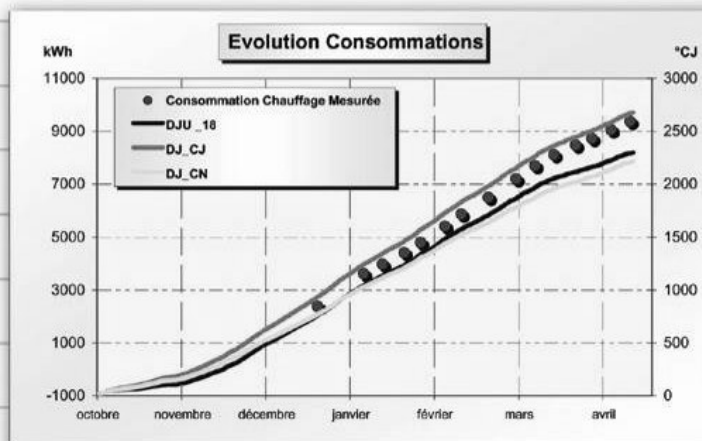
Type de Chauffage



ELEC

Plancher Chauffant
+ Convecteurs

Surface Chauffée



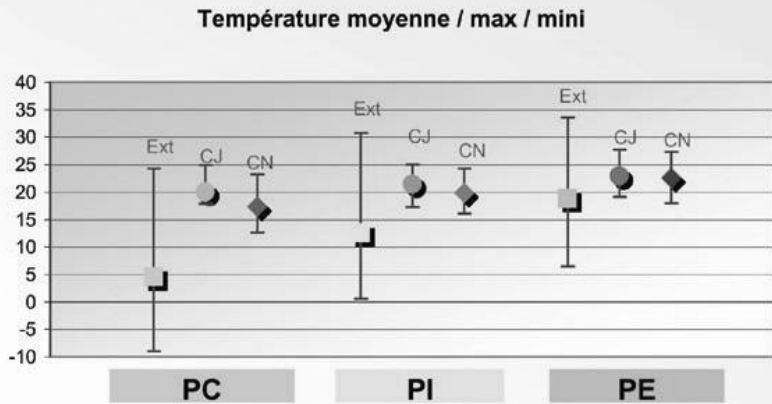
Analyse des températures et HR% mesurées (pas de temps 15 min)

3 périodes de référence:

PC : Période chauffage

PI : Période intermédiaire

PE : Période été

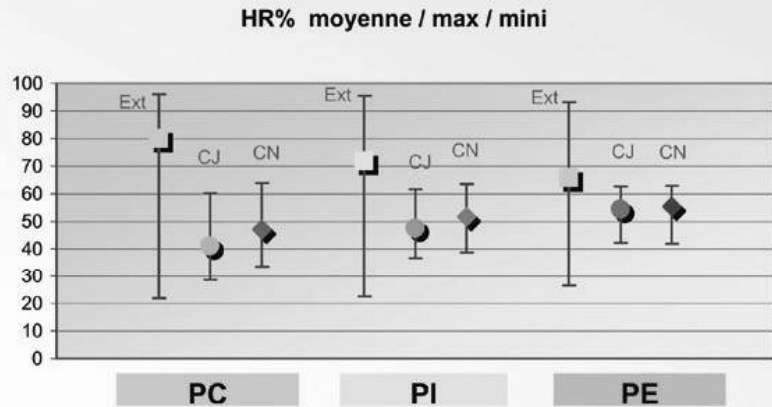


3 zones de mesure:

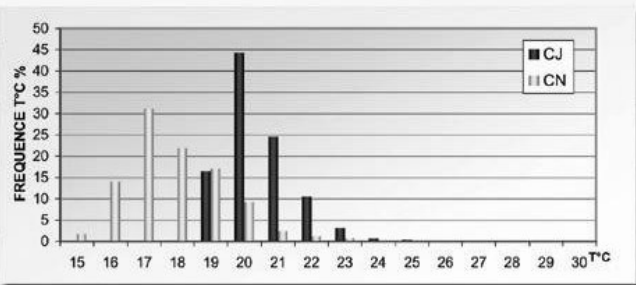
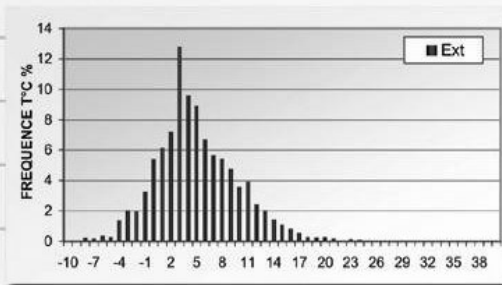
■ Ext: Extérieur sur abri

● CJ: Coin Jour

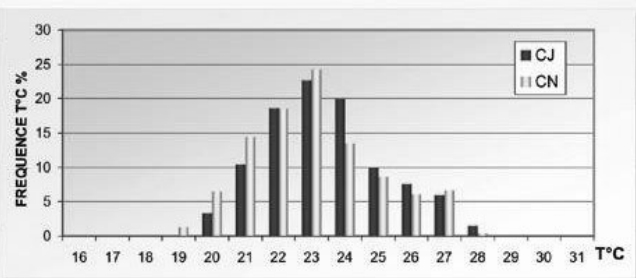
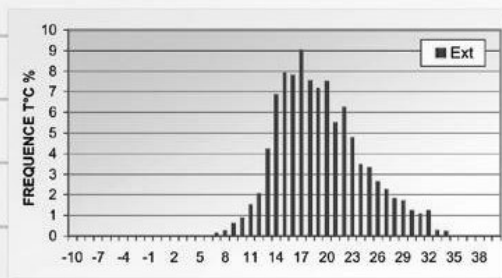
◆ CN: Coin Nuit



Fréquence des températures mesurées en période froide

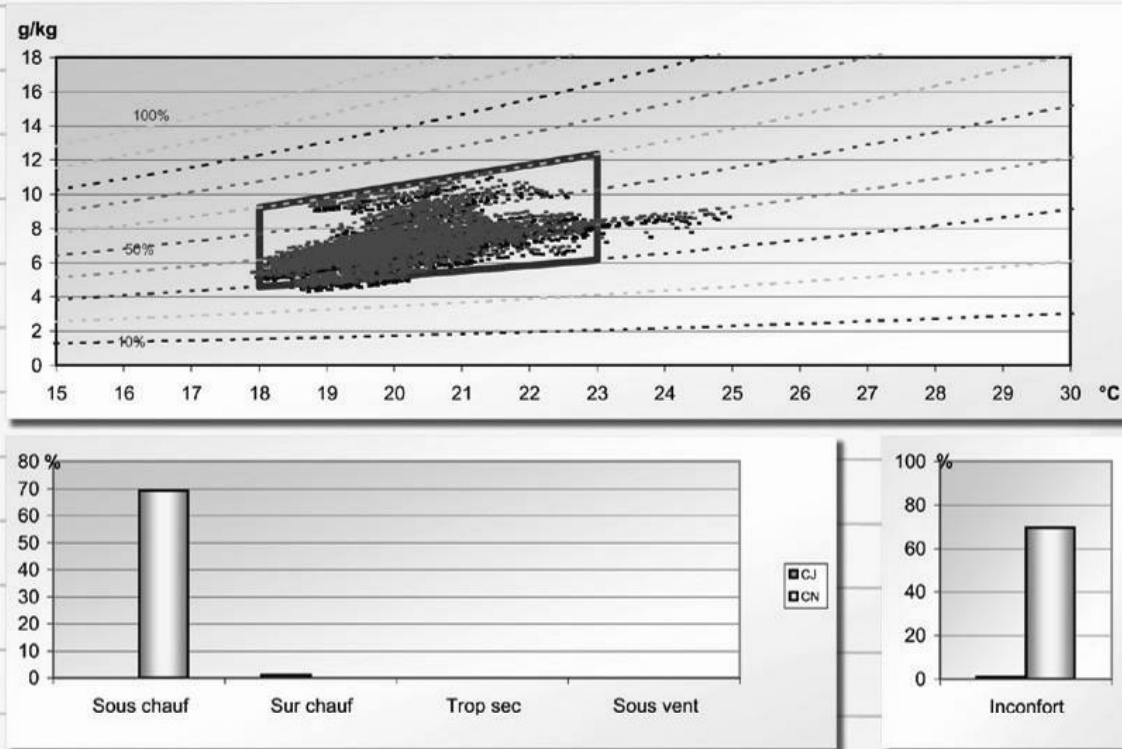


Fréquence des températures mesurées en période chaude

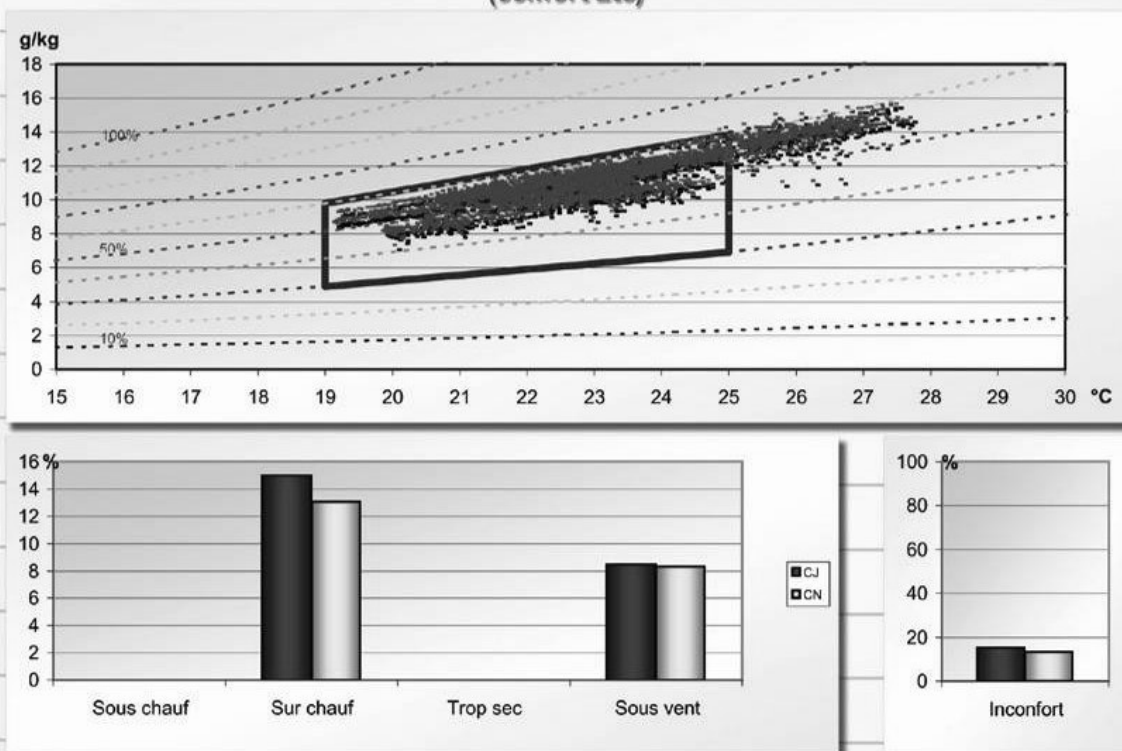


Analyse des conditions de confort

Représentation des mesures de température et d'humidité (confort Hiver)



Représentation des mesures de température et d'humidité (confort Été)



Annexe 3 : Méthode de calcul RT2000 $U_{\text{bât}}$ et $U_{\text{bât Réf}}$

Réglementation Thermique 2000

Règles Th-U

1

Chapitre I Introduction aux règles Th-U

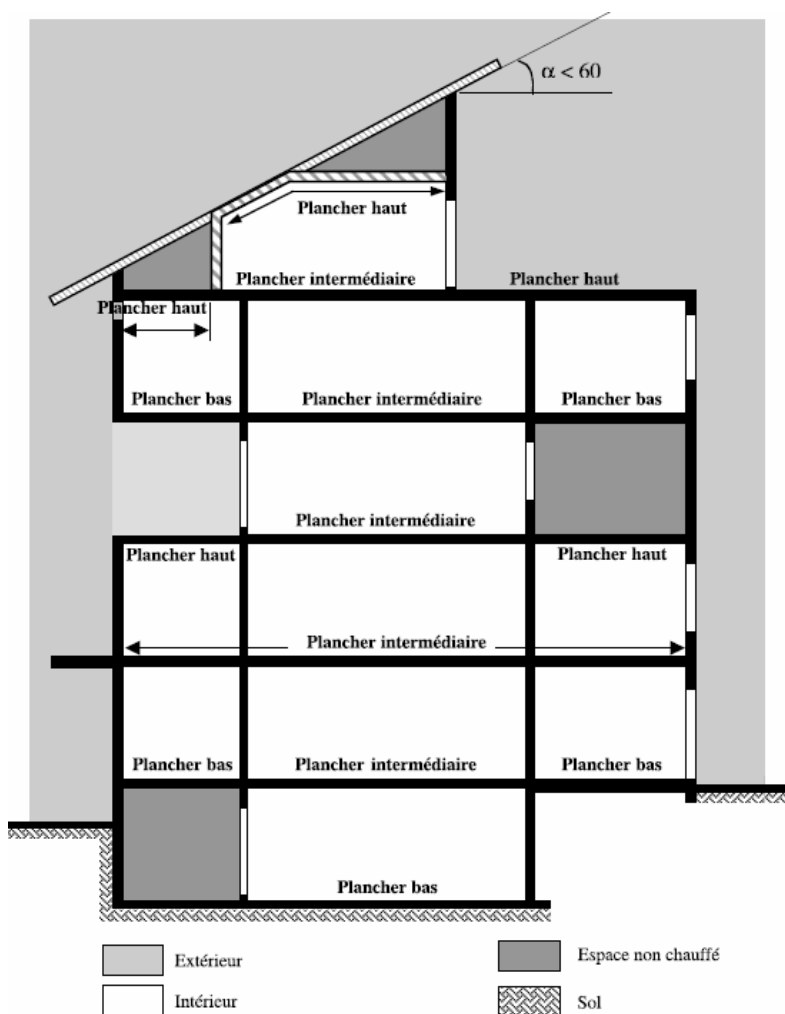


Figure 1 : planchers bas, intermédiaires et hauts

c - Indices

e	Extérieur, équivalent
i	Intérieur
s	superficiel
T, t	Total
D	Direct
S	Sol
U, u	Non chauffé
iu	Intérieur vers local non chauffé
ue	Local non chauffé vers extérieur
V	Par renouvellement d'air
bât	Relatif à l'enveloppe du bâtiment
bât-réf	Valeur de référence relative à l'enveloppe du bâtiment

1.5 Conventions

1.51 Température et humidité des matériaux

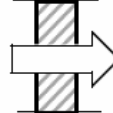
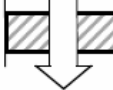
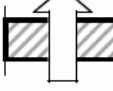
Les conductivités thermiques des matériaux et les caractéristiques thermiques des éléments de construction sont définies pour une température moyenne de 10°C.

Les conventions d'humidité des matériaux sont définies au fascicule « matériaux ».

1.52 Résistances superficielles

En absence d'informations spécifiques sur les conditions aux limites des surfaces planes, les résistances superficielles, intérieures (R_{si}) et extérieures (R_{se}), suivantes doivent être utilisées :

Tableau I : Valeurs par défaut des résistances superficielles

Paroi donnant sur : - l'extérieur - un passage ouvert - un local ouvert ⁽²⁾	R_{si} m ² .K/W	$R_{se}^{(1)}$ m ² .K/W	$R_{si} + R_{se}$ m ² .K/W
Paroi verticale Flux horizontal 	0.13	0.04	0.17
Flux ascendant 	0.10	0.04	0.14
Paroi horizontale Flux descendant 	0.17	0.04	0.21

(1) Si la paroi donne sur un autre local non chauffé, un comble ou un vide sanitaire, R_{se} s'applique des deux côtés.

Pour plus de précision sur les résistances superficielles, se reporter au fascicule « Parois opaques ».

(2) Un local est dit ouvert si le rapport de la surface totale des ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à 0.005 m²/m³. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.

Chapitre III

Aspects réglementaires

Ce chapitre a pour but de préciser les niveaux réglementaires des performances thermiques de l'enveloppe et de ses composants.

L'arrêté du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, fixe les caractéristiques thermiques de référence des composants d'enveloppe pour le calcul d'une valeur de référence au coefficient $U_{\text{bât}}$, nommée $U_{\text{bât-réf}}$ et fixe les caractéristiques thermiques minimales à ne pas dépasser.

3.1 Coefficient $U_{\text{bât-réf}}$

Ce paragraphe définit le coefficient $U_{\text{bât-réf}}$ et donne la méthode de calcul correspondante.

3.1.1 Définition

$U_{\text{bât-réf}}$ est un coefficient de référence pour $U_{\text{bât}}$, appelé « coefficient moyen de référence de déperdition par les parois et les baies du bâtiment ».

Il permet de situer la déperdition par transmission à travers l'enveloppe par rapport à une valeur de référence calculée en fonction de caractéristiques thermiques de référence des composants d'enveloppe.

$U_{\text{bât}}$ est le coefficient moyen caractérisant les déperditions thermiques réelles d'un bâtiment par transmission à travers les parois, il est déterminé selon le chapitre II du présent fascicule et exprimé en $W/(m^2.K)$.

3.1.2 Calcul

Le mode de calcul de $U_{\text{bât-réf}}$ est similaire à celui de $U_{\text{bât}}$. Il s'effectue en fonction de coefficients de références, donnés dans l'arrêté de la réglementation thermique, pondérés par les caractéristiques géométriques réelles du bâtiment (mêmes conventions que $U_{\text{bât}}$).

a – Formule

$U_{\text{bât-réf}}$ se calcule d'après la formule suivante :

$$U_{\text{bât-réf}} = \frac{a_1 A_1 + a_2 A_2 + a_3 A_3 + a_4 A_4 + a_5 A_5 + a_6 A_6 + a_7 A_7 + a_8 L_8 + a_9 L_9 + a_{10} L_{10}}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7} \quad (11)$$

b – Paramètres

On distingue entre les coefficients de référence a_i et les surfaces A_i et linéaires L_i

b.1 – coefficients a_i

Les coefficients a_1 à a_{10} dépendent de la zone climatique du lieu de construction du bâtiment, on distingue entre la zone H_3 d'une part et les zones H_1 et H_2 d'autre part.

Les coefficients a_i sont donnés dans le tableau ci-après et s'expriment en $W/(m^2.K)$:

Tableau VII : coefficients a_i

Coefficient a_i	Zones H_1 et H_2	Zone H_3
a1	0.40	0.47
a2	0.23	0.30
a3	0.30	0.30
a4	0.30	0.43
a5	1.50	1.50
a6	2.40	2.60
a7	2.00	2.35
a8	0.50	0.50
a9	0.7 pour les maisons individuelles 0.9 pour les autres bâtiments	0.7 pour les maisons individuelles 0.9 pour les autres bâtiments
a10	0.7 pour les maisons individuelles 0.9 pour les autres bâtiments	0.7 pour les maisons individuelles 0.9 pour les autres bâtiments

b.2 – Surfaces A_i (m^2) et linéaires L_i (m)

- A_1 surface des parois verticales opaques y compris les parois verticales des combles aménagés et les surfaces projetées des coffres de volets roulants non intégrés dans la baie ; à l'exception des parties opaques prises en compte dans A_6 , A_8 ou A_7 .
- A_2 Surface des planchers sous combles⁽¹⁾ et surface des rampants et parois horizontales des combles aménagés
- A_3 surface des planchers hauts autres que ceux pris en compte dans A_2 ;
- A_4 surface des planchers bas ;
- A_5 surface des baies destinées à recevoir des portes, exception faite des portes entièrement vitrées ;
- A_6 surface des baies destinées à recevoir des fenêtres, des portes entièrement vitrées, des portes-fenêtres et des parois transparentes ou translucides non équipées de fermetures ;
- A_7 surface des baies destinées à recevoir des fenêtres, des portes-fenêtres ou des parois transparentes et translucides équipées de fermetures ;
- L_8 linéaire de la liaison périphérique des planchers bas avec un mur ;

- L_9 linéaire de la liaison périphérique des planchers intermédiaires ou sous comble aménageable avec un mur ;
- L_{10} linéaire de la liaison périphérique avec un mur des planchers hauts pris en compte pour le calcul de A_3 .

⁽¹⁾ A l'exception du prolongement d'un plancher intermédiaire sous l'espace perdu en extrémité basse d'un comble (voir Figure 10).

Les surfaces A_1 à A_7 sont les surfaces intérieures des parois et les linéaires L_8 à L_{10} sont déterminés à partir des dimensions intérieures des locaux. Seules sont prises en compte, pour les déterminations de ces surfaces et de ces linéaires, les parois ou liaisons donnant sur un local chauffé, d'une part, et, d'autre part, sur l'extérieur, un local non chauffé, le sol ou un vide sanitaire.

Dans le cas où la liaison périphérique d'un plancher se situe à la jonction d'un plancher intermédiaire avec un plancher bas ou un plancher haut, le linéaire à prendre en compte est respectivement L_9 ou L_{10} .

Les surfaces A_1 à A_7 et les linéaires L_8 , à L_{10} , sont représentés sur le schéma de la figure 10 ci-après.

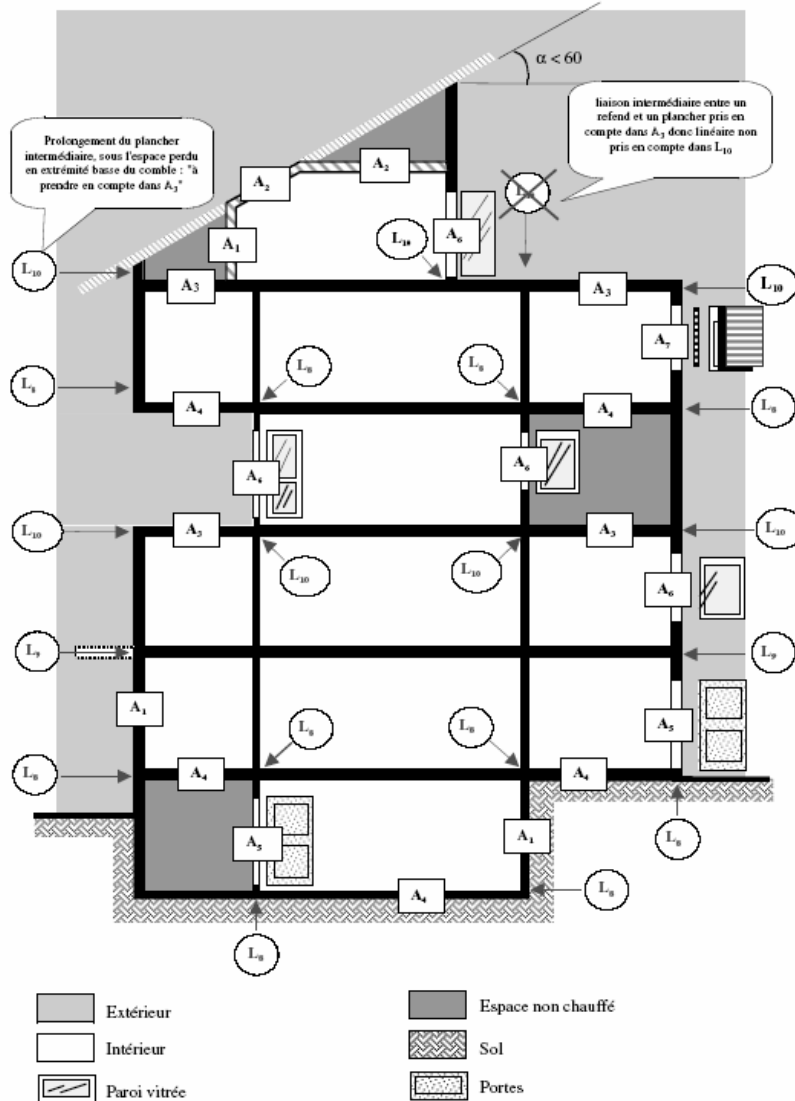


Figure 10 : Surfaces A_1 à A_7 et linéaires L_8 à L_{10}

Annexe 4 : RT 2005, BASES ET PRINCIPES D'APPLICATION



I. HISTORIQUE :

- **1974** : Naissance en France de la Réglementation Thermique (RT) des bâtiments suite à la première crise pétrolière mondiale. Elle ne concerne alors que le résidentiel (maisons individuelles et logements collectifs) et son unique objectif est de diminuer la dépendance énergétique de la France en réduisant les consommations. Thermiquement, la seule exigence concerne le niveau global de déperdition des logements (coefficient G) qui dépend de la zone climatique et du type d'énergie de chauffage.
- **1976** : Intégration dans cette réglementation des bâtiments non résidentiels qui doivent désormais respecter une exigence relative au niveau d'isolation de l'enveloppe (coefficient G1).
- **1982** : Renforcement du niveau d'isolation de l'enveloppe et possibilité de prise en compte des besoins de chauffage (coefficient B) pour le secteur résidentiel.
- **1988** : Nouveau renforcement de la réglementation pour les secteurs résidentiel et tertiaire. Insertion de nouveaux coefficients dans le résidentiel :
 - le coefficient G devient GV pour représenter les déperditions thermiques,
 - le coefficient B devient BV pour représenter les besoins de chauffage,
 - le coefficient C pour représenter les consommations et prendre en compte la performance des équipements (appareils de chauffage, ventilation...).
- **2000** : Nouvelle réglementation applicable à tous les bâtiments neufs

II. QUELQUES RAPPELS SUR LA RT2000

En 2000, l'indépendance énergétique de la France étant mieux assurée, de nouveaux enjeux furent à l'origine du renforcement de la réglementation thermique :

- Respecter l'engagement français des accords de Rio (1992) et de Kyoto (1997) dans la **lutte contre l'effet de serre et le changement climatique**. En France, le bâtiment représente environ 1/4 de la production des gaz à effet de serre.
- **Optimiser le confort de l'espace habitable** en améliorant le confort d'hiver (limiter l'effet parois froides...) et le confort d'été (limiter les surchauffes...).
- Simplifier les textes réglementaires et créer une structure ainsi que des règles communes aux secteurs résidentiel comme tertiaire.
- Passer d'une approche purement française à une **approche européenne** en définissant les méthodes de calcul et les caractéristiques des produits dans des normes européennes. A ce titre, les performances thermiques des parois de bâtiments sont désormais caractérisées dans toute l'Europe par leur coefficient U.

Face à ces enjeux, la **RT 2000 visait à réduire les coûts d'énergie** de 20 % dans le résidentiel et de 40 % dans le tertiaire par rapport à la réglementation de 1988.

- **Dans le résidentiel**, la RT 2000 s'est inspirée des bonnes pratiques constatées à l'époque sur le terrain (label Vivrélec par exemple).
- **Dans le tertiaire**, le renforcement fut plus sévère, les contraintes de ce secteur se rapprochant de celles du résidentiel. Alors que la précédente réglementation (RT 88) ne concernait que le niveau d'isolation de l'enveloppe, la RT 2000 a aussi pris en compte les systèmes de chauffage, la ventilation, l'eau chaude sanitaire et l'éclairage.

Pour tout bâtiment neuf, résidentiel ou non, la RT 2000 a défini trois exigences :

- La consommation énergétique conventionnelle totale (coefficient C) exprimée en kWh d'énergie primaire doit être inférieure ou égale à celle du même bâtiment ayant des caractéristiques thermiques de référence : **$C \leq C_{réf}$** .
- Pour les bâtiments non climatisés, la température intérieure conventionnelle de l'ouvrage (coefficient Tic, exprimée en °C, sur les 3 heures les plus chaudes de l'année) doit être inférieure ou égale à celle du même bâtiment ayant des caractéristiques thermiques de référence : **$Tic \leq Tic_{réf}$** .
- Les caractéristiques des produits (isolants...) et des systèmes (chauffage, ventilation...) doivent présenter des **performances minimales appelées « garde-fous »**.

Par ailleurs, afin d'éviter des niveaux de performances disparates dans le secteur résidentiel, la RT 2000 a introduit une limitation des compensations entre l'isolation et les systèmes.

Afin d'être applicable sur l'ensemble du territoire, la France a été découpée en 3 zones climatiques d'hiver (H1, H2, H3) et 4 d'été (Ea, Eb, Ec, Ed).

Le respect des exigences de la RT 2000 passait par :

- Le calcul pour l'ensemble du bâtiment (C, Tic...) à l'aide de logiciels utilisant tous un cœur de calcul identique développé par le CSTB.
- L'utilisation de solutions techniques (méthodes à points) fournies par l'Administration ou de solutions techniques spécifiques par produit ou système mises au point par des industriels et agréées par les Pouvoirs Publics.

III. LES EVOLUTIONS AVEC LA RT2005

Accords de Rio et de Kyoto, Plan Climat 2004, Directive sur la Performance Energétique des Bâtiments, Loi d'Orientation sur les énergies...

Tout engage la France à réduire significativement ses consommations d'énergie et ses émissions de gaz à effet de serre.

A l'heure actuelle, 30 millions de logements français dégagent encore 95 millions de tonnes de CO₂ !

Afin de respecter ces engagements à long terme, dont l'objectif ultime est de **diviser par quatre à cinq les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050**, il est prévu un renforcement de la réglementation thermique tous les 5 ans, au moins jusqu'en 2015. C'est pourquoi la RT 2000, conçue pour évoluer facilement par étape, est aujourd'hui remplacée par la RT 2005 qui s'inscrit totalement dans la continuité de la précédente réglementation et fera elle-même l'objet d'une réactualisation en 2010.

Objectif visé

Applicable à tous les permis de construire déposés à partir du **1er septembre 2006**, la RT 2005 a pour objectif de **diminuer de 15 % les consommations énergétiques des bâtiments neufs**.

Les nouveautés par rapport à la RT 2000

Dans le prolongement de la RT 2000, la RT 2005 présente plusieurs nouveautés majeures :

- Les consommations énergétiques, formulées en consommation d'énergie primaire (Cep), ne sont plus exprimées en kWh/an, mais le sont désormais en kWh/m².an.
- Une consommation énergétique maximale (Cepmax) est introduite dans le secteur résidentiel uniquement pour les consommations de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Elle est définie par type d'énergie et zone climatique.
- Les énergies renouvelables sont intégrées et valorisées en plus des autres énergies. Ainsi, les projets architecturaux qui ne prévoiraient pas la production d'eau chaude par capteurs solaires sont pénalisés au niveau du calcul de référence. La loi d'orientation de la politique énergétique du 13 juillet 2005 prévoit un dépassement maximal du Coefficient d'Occupation des Sols (COS) de 20 % lorsque les constructions répondent à des critères de performance énergétique ou qu'elles comportent des équipements de production d'énergie renouvelable.
- La conception bioclimatique est favorisée et valorisée (inertie, orientation du bâtiment, apports solaires...).
- L'obligation pour le maître d'ouvrage de fournir une fiche de synthèse d'étude thermique à la fin des travaux. En cas d'absence, un système de sanction pourrait être mis en place.
- Les consommations d'énergie liées à la climatisation sont intégrées dans le calcul afin de maîtriser le recours à celle-ci. Une classification des bâtiments en fonction de leurs besoins ou non en climatisation est établie.
- L'étanchéité à l'air peut être valorisée à condition de respecter une procédure spécifique.
- Une simplification des données d'entrée des calculs et une recherche d'unification des résultats obtenus par les divers logiciels de calcul afin de faciliter le contrôle et la compréhension des études.

Les évolutions significatives par rapport à la RT 2000

Similaire à la RT 2000 dans sa structure, la RT 2005 impose toujours des garde-fous et des références aux systèmes et produits ainsi que des valeurs de référence pour les déperditions

thermiques du bâtiment Ubâtréf et sa consommation énergétique Cepréf.

Dans l'objectif que la moyenne des bâtiments ait un niveau de consommation énergétique de référence (Cepréf RT 2005) proche de Créf RT 2000 – 15 %, les garde-fous et références sont renforcés pour permettre d'atteindre les performances suivantes :

- Renforcement d'environ 10 % de la performance des parois.
- Diminution d'environ 20 % des pertes par ponts thermiques.

Les autres changements notables concernent les points suivants :

- La correction des données météorologiques, pour être opérationnelles et physiquement plus justes, a donné lieu à une définition plus fine des zones climatiques en fusionnant celles d'hiver (H1, H2, H3) et celles d'été (Ea, Eb, Ec, Ed) de la RT 2000. Les nouvelles zones sont désormais H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d et H3.
- Le calcul du coefficient C se fait désormais par m² de SHON qui est la surface « eurocompatible ».
- La prise en compte de l'éclairage dans le secteur résidentiel.
- Des modifications importantes pour la distribution et la génération de chaleur ainsi que pour la ventilation.

IV. LA RT2005 DANS LE DETAIL

Le renforcement des exigences sur l'isolation de l'enveloppe

Par rapport à la RT 2000, le renforcement des exigences sur l'isolation de l'enveloppe (renforcement moyen de 10 % sur les parois courantes de murs et renforcement de 20 % environ sur les ponts thermiques) a été fixé pour tenir compte de toutes les techniques constructives ayant un impact positif sur la maîtrise de l'énergie en confort d'été ou d'hiver. En effet, la réglementation n'a pas pour but d'écartier une technique constructive, mais plutôt d'en valoriser ses meilleures performances et de soutenir ses améliorations.

La compensation entre enveloppe et systèmes

Toujours présente dans la nouvelle réglementation, la compensation entre enveloppe et systèmes concerne désormais les secteurs résidentiel et tertiaire :

En résidentiel :

Dans la RT 2000, la limite de la compensation entre isolation et systèmes était fixée à 30 % :

$$Ubâtmax = Ubâtréf \times 1,30.$$

La RT 2005 fixe désormais cette compensation :

- à 25 % en logement collectif :

$$Ubâtmax = Ubâtbase \times 1,25$$

- à 20 % en maison individuelle :

$$Ubâtmax = Ubâtbase \times 1,20.$$

En tertiaire :

La RT 2000 ne donnait aucune limitation. Dans la nouvelle réglementation en revanche apparaît une limite à la compensation entre enveloppe et équipements de 50 % : soit $Ubâtmax = Ubâtbase \times 1,50$.

Ubâtbase est calculée de manière identique à Ubâtréf, mais prend en compte les surfaces exactes de vitrage du projet et non celles de référence (dont la valeur pour les logements est fixée à 1/6 de la surface habitable).

Il faut signaler la bonne évolution de 30 à 25 % dans le logement collectif et l'introduction de la limitation à 50 % dans le tertiaire, mais la compensation reste encore importante en maison individuelle.

La valorisation de l'étanchéité à l'air du bâti

La RT 2005 prévoit la prise en compte de valeurs de perméabilité des bâtiments meilleures que la valeur forfaitaire réglementaire pour tous les constructeurs et promoteurs qui auront mis en place

« une démarche de qualité de l'étanchéité à l'air des bâtiments ».

Ceux-ci devront établir un dossier technique, jugé par une commission d'experts, contenant notamment une série de mesures (par exemple 30 minimum pour une maison individuelle) justifiant de la valeur de la perméabilité de l'ouvrage.

Grâce à cette nouvelle possibilité de la RT 2005, les produits et systèmes performants vis-à-vis de l'étanchéité à l'air vont être valorisés. C'est le cas des isolants PSE notamment les complexes de doublage collés et les panneaux de toitures.

Le renforcement des exigences sur les équipements

Comme pour l'enveloppe, les exigences sur les équipements ont été renforcées que ce soit en chauffage gaz comme en chauffage par effet joule (électrique).

La grande nouveauté réside cependant dans l'introduction d'une nouvelle exigence relative à l'eau chaude sanitaire. Pour promouvoir et encourager l'utilisation d'énergies renouvelables, la RT 2005 pénalise les bâtiments résidentiels ne disposant pas d'eau chaude sanitaire solaire.

En maison individuelle :

- Avec chauffage par effet joule, à moins d'avoir installé 2 m² de panneaux solaires, la pénalisation sera de 20 % (consommations d'énergies pour la production d'eau chaude sanitaire réduites de 20 % en référence).
- Avec chauffage gaz (chaudière hors volume chauffé), il en est de même.

En logement collectif :

Avec chauffage par effet joule, à moins d'avoir installé 1 m² de panneaux solaires, la pénalisation sera de 10 %.

Ainsi, les maisons individuelles ou logements collectifs non équipés d'eau chaude sanitaire solaire devront donc compenser par une isolation thermique performante de leur enveloppe, comme celle proposée par les isolants PSE.

De même, le niveau de référence a été renforcé en ce qui concerne la ventilation des logements pour lesquels les réductions des déperditions liées à la ventilation deviennent :

Energie	RT 2000	RT 2005
Effet Joule	20% (H1 & H2) 0% (H3)	25%
Gaz	0%	10%

Les exigences en matière de consommation de refroidissement

Afin de maîtriser le recours à la climatisation et de valoriser les systèmes de rafraîchissement passifs, la RT 2005 définit 2 catégories de locaux :

- CE1

La 1ère catégorie devrait être la plus importante et regrouper les locaux ordinaires pour lesquels la RT 2005 considère qu'ils peuvent être conçus sans avoir besoin d'être climatisés. La consommation énergétique de référence des ouvrages de cette catégorie n'inclut pas de

consommation de refroidissement. Aussi, la climatisation n'est-elle pas interdite, mais les consommations éventuelles de refroidissement doivent être compensées par une diminution des consommations de chauffage, d'éclairage...

- CE2

La 2^{de} catégorie est réservée aux locaux plus contraints (hôpitaux, bureaux en zone de bruit et en zone climatique très chaude, Immeubles de Grande Hauteur...) qui nécessitent d'être climatisés. De ce fait, des consommations de refroidissement de référence sont définies. Précisément, un local est de catégorie CE2 s'il est muni d'un système de refroidissement et si son usage se situe dans les zones climatiques et de bruit suivantes :

Usages	Zones de bruit	Zones climatiques														
		H1a	H1b	H1c ≤ 400 m	H1c > 400 m	H2a	H2b	H2c ≤ 400 m	H2c > 400 m	H2d ≤ 400 m	H2d > 400 m et ≤ 800 m	H2d ≤ 800 m	H3 ≤ 400 m	H3 > 400 m et ≤ 800 m	H3 > 800 m	
Habitation, hébergement	BR1															
	BR2									CE2				CE2		
	BR3															
Enseignement	BR1															
	BR2									CE2				CE2		
	BR3															
Bureaux	BR1															
	BR2	CE2	CE2			CE2		CE2	CE2	CE2	CE2	CE2	CE2	CE2	CE2	CE2
	BR3															
Etablissements : commerce spectacle, conférence sanitaire...	BR1															
	BR2									CE2						
	BR3															

Les autres locaux sont de catégorie CE1.

Le nouveau paramètre Cepmax

Ce nouveau paramètre est défini **uniquement pour les bâtiments du secteur résidentiel**(1) et regroupe les consommations de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire exprimées en kWh d'énergie primaire par m² et par an. Celles-ci doivent être inférieures à des consommations maximales établies pour les zones climatiques H1, H2 et H3.

Ce paramètre permettra de comparer en valeur absolue deux postes importants de consommation énergétique de divers bâtiments dans une zone climatique donnée, en plus de comparer en valeur relative leurs consommations énergétiques totales par rapport à une référence.

Pour les bâtiments du secteur résidentiel, les consommations énergétiques doivent satisfaire deux exigences :

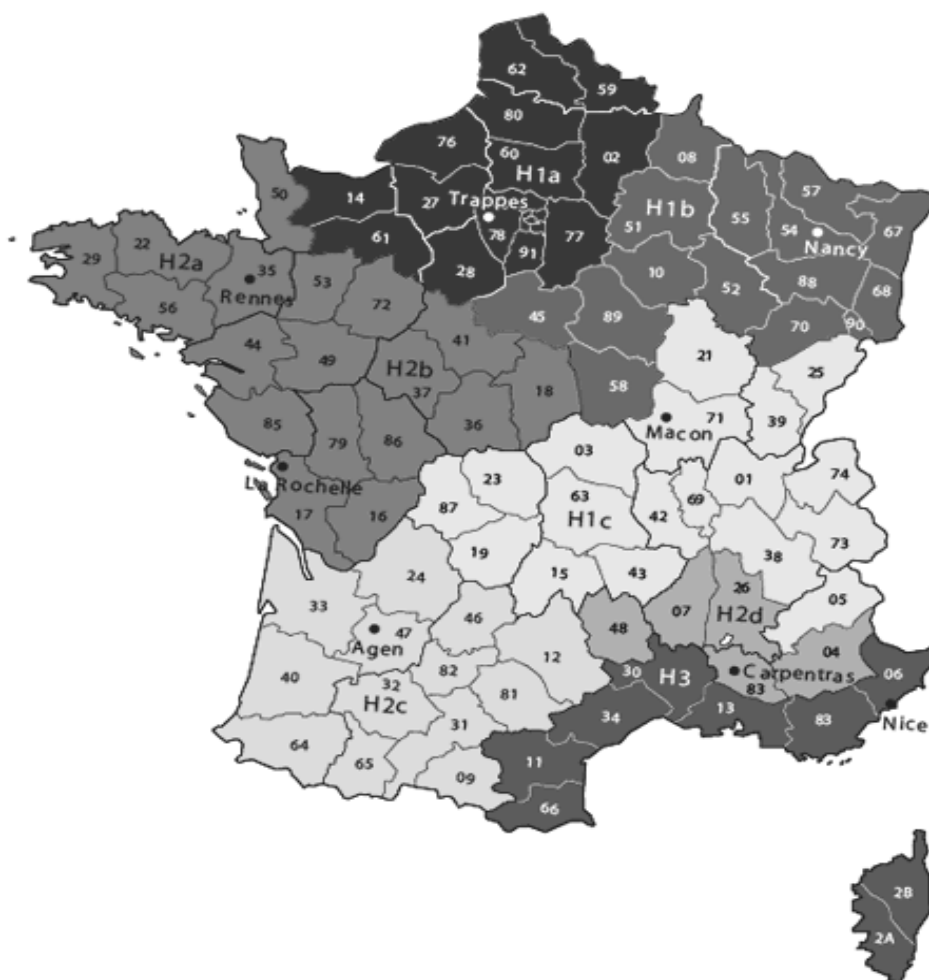
$$C \leq C_{\text{réf}} \text{ et } C_{\text{Chauffage}} + CECS \leq Cep_{\text{max}}$$

Pour les autres bâtiments, seule la consommation énergétique totale doit être inférieure à la

valeur conventionnelle de référence : $C \leq C_{ref}$.

(1) Les bâtiments utilisant le bois pour plus de 10 % de leurs besoins de chauffage sont exclus du champ d'application de l'exigence de consommation maximale.

Les nouvelles zones climatiques



Synthèse sur les études RT2005

Type de chauffage	Zones climatiques	Pour tout bâtiment à usage d'habitation C_{epmax} (kWh/m ² .an)
Combustibles fossiles	H1	130
	H2	110
	H3	80
Chauffage électrique (y compris les pompes à chaleur)	H1	250
	H2	190
	H3	130

Les réglementations thermiques ont fait l'objet de quelques contrôles en collectif et en tertiaire, mais n'ont jusqu'à présent fait l'objet d'aucun contrôle systématique en maison individuelle. Aussi, nul ne sait le nombre d'ouvrages non réglementaires bâtis ces dernières années. En raison des enjeux environnementaux actuels, il n'est plus concevable qu'il en soit encore ainsi.

C'est pourquoi, afin de faciliter la mise en place d'un système de contrôle d'application de cette nouvelle réglementation, cette dernière instaure la création d'une fiche de synthèse thermique qui sera exigée à la fin de chaque construction. Elle s'inscrit dans la lignée du Diagnostic de Performance Energétique requis selon la Directive sur la Performance Energétique des Bâtiments dans le cas des transactions immobilières.

Au plus tard à l'achèvement des travaux, le maître d'ouvrage doit fournir cette fiche indiquant les valeurs suivantes :

- Cep / Cepréf et Cepmax
- Ubât / Ubâtréf.
- U / Ubâtréf de chaque paroi.
- Valeur de chaque pont thermique ψ par rapport au ψ de référence.
- Étude de sensibilité du Cep sur 8 paramètres parmi lesquels la diminution du Ubât de 10 %, la diminution de la perméabilité à l'air, l'orientation des baies, la puissance VMC réduite de 20 %, la puissance de l'éclairage installée baissée de 10 %.

En cas d'absence, un système de sanction est à l'étude.

REGLEMENTATION THERMIQUE ET LABELS

Parallèlement à la Réglementation Thermique d'application obligatoire se sont développés des labels d'application volontaire (haute isolation en 1980, 1^{er} label HPE en 1983..) dont l'objectif est de réaliser des bâtiments aux performances meilleures que celles exigées par la réglementation en vigueur. En général, les caractéristiques de ces labels ont préfiguré les exigences des renforcements de la réglementation thermique suivante. De même, tout renforcement de la réglementation thermique a entraîné un renforcement des « exigences » des labels. Il devrait en être de même avec la RT 2005 en ce qui concerne de nouvelles caractéristiques pour les labels HPE et THPE.

V. Synthèse des évolutions et des nouveautés

Domaine d'application	RT 2000	RT 2005
Consommations énergétiques totales	Exprimées en kWh/an d'énergie primaire $C \leq C_{réf}$	Exprimées en kWh/m ² .an d'énergie primaire $C \leq C_{réf}$
Consommations énergétiques pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire	-	Exprimées en kWh/m ² .an d'énergie primaire $C_{chauffage} + C_{ECS} \leq C_{epmax}$
Energies renouvelables	-	Intégrées et valorisées
Conception bioclimatique	-	Valorisée
Fiche de synthèse	-	Mise en place
Climatisation	-	Intégrée
Étanchéité à l'air	Forfaitaire (meilleure valeur possible si mesurée pour chaque ouvrage)	Forfaitaire (meilleure valeur possible résultant de mesures sur échantillonnage de construction)
Parois	Valeurs de garde-fous et de référence	Renforcement d'environ 10 % de la performance des parois
Ponts thermiques	Valeurs de garde-fous et de référence	Diminution d'environ 20 % des pertes par ponts thermiques
Compensation entre enveloppe et systèmes	Maison individuelle : 30 % max Logement collectif : 30 % max Tertiaire : non défini	Maison individuelle : 20 % max Logement collectif : 25 % max Tertiaire : 50 % max
Zones climatiques	H1 H2 H3	H1a, H1b, H1c H2a, H2b, H2c, H2d H3
Température intérieure conventionnelle	Calculée par bâtiment	Calculée par zone d'usage, chacune devant respecter $T_{icréf}$ pour être conforme
Eclairage	Bâtiments tertiaires	Tous les bâtiments
Équipements (eau chaude sanitaire solaire, ventilation...)	Valeurs de garde-fous et de référence	Renforcement des exigences

Les exigences minimales : GARDE-FOUS

LES GARDE-FOUS DES PAROIS sont exprimés par les coefficients de transmission thermique U maximale et traduisent les résistances minimales requises pour chaque paroi.

Parois	RT 2000		RT 2005	
	U paroi maximale (W/m ² .K)	R paroi minimale (m ² .K/W)	U paroi maximale (W/m ² .K)	R paroi minimale (m ² .K/W)
Murs en contact avec l'extérieur ou avec le sol	0,47	2,0	0,45	2,05
Murs en contact avec un volume non chauffé	-	-	0,45 / b*	2,05
Combles et rampants	0,30	3,2	0,28	3,45
Toitures terrasses	0,36	2,6	0,34	2,80
Toitures en tôles métalliques étanchées	0,47	2,0	0,34	2,80
Planchers hauts en béton ou en maçonnerie	0,36	2,6	0,34	2,80
Planchers bas sur vide sanitaire	0,43	2,0	0,40	2,15
Planchers sur local non chauffé	-	-	0,40	2,15
Planchers bas donnant sur l'extérieur	0,36	2,6	0,36	2,60
Planchers bas donnant sur parking collectif	0,36	2,5	0,36	2,50
Planchers bas sur terre-plein Isolation périphérique sur :	-	1,4 Risolant 1,50 m	-	1,7 Risolant 1,20 m
Fenêtres et porte-fenêtres prises nues donnant sur l'extérieur	2,90	-	2,60	-
Façades rideaux	2,90	-	2,60	-
Coffrets de volets roulants	-	-	3,00	-

* b étant le coefficient de réduction des déperditions vers les volumes non chauffés, défini dans la méthode de calcul de Ubât.

LES GARDE-FOUS DES PONTS THERMIQUES sont exprimés par les coefficients de transmission thermique linéique Ψ maximal.

Note de rappel : Un pont thermique ψ dû à une liaison n'est lié qu'à la géométrie de celle-ci et ne dépend en aucun cas de la nature de l'isolant.

* Valeur égale à 0,75 jusqu'au 31 décembre 2007

Ponts thermiques	Ψ maximal (W/m.K)	
	RT 2000	RT 2005
Liaisons entre 2 parois dont l'une au moins est en contact avec l'extérieur	Maisons individuelles : 0,99 Logements collectifs : 1,10 Autres bâtiments : 1,35	Maisons individuelles : 0,65* Logements collectifs : 1,00 Autres bâtiments : 1,20

LES VALEURS DE REFERENCE DES PAROIS

sont exprimées par les coefficients de transmission thermique de a1 à a7 en W/m².K.

Parois	RT 2000		RT 2005	
	Zones H1 et H2	Zone H3	Zones H1, H2 et H3 (> 800m)	Zone H3 (≤ 800m)
Murs en contact avec l'extérieur (a1)	0,40	0,47	0,36	0,40
Combles et rampants (a2)	0,23	0,30	0,20	0,25
Toitures terrasses (a3)	0,30	0,30	0,27	0,27
Planchers bas (a4)	0,30	0,43	0,27	0,36
Portes (a5)	1,50	1,50	1,50	1,50
Fenêtres et portes-fenêtres (a6)*	2,40	2,60	2,10	2,30
Fenêtres et portes-fenêtres équipées de fermeture (a7)	2,00	2,35	1,80	2,10

* a6 = a7 pour le secteur résidentiel

LES VALEURS DE REFERENCE DES PONTS THERMIQUES

sont exprimées par les coefficients de transmission thermique linéique a8, a9 et a10 en W/m.K.

Ponts thermiques	Zones H1, H2 et H3		RT 2005
	RT 2000		
Planchers bas / murs (a8)	Maisons individuelles :	0,50	Maisons individuelles : 0,40
	Logements collectifs :	0,50	Logements collectifs : 0,40
	Autres bâtiments :	-	Autres bâtiments : 0,40
Planchers intermédiaires sous combles / murs (a9)*	Maisons individuelles :	0,70	Maisons individuelles : 0,55
	Logements collectifs :	0,90	Logements collectifs : 0,60
	Autres bâtiments :	0,90	Autres bâtiments : 0,60
Toitures terrasses / murs (a10)*	Maisons individuelles :	0,70	Maisons individuelles : 0,50
	Logements collectifs :	0,90	Logements collectifs : 0,60
	Autres bâtiments :	0,90	Autres bâtiments : 0,60

* Pour les bâtiments autres que les maisons individuelles, les coefficients a9 et a10 sont pris égaux à 0,70 jusqu'au 31 décembre 2007.

Annexe 5 : Etude sur 2 constructions BM

Maison d'habitation

La maison d'habitation se compose d'une partie rez-de-chaussée comprenant deux chambres, un bureau, le séjour, la cuisine, la salle de bain, les WC, un cellier et une entrée. Ce rez-de-chaussée est surplombé d'un étage contenant une mezzanine, un bureau et une chambre.



Bâtiment «B.HA», Vue général

La surface totale de la maison est de 147 m² et son volume de 303 m³. Cette maison est habitée toute l'année par une famille de 4 personnes, deux adultes et deux enfants. Le chauffage est assuré par une chaudière fuel et un plancher chauffant seulement disposé au rez-de-chaussée. Les murs son en bois massif contrecollé verticalement d'épaisseur de 113 mm.

Bâtiment bureaux

Ce bâtiment sert à la fois, de bureaux et de pavillon témoin pour la société CBC. Donc la maison abritant les bureaux est conçue comme un véritable logement individuel. Contrairement à la première maison on n'y trouve qu'un étage comprenant une salle de réunion à la place de séjour, ainsi qu'une cuisine, un cellier, trois bureaux à la place des chambres, une salle de bain équipée d'un sauna et enfin des WC. La surface totale de ce bâtiment est de 110 m² et son volume de 350 m³. Ce bâtiment est équipé de convecteurs électriques à la place de plancher chauffant. Les murs son en bois massif contrecollé verticalement d'épaisseur de 134 mm.

Sept personnes travaillent dans ces bureaux de 9h00 jusqu'à 18h00, la salle de réunion comprenant le bureau de secrétaire et le bureau de directeur. En plus, les occupants des bureaux l'utilise comme salle à manger l'heur de déjeuner (entre 13h00 et 14h00).



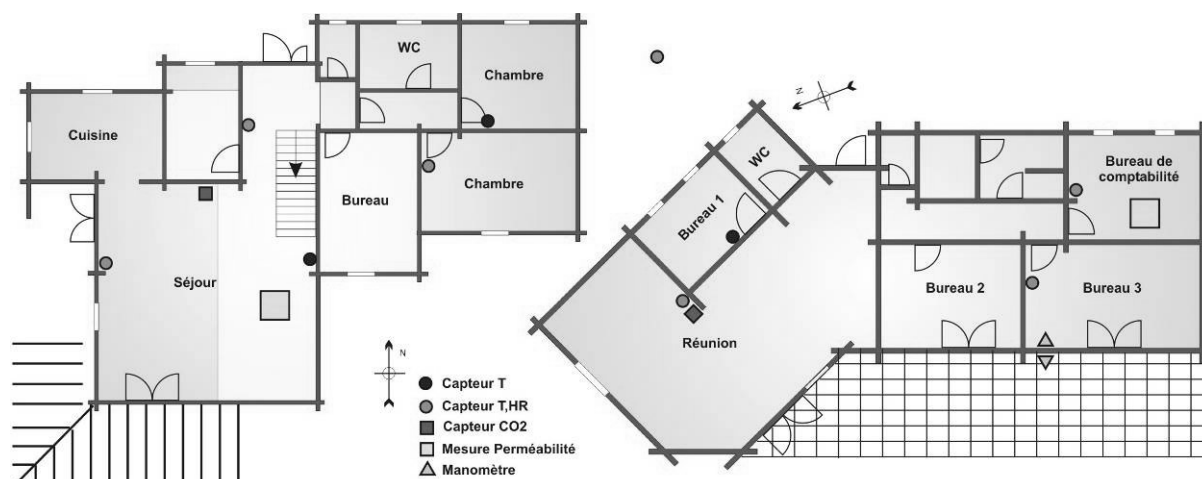
Bâtiment de Bureaux, Vue général

Aucun système de ventilation mécanique n'est installé dans ces 2 bâtiments à l'exception d'un simple extracteur en cuisine dans le bâtiment «B.HA».

Les mesures de températures (T) et d'humidité relative (HR) sont effectuées à l'aide des capteurs de type HOBO H08 à l'intérieur de 2 bâtiments tests. 4 capteurs sont placés dans le bâtiment «B.HA», et 5 autres capteurs sont placés dans le bâtiment bureaux une station météo est placée à l'extérieur de bâtiments pour mesurer la température et l'humidité extérieure. Les points, le type et l'intervalle des mesures sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau récapitulatif des capteurs mis en place.

Nom de capteur	Référence capteur	Type de mesure	Bâtiment	Emplacement	Intervalle
B1	HOBO H08-004-02	T_{int} , RH, Lum.	Bureau	Salle de réunions	15 min
B2	HOBO H08-003-02	T_{int} , RH.	Bureau	Bureau 4	15 min
B4	HOBO H08-001-02	T_{int}	Bureau	Bureau 2	5 min
B5	HOBO H08-004-02	T_{int} , RH, Lum.	Bureau	Bureau 1	15 min
Ext	HOBO H08-003-02	T_{ext} , RH.	Extérieur	Extérieur	15 min
WS 2500-25	WS 2500	T_{ext} , RH.	Extérieur	Extérieur	15 min
M1	HOBO H08-001-02	T_{int}	Maison	Chambre 1	5 min
M2	HOBO H08-001-02	T_{int}	Maison	Etage	15 min
M3	HOBO H08-003-02	T_{int} , RH	Maison	Entrée	15 min
M4	HOBO H08-004-02	T_{int} , RH, Lum.	Maison	Chambre 2	15 min
M5	HOBO H08-004-02	T_{int} , RH, Lum.	Maison	Séjour	15 min

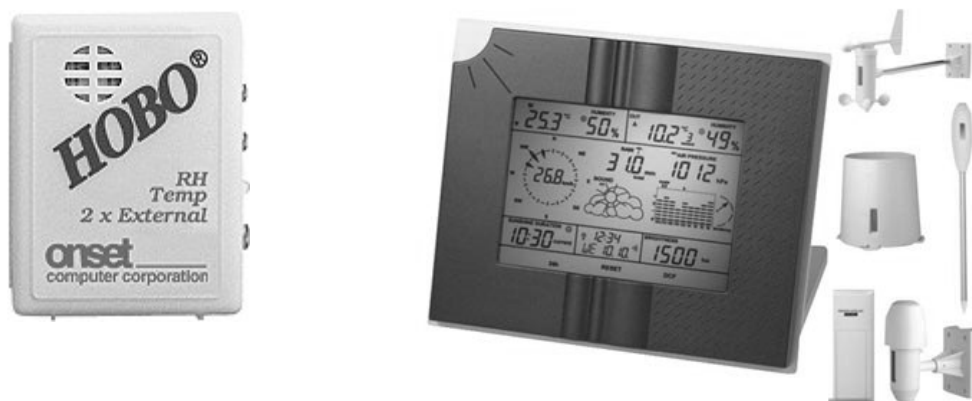


Déplacement de capteurs de température et d'humidité relative dans les 2 bâtiments tests Rem SR, (les noms de capteurs sont changer il me faut refaire la figure)

Appareils et périodes de mesure

Les 10 mars 2004 nous avons installé neuf capteurs de type HOBO H08 dans les 2 bâtiments, les capteurs HOBO H08 ont leur propre source d'alimentation (une pile au lithium) et ont très grande autonomie, ils ont un mémoire interne qui permet de stocker les donnée jusqu'à 35000 point de mesure, la précision de mesure est $\pm 0,7$ °C pour la sonde de température et $\pm 5\%$ pour l'humidité. Les capteurs sont placés à une hauteur minimale de 1,5 m du sol, sur les murs intérieurs qui ne sont pas en contact avec l'extérieur et protégés du soleil.

En plus, et pour bien relier les conditions intérieures et extérieures, un capteur extérieur HOBO H08-003-02 a été placé à l'extérieur sous abri, une station météo de type WS 2500 (annexe 1) a été installé entre les 2 bâtiments pour relever la température, l'humidité, la luminosité ambiante, la quantité de pluie, la direction et la vitesse du vent (figure 5-B). Les capteurs sont vidés régulièrement chaque 15 jours et les data sont enregistrées à l'aide d'un programme « Box Car Pro » vers des fichiers Excel.



A) Capteur HOBO H08, B) Centre météo professionnel La Crosse Technologie WS 2500

Enregistreurs HOBO® U12

Les enregistreurs HOBO® U12 sont des nouvelles séries de data logger miniatures pour des applications professionnelles en laboratoire ou en extérieur. Leur très petite taille leur confère une très grande souplesse d'utilisation dans des domaines très variés. Il se branche au port USB d'un ordinateur type PC ou Mac. 64K de mémoire (65000 relevés). Téléchargement complet en 30 secondes via port USB. Les mesures peuvent être récupérées directement en branchant l'enregistreur sur un PC. La programmation des enregistreurs et la récupération des données se fait au moyen du logiciel GREENLINE®. Possibilité de différer le démarrage de l'enregistrement via logiciel ou démarrage manuel par bouton poussoir. Le pas de temps d'enregistrement est programmable de 1 sec. à 18 h. Indication de l'état de la pile au démarrage. Confirmation des opérations par diode clignotante. Durée de vie de la pile : 3 ans (remplaçable).



Gammes de mesure :

-20°C à +70°C en température, 5 à 95% en HR, Luminosité de 1 à 278 Lux.

Précision : $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ de 0 à 50°C et $\pm 2.5\%$ HR de 10 à 90%HR.

Station météo WS 2500



Station météo WS 2500

Le must absolu en matière de météo et trois points forts pour cet aboutissement technologique : l'écran tactile avec affichage immédiat sur l'écran de toutes les données, la gestion informatique des données, l'affichage immédiat sur l'écran des graphiques sous forme d'histogrammes pour toutes les données et pour toutes les unités de mesure.

Fonction	Détails
plage de relevé de température intérieure	<p>de -30°C à + 70 °C</p> <p>Relevé toutes les 3 minutes</p> <p>Résolution : 0,1 C°</p>
plage de relevé de température extérieure	<p>de -30°C à + 70 °C</p> <p>Relevé toutes les 3 minutes</p> <p>Résolution : 0,1 C°</p>
plage de relevé l'humidité intérieure	<p>de 20% à 95 %</p> <p>Relevé toutes les 3 minutes</p> <p>Résolution: 1%</p>
plage de relevé l'humidité extérieure	<p>de 20% à 95 %</p> <p>Relevé toutes les 3 minutes</p> <p>Résolution : 1%</p>
pluviométrie	<p>Possibilité d'afficher au choix les volumes de pluie cumulée pendant l'heure, pendant l'heure précédente, pendant la journée, pendant la veille et au total en mm, en l/m2 ou en pouce</p> <p>Enregistrement de la quantité maximale de pluie recueillie par heure et par jour</p> <p>Affichage du volume de 0 à 3,999 mm</p> <p>Résolution : < 0,5 mm</p>
aérogologie	<p>Affichage de la vitesse du vent en km/h, m/s, nœuds, mph ou Beaufort (de 0 à 200 km/h)</p> <p>Affichage de la direction du vent sur un compas de 360°</p> <p>Affichage des valeurs mini / maxi avec heure et date des relevés</p> <p>Relevé toutes les 3 minutes</p> <p>Affichage graphique de l'historique, sur les dernières 24 heures ou sur les 8 derniers jours, au choix de l'utilisateur</p> <p>Transmission par 433 MHz</p>
température ressentie	<p>Affichage de la température ressentie (ou Windchill). Cette température varie en fonction de la température extérieure et de la vitesse du vent</p> <p>Affichage des valeurs mini / maxi avec heure et date des relevés</p>
point de rosée	<p>Affichage du point de rosée. C'est la température mesurée lorsque la convergence entre la pression, la température et l'humidité amène à la condensation de l'humidité, au point que celle-ci se liquéfie.</p> <p>Affichage des valeurs mini / maxi avec heure et date des relevés</p>
pression atmosphérique	<p>Affichage de la pression atmosphérique sous forme numérique en hPa, en inHg ou en mmHg</p>

Affichage de la pression atmosphérique absolue de 800 hPa à 1100 hPa
Affichage en alternance de la pression atmosphérique absolue et relative (corrigée à la hausse)
Affichage des valeurs mini / maxi avec heure et date des relevés

durée d'ensoleillement Luminosité exprimée en lux ou en klux, de 0 à 9999 heures
Affichage au choix de la durée d'ensoleillement total, du jour ou de la veille
Ajustement des seuils d'ensoleillement hauts et bas
Affichage des valeurs mini / maxi avec heure et date des relevés
Affichage graphique de l'historique, sur les dernières 24 heures ou sur les 8 derniers jours, au choix de l'utilisateur

connexion informatique Configuration du système informatique :
incluse Système d'exploitation : Windows NT, 98 ou supérieur
Lecteur de CD Rom
Livrée avec un logiciel d'installation (Anglais et Allemand) , 2 mètres de câble avec prise RS 232 pour connexion informatique
Téléchargement sur votre ordinateur de toutes les données recueillies par les capteurs (9 ou 16 capteurs selon l'intervalle choisi)
Permet l'exploitation des fichiers (historique) sur tableur pour la conception de graphiques

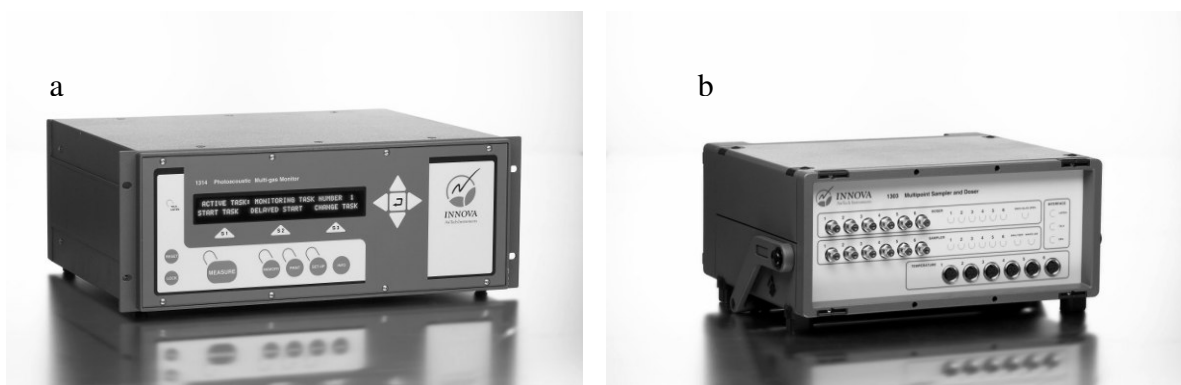
alimentation par piles Base 4 x LR 14 pour la base ou Branchement AC / DC
Les capteurs : Piles solaires au lithium activées par un aimant inclus

distance de transmission 100 mètres en champ libre

Annexe 6 : Multi gaz moniteur INNOVA® 1314 et échantillonneur / doseur INNOVA® 1303

Le Multi gaz moniteur INNOVA® 1314 (figure A) est un moniteur quantitatif fortement précis, digne de confiance, son principe de mesure est basé sur la méthode de détection infrarouge photo acoustique. Ceci signifie que les INNOVA® 1314 peuvent mesurer presque n'importe quel gaz qui absorbe la lumière infrarouge.

Le système d'échantillonneur / doseur INNOVA® 1303 (figure B) a six canaux d'admission et six canaux de doseur, chacun a une valve de solénoïde, six tubes de longueur jusqu'à de 50m relient chaque canal au point respectif de prélèvement. Le converge de six canaux d'admission peut alors diriger l'échantillon de gaz vers INNOVA® 1314 pour l'analyse. Un filtre à air est attaché à l'extrémité de chaque tube de prélèvement pour maintenir les échantillons exempts des particules.



a) Multi gaz moniteur INNOVA® 1314.

b) Le système d'échantillonneur / doseur INNOVA® 1303

Annexe 7 : Mesure de perméabilité par la méthode de Gaz Traceur

Cette méthode d'essai est appropriée pour le milieu aux bas taux d'échange d'air (moins de 6 changements d'air par heure). La période de temps de mesure optimale est l'inverse du taux volumétrique de changement d'air. Si le taux de changement d'air est 6 changements d'air par heure, le temps de mesure idéal est de 10 minutes. (Heidt et Werner, 1986). Le taux de renouvellement d'air estimer est de 0,4 Volume d'air par heure, le temps de mesure nécessaire donc est 2,50 heures.

Le gaz traceur (SF6) est injecté jusqu'à atteindre une concentration de 100 mg/m³. A cet instant (t=0), l'injection est stoppée et la concentration en gaz traceur est mesurée à intervalle de 10 minutes, pour permettre d'observer sa décroissance au cours du temps.

A condition qu'aucun gaz traceur ne soit émis et que l'écoulement soit constant, on remarque que la concentration de gaz traceur diminue exponentiellement avec le temps. Le tracé semi-logarithmique en fonction du temps est une ligne droite dont l'opposé de la pente représente le taux de renouvellement d'air dans l'enveloppe. Le taux de renouvellement d'air N se calcule en utilisant l'équation 001:

$$N = \frac{\ln C_0 - \ln C_t}{dt} \quad (001)$$

Avec : C_0 : Concentration au temps 0 (m³/m³)

C_t : Concentration au temps t_1 (m³/m³)

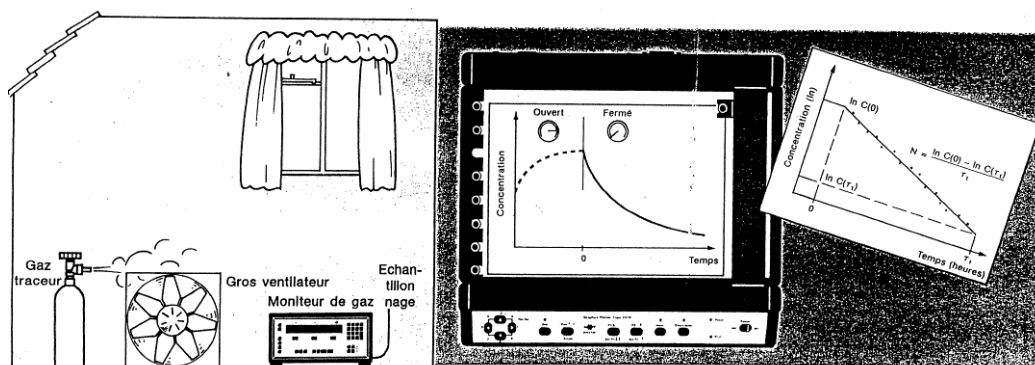


Figure 34 : La méthode d'affaiblissement de Traceur pour mesurer le taux de renouvellement d'air dans le bâtiment.

Annexe 8 : Mesure de perméabilité par la méthode de «Blowerdoor ou porte soufflante »

Cette étude présente les travaux menés à l'aide de M. Andrés LITVAK de CETE du Sud - Ouest, dans le cadre d'un projet de collaboration entre le laboratoire TREFLE et le CETE de CETE du Sud-ouest

Ce travail présente les résultats de mesure, relative à une maison en bois massif (maison d'habitation) proposé par la société CBC, sur la perméabilité à l'air de l'enveloppe des constructions et sur son impact sur le fonctionnement de la ventilation naturelle.

Description de méthode de dépression « Blowerdoor ou porte soufflante »

Pour mesurer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe des constructions, nous avons utilisé un banc de mesure défini par le CETE de Lyon, appelé communément la « Blowerdoor ou porte soufflante », conforme à la norme EN 13829, et procède suivant le protocole expérimental décrit dans la norme internationale ISO 9972 [ISO9972, 1996 #80]. Le principe consiste à remplacer un des ouvrants de l'enveloppe par un dispositif parfaitement étanche, comportant une ouverture connectée à un ventilateur de vitesse variable. Généralement, la porte d'entrée du logement est choisie pour cette technique. On la remplace par une «fausse porte» étanche et adaptable aux différentes dimensions (Guillot et Litvak, 2000). Pour réaliser la mesure d'étanchéité à l'air, le colmatage systématique des bouches de ventilation volontaire (entrées et sorties) est réalisé à l'aide de rubans adhésifs. Parallèlement, le banc de mesure est installé dans le logement. Au terme des essais de perméabilité, le logement est remis en situation d'utilisation normale.

La durée de l'opération totale, en tenant compte du temps d'installation et de démontage du matériel, est d'environ deux heures pour chaque essai.

La vitesse du ventilateur est augmentée par paliers stationnaire de 10 Pa environ, afin de mettre le logement progressivement en dépression, jusqu'à un maximum généralement voisin de 60 Pa. A chaque palier, les pressions indiquées par le manomètre sont relevées en conditions statiques. Une fois le maximum de dépression atteint, la vitesse du ventilateur est réduite par palier, jusqu'à un retour au minimum, voisin de 10 Pa. Ces «montée» et «descente» successives en pression permettent d'obtenir deux séries de points expérimentaux à exploiter.

Afin de comparer le bâtiment avec la réglementation thermique RT2000 et d'apprécier son étanchéité à l'air, il existe de nombreux indicateurs pour caractériser la perméabilité d'une

enveloppe dont on trouvera une liste quasi-exhaustive dans l'état de l'art réalisé par le CETE de Lyon en 2000 et dans la norme NF EN 13829 (2001). Nous nous concentrons ici sur un indicateur fréquemment utilisé, qui repose sur la loi semi-empirique liant le débit de fuite q_v (m^3/h) à travers une enceinte à la différence de pression Δp (Pa) créée dans l'enceinte par rapport à son environnement:

$$q_v = C_L \Delta p^n$$

où: C_L exprimé en $m^3/h/Pa^n$ est généralement appelé coefficient de fuite d'air. Il dépend notamment de la surface de fuite et de la forme des orifices. n (sans unité) est généralement appelé exposant de l'écoulement. (n) dépend de la nature de l'écoulement. Par défaut, on retient généralement une valeur de $2/3$. Un exposant proche de 1 caractérise un écoulement laminaire, alors qu'un exposant proche de 0,5 caractérise un écoulement inertiel.

Le décret n° 2000-1153 du 29/11/2000 fixe le cadre de travail et l'article 15 de l'arrêté du 29/11/2000 précise des perméabilités de référence et par défaut en terme de I_4 selon les usages. Ainsi, il est possible de valoriser une bonne étanchéité à l'air dans le calcul du coefficient énergétique C en se fixant une valeur de perméabilité à l'air qui devra être vérifiée à l'issue de la construction. En l'absence d'une telle démarche, on prendra alors pour le calcul du C une valeur « pénalisante » de perméabilité. Cette valeur pénalisante (= valeur par défaut) est supérieure de $0.5 m^3/h/m^2$ à la valeur de référence. Toutefois, les connaissances acquises sur le parc existant révèlent que cette valeur par défaut reste en réalité peu pénalisante : par exemple, plus d'un tiers des maisons individuelles testées par le CETE de Lyon (Guillot et Litvak, 2000) présentent une perméabilité supérieure à la valeur par défaut.

Le tableau 4 donne une appréciation qualitative de la perméabilité de référence et par défaut définies dans la RT 2000

Perméabilité de référence et par défaut définies dans la RT 2000

Usage	perméabilité de référence ($m^3/h/m^2$ à 4 Pa)	perméabilité par défaut ($m^3/h/m^2$ à 4 Pa)
Logement individuel	0,8	1,3
Logement collectif, bureaux, hôtels, enseignement, petits commerces, établissements sanitaires	1,2	1,7
Autres usages	2,5	3

Rapport d'essai de perméabilité selon la Norme EN 13829

Maison de M. Baetens - "Le Bourg Nord"

Données sur l'opération & conditions d'intervention

Adresse : Jugazan (33420) Contact : M. Baetens

Opérateurs : Andrés LITVAK (CETE Sud Ouest) Date de l'intervention : 9-mai-06

Type de logement : maison individuelle

Surface habitable : 147 m² Hauteur du bâtiment : m

Surfaces déperditives : 357 m² Température extérieure : 16 °C

Volume chauffé : m³ Température intérieure : 19 °C

Mesures réalisées

Diaphragme numéro	Valeur cible (Pa)	ΔP mesuré (Pa)	ΔP corrigé (Pa)	Débit Q corrigé (m ³ /h)	Points retenus pour l'analyse
-1	0	1.6	0.1	0	<input checked="" type="checkbox"/> point 1
1	60	62.0	60.4	3435	<input checked="" type="checkbox"/> point 2
1	55	56.7	55.2	3284	<input checked="" type="checkbox"/> point 3
1	50	53.0	51.5	3120	<input checked="" type="checkbox"/> point 4
1	45	47.0	45.4	2843	<input checked="" type="checkbox"/> point 5
1	40	42.1	40.6	2602	<input checked="" type="checkbox"/> point 6
1	35	37.4	35.9	2299	<input checked="" type="checkbox"/> point 7
1	30	30.5	29.0	2026	<input checked="" type="checkbox"/> point 8
1	25	27.4	25.9	1890	<input checked="" type="checkbox"/> point 9
-1	0	1.4	0.1	0	<input checked="" type="checkbox"/> point 10

Mise en dépression

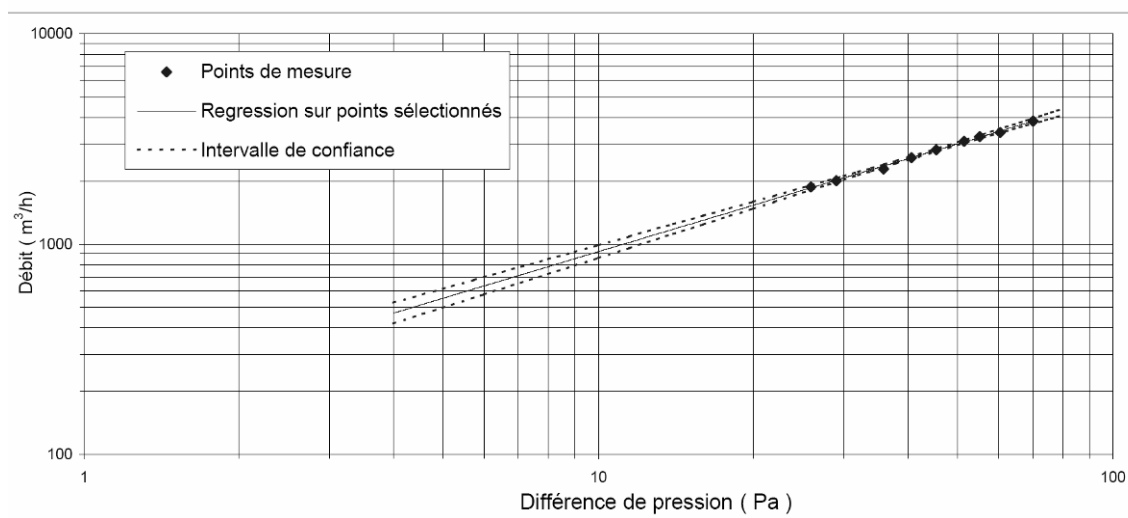
Différences de pression à débit nul		
Avant l'essai	ΔP_{01+}	0.00
	ΔP_{01-}	-1.62
Après l'essai	ΔP_{02+}	0.00
	ΔP_{02-}	-1.44

Force du vent	
Chiffre de l'échelle de Beaufort	2
ou	
Vitesse en m / s	

Résultats

Intervalle de confiance à :			95%
I_4 (m ³ /(h.m ²))	I_4 inf	I_4 sup	Facteur multiplicateur (-)
1.32	1.18	1.48	1.12
n10 (Volume/h)	τ_{10} inf	τ_{10} sup	Facteur multiplicateur (-)
n50 (Volume/h)	n50 inf	n50 sup	Facteur multiplicateur (-)
n (-)	n inf	n sup	Erreur absolue (-)
0.73	0.69	0.78	0.05
K (m ³ /h.Pa ⁻¹)	K inf =	K sup =	Facteur multiplicateur (-)
170.12	142.01	203.79	1.20

Coefficient de corrélation linéaire (R²) = 0.998



Rapport d'essai de perméabilité selon la norme EN 13829 réalisé à l'aide de CETE Sud-ouest.

