



HAL
open science

Impact thermique des revêtements en bois sur l'ambiance intérieure des bâtiments : application dans l'habitat traditionnel en France et à Madagascar

Zaratiana Harijaona Mandrara

► **To cite this version:**

Zaratiana Harijaona Mandrara. Impact thermique des revêtements en bois sur l'ambiance intérieure des bâtiments : application dans l'habitat traditionnel en France et à Madagascar. Architecture, aménagement de l'espace. INSA de Lyon, 2011. Français. NNT : 2011ISAL0052 . tel-00690806

HAL Id: tel-00690806

<https://theses.hal.science/tel-00690806>

Submitted on 24 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse

**Impact thermique des revêtements en
bois sur l'ambiance intérieure des
bâtiments**
Application dans l'habitat traditionnel en
France et à Madagascar

Présentée devant
L'institut national des sciences appliquées de Lyon

Pour obtenir
Le grade de docteur

Formation doctorale : Mécanique Energétique Génie Civil et Acoustique
École doctorale : MEGA de Lyon

Par
Zaratiana Harijaona
(Ingénieur)

Soutenue le 10 juin 2011 devant la Commission d'examen

Jury MM.

	G. GUARRACINO	Directeur de thèse (ENTPE)
	R. CANTIN	Co-directeur de thèse (ENTPE)
Président	J.J. ROUX	Professeur (INSA de Lyon)
Rapporteurs	G. FRAISSE	Professeur (Université de Savoie)
	P. DEPECKER	Professeur (Burkina Faso)
Examineur	B. MOUJALLED	Docteur-Ingénieur (CETE du Sud-Ouest)

Laboratoire de recherche : Laboratoire des Sciences de l'Habitat
DGCB CNRS FRE 3237

ECOLES DOCTORALES n° code national	RESPONSABLE PRINCIPAL	CORRESPONDANT INSA	LABORATOIRES RATTACHES	DIRECTEUR LABORATOIRE
ED CHIMIE DE LYON (Chimie, Procédés, Environnement) http://sakura.cpe.fr/E206 EDA206	M. Jean-Marc LANCELIN CPE LYON 04.72.43.13.95 lancelin@hikari.cpe.fr Directrice Adjointe : Mme Bernadette CHARLEUX Bernadette.charleux@lcpp.cpe.fr	M. Patrick GERMAIN 82.76 Sec 84.30 Patrick.germain@insa-lyon.fr	Matériaux : Ingénierie et Sciences – MATEIS Bât Blaise Pascal Laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnemental - LGCIE Bât J.C.A. Coulomb Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires – ICBMS/LCO Bât Jules Verne	M. Joël COURBON Dir. Adj. : M. Jean-Yves CAVAILLE Jean-Yves.Cavaille@insa-lyon.fr M. Bernard CHOCAT bernard.chocat@insa-lyon.fr M. Loïc BLUM INSA : M. Alain DOUTHEAU Alain.Doutheau@insa-lyon.fr
Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science Politique, Sociologie, Anthropologie (ScSo) EDA483	M. Lionel OBADIA Lionel.obadia@univ-lyon2.fr LYON 2	M. Jean Yves TOUSSAINT 60.92 jean-yves.toussaint@insa-lyon.fr	Environnement, Ville et Société / Equipe Développement Urbain - EVS/EDU Bât Eugène Freyssinet Etude du Phénomène Scientifique - STOICA/LEPS Bât Les Humanités	M. Paul ARNOULD INSA : M. Jean-Yves TOUSSAINT Jean-yves.Toussaint@insa-lyon.fr M. Michel FAUCHEUX Michel.fauchoux@insa-lyon.fr
ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE (E.E.A.) EDA160	M. Alain NICOLAS ECL 04.72.18.60.96 Alain.Nicolas@ec-lyon.fr		Laboratoire Génie Electrique, Automatique, Génomique et Microbiologie Environnementale - AMPERE Bât Antoine St Exupéry Contrôle Non Destructif par Rayonnements Ionisants - CNDRI Bât Antoine de Saint Exupéry Centre de Recherche et d'Application en Traitement de l'Image et du Signal - CREATIS Bât Blaise Pascal Laboratoire Génie Electrique et Ferroélectricité - LGEF Bât Gustave Ferrié Institut des Nanotechnologies de Lyon - INL Bât Blaise Pascal	M. Laurent NICOLAS INSA : M. Bruno ALLARD Bruno.Allard@insa-lyon.fr M. Daniel BABOT daniel.babot@insa-lyon.fr Mme Isabelle MAGNIN isabelle.magnin@insa-lyon.fr M. Daniel GUYOMAR Daniel.Guyomar@insa-lyon.fr M. Guy HOLLINGER Dir. Adj. : M. Gérard GUILLOT gerard.guillot@insa-lyon.fr
EVOLUTION, ECOSYSTEMES, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://biomserc.univ-lyon1.fr/E2M2 (E2M2) EDA 341	M. Jean-Pierre FLANDROIS 04.78.86.31.50 e2m2@univ-lyon1.fr	M. CHARLES Hubert 80.85 Hubert.charles@insa-lyon.fr	Biologie Fonctionnelle, Insectes et Interactions - BF2I Bât Louis Pasteur	M. Yvan RAHBE Yvan.rahbe@insa-lyon.fr

<p>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ</p> <p>http://www.ibcp.fr/edis</p> <p>(EDISS)</p> <hr/> <p>EDA205</p>	<p>M. Didier REVEL UCBL 1 04.72.35.72.32 didier.revel@creatis.univ-lyon1.fr</p>	<p>M. Michel LAGARDE 82.40 Michel.Lagarde@insa-lyon.fr</p>	<p>Centre de Recherche et d'Application en Traitement de l'Image et du Signal - CREATIS Bât Blaise Pascal</p> <hr/> <p>Régulations Métaboliques, Nutrition et Diabète - RMND Bât Louis Pasteur Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires - ICBMS Bât Jules Verne <i>Microbiologie, Adaptation et Pathogénie - MAP</i> Bât Louis Pasteur</p>	<p>Mme Isabelle MAGNIN isabelle.magnin@insa-lyon.fr</p> <p>M. Michel LAGARDE Michel.Lagarde@insa-lyon.fr</p> <p>M. Loïc BLUM INSA : M. Alain DOUTHEAU Alain.Doutheau@insa-lyon.fr</p> <p>Mme Nicole COTTE-PATTAT Nicole.Cotte-Pattat@insa-lyon.fr</p>
<p>ED MATERIAUX DE LYON</p> <p>http://www.ec-lyon.fr/sites/edml</p> <hr/> <p>EDA 034</p>	<p>M. Jean Marc PELLETIER 83.18 Jean-Marc.Pelletier@insa-lyon.fr</p>		<p>Ingénierie des Matériaux Polymères / Matériaux Macromoléculaires - IMP/LMM Bât Jules Verne</p> <hr/> <p>Matériaux : Ingénierie et Science - MATEIS Bât Blaise Pascal Institut des Nanotechnologies de Lyon - INL Bât Blaise Pascal</p>	<p>M. Jean-François GERARD Jean-Francois.Gerard@insa-lyon.fr</p> <p>M. Joël COURBON Dir. Adj. : M. Jean-Yves CAVAILLE Jean-Yves.Cavaille@insa-lyon.fr</p> <p>M. Guy HOLLINGER Dir. Adj. : M. Gérard GUILLOT gérard.guillot@insa-lyon.fr</p>
<p>INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES DE LYON</p> <p>http://Infomaths.univ-lyon1.fr</p> <p>(InfoMath) EDA 512</p>	<p>M. Alain MILLE UCBL 1 04.72.44.58.24 alain.mille@liris.cnrs.fr</p>		<p>Institut Camille Jordan - ICJ Bât Léonard de Vinci Centre d'Innovation en Télécommunications et Intégration de services - CITI Bât Léonard de Vinci Laboratoire d'Informatique pour l'Entreprise et les Systèmes de Production LIESP Bât Léonard de Vinci InfoRmatique en Images et Systèmes d'information - LIRIS Bât Blaise Pascal Méthodologie de Traitement de l'Information en Cardiologie - MTIC Bât Louis Pasteur</p>	<p>M. Franck WAGNER INSA : M. Jérôme POUSIN jerome.pousin@insa-lyon.fr</p> <p>M. Stéphane UBEDA stephane.ubeda@insa-lyon.fr</p> <p>M. Jean-Pierre CAMPAGNE Jean-Pierre.Campagne@insa-lyon.fr</p> <p>M. Attila BASKURT Attila.baskurt@insa-lyon.fr</p> <p>M. Paul RUBEL paul.rubel@insa-lyon.fr</p>
<p>MEGA DE LYON (MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE)</p> <p>http://www.lmfa.ec-lyon.fr/autres/MEGA/index.html</p> <p>(MEGA) EDA162</p>	<p>M. Jean-louis GUYADER 80.80 jean-louis.guyader@insa-lyon.fr</p>		<p>Centre de Thermique de Lyon - CETHIL Bât Sadi Carnot</p> <p>Centre de Recherche et d'Application en Traitement de l'Image et du Signal - CREATIS Bât Blaise Pascal</p> <p>Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures - LaMCoS Bât Jean d'Alembert</p> <p>Laboratoire Génie Electrique et Ferroélectricité - LGEF Bât Gustave Ferrié</p> <p>Mécanique des Fluides et d'Acoustique - LMFA Bât Joseph Jacquard</p> <p>Vibrations et Acoustique - LVA</p> <hr/> <p>Bât Antoine de Saint Exupéry Laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnemental - LGCIE Bât J. C.A. Coulomb Matériaux : Ingénierie et Sciences - MATEIS Bât Blaise Pascal</p>	<p>Mme Dany ESCUDIE Dany.Escudie@insa-lyon.fr</p> <p>Mme Isabelle MAGNIN isabelle.magnin@insa-lyon.fr</p> <p>M. Alain COMBESURE Alain.Combesure@insa-lyon.fr</p> <p>M. Daniel GUYOMAR Daniel.Guyomar@insa-lyon.fr</p> <p>M. Michel LANCE INSA : M. Jean Yves CHAMPAGNE Jean-Yves.Champagne@insa-lyon.fr</p> <p>M. Jean-Louis GUYADER jean-louis.guyader@insa-lyon.fr</p> <p>M. Bernard CHOCAT bernard.chocat@insa-lyon.fr</p> <p>M. Joël COURBON Dir. Adj. : M. Jean-Yves CAVAILLE Jean-Yves.Cavaille@insa-lyon.fr</p>

Avant propos

Je tiens à remercier vivement Gérard GUARRACINO, mon premier directeur de thèse et ancien directeur du Département Génie Civil et Bâtiment, et qui m'a accueilli au sein du Laboratoire des Sciences de l'Habitat qu'il dirigeait quand j'ai commencé mes travaux de recherche. Je le remercie pour avoir suivi et dirigé ce travail. Son regard critique et son soutien ont été particulièrement appréciés pour le contenu de cette thèse, et son appui sur le côté administratif m'a facilité les formalités à faire durant mon séjour en France.

Je remercie particulièrement Richard CANTIN, enseignant chercheur à l'ENTPE, qui a également dirigé ces travaux de recherche. Il m'a apporté une grande aide par son savoir et son esprit rigoureux en m'orientant vers les bonnes pistes quand il le fallait pour me faire avancer. Il a toujours trouvé les moyens de me remotiver dans mes périodes critiques.

Je leur suis éternellement reconnaissante aussi pour leur grande compréhension.

Je remercie M. FRAISSE et M. DEPECKER d'avoir accepté d'être rapporteurs de ces travaux et pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant au jury. Leurs appréciations ont contribué à l'amélioration du mémoire et la compréhension du sujet.

Je remercie Monsieur J.J. ROUX, qui est le président du jury de ma soutenance. Je suis honorée de sa présence pour valoriser mon travail et l'améliorer.

Mes remerciements s'adressent également à Bassam MOUJALLED qui m'a initié au domaine de la thermique, et qui a accepté d'être examinateur de ma soutenance.

J'exprime toute ma gratitude à Olivier JUNG, pour les moments passés ensemble dans le bureau du laboratoire B031, il a été d'une écoute inconditionnelle, et un véritable ami. Puis, Damien COURBE, qui a effectué un travail de fin d'études dans le cadre de ma thèse et Baptiste FASSOLETTE qui a effectué un stage de Licence professionnel au laboratoire. Leur collaboration m'a été d'une aide précieuse sur le travail surtout dans la définition des objectifs de chaque étape de travail.

Je ne pourrais oublier toute l'équipe du LASH, représenté par le Directeur M. FONTOYNONT, avec lesquels j'ai eu la chance de travailler dans une ambiance sympathique. Je cite en particulier Pascale, Sophie, Valérie, Joachim, Lazaros, Andrea, Ricardo et Marie-Claude qui ont partagé des discussions toujours amusantes pendant le déjeuner et pendant les pauses mais qui ont contribué aussi dans le travail en me donnant leurs opinions.

Et pour finir, je remercie tous les membres de ma famille présents en France et à Madagascar qui ont toujours trouvé les conseils dont j'avais besoin pendant ma thèse. Leur prière et leurs soutiens moraux m'ont été inestimables.

Impact thermique des revêtements en bois sur l'ambiance intérieure des bâtiments : Application dans l'habitat traditionnel en France et à Madagascar

Résumé

Les constructions traditionnelles en bois en France et à Madagascar témoignent de l'utilisation ancienne d'abondantes ressources forestières locales. Le bois peut être considéré comme un matériau naturel et renouvelable dans la mesure où les ressources forestières sont gérées durablement. L'utilisation du bois dans la construction contribue largement à la maîtrise du cycle du carbone atmosphérique et à la limitation des émissions de gaz à effet de serre.

Ce travail présente les principales caractéristiques physiques du matériau bois et des systèmes constructifs associés, montrant l'importance et l'influence du revêtement en bois sur l'environnement intérieur des habitations. La caractérisation des phénomènes hygrothermiques à l'échelle de la pièce d'habitation a été détaillée : présence d'eau dans le bois, comportement de l'équilibre hygroscopique, transfert thermique et transfert de masse, les paramètres physiques du bois et d'une ambiance intérieure.

Enfin, ce travail apporte des connaissances sur l'évaluation des interactions entre le confort thermique, l'ambiance intérieure et le revêtement en bois, grâce à des campagnes de mesure in situ, à des mesures en laboratoire et à des modélisations de scénarios numériques.

Mots-Clés: bois – revêtement – ambiance - confort - habitation – naturel – écologie

Thermal effect of the wood coating on building indoor environment: Application in traditional housing in France and Madagascar

Abstract

Traditional wood buildings in France and in Madagascar use abundant local forest resources in architecture. Wood can be considered as renewable and natural material when coming from sustainably managed forest. Using wood in construction contributes significantly in controlling the atmospheric carbon cycle and the emission of greenhouse gas.

This study presents the main physical characteristics of wood materials and building systems showing the influence of wood coating on indoor environment. Hygrothermal phenomena across the living space are characterized and presented in this work : the presence of water in the wood, the behavior of equilibrium moisture, heat transfer and mass transfer, the physical parameters of wood material and physical parameters of indoor environment. Thermal comfort is similarly characterised.

This work contributes knowledge on the evaluation of interactions between thermal comfort, indoor air and wood coating by means of in situ and laboratory measurements and numerical model simulations.

Tags: Wood - coatings - atmosphere - comfortable – residential building environment - natural - Ecology

Sommaire

Sommaire-----	11
Nomenclature -----	14
Abréviations-----	17
Introduction générale -----	19
1 Chapitre 1 : Utilisation du bois dans la construction -----	23
1.1 <i>Un matériau naturel et renouvelable</i> -----	24
1.2 <i>Contexte et enjeux français</i> -----	30
1.3 <i>Contexte et enjeux malgaches</i> -----	32
1.4 <i>Construction traditionnelle en France</i> -----	34
1.4.1 Les structures en bois -----	34
1.4.2 Les finitions en bois-----	37
1.4.3 Les menuiseries en bois-----	38
1.5 <i>Construction traditionnelle à Madagascar</i> -----	39
1.5.1 Matériaux traditionnels locaux-----	39
1.5.2 Histoire de l'architecture Merina-----	41
1.6 <i>Problématique de la thèse</i> -----	43
2 Chapitre 2 : Caractérisation des échanges entre le bois et l'environnement intérieur -----	49
2.1 <i>Echanges hygrothermiques</i> -----	50
2.1.1 Structure chimique de la cellulose-----	50
2.1.2 Différentes phases de l'eau dans le bois -----	51
2.1.3 Mesure de l'état hydrique du bois -----	52
2.1.4 Phénomène d'hygroscopie dans le bois-----	55
2.1.5 Transferts de masse à l'échelle de l'habitat -----	60
2.2 <i>Caractérisation du confort thermique</i> -----	62

2.2.1	Le bois et le confort thermique -----	62
2.2.2	L'indicateur PMV – Predicted Mean Vote -----	64
2.2.3	L'indicateur PPD – percentage of people dissatisfied -----	66
2.3	<i>Caractérisation des échanges liés à l'humidité de l'air</i> -----	67
2.3.1	Relation entre la température et l'humidité de l'air intérieur -----	67
2.3.2	Influence de l'humidité sur le confort thermique-----	69
2.3.3	Influence de l'humidité sur les inconforts locaux -----	70
2.4	<i>Caractérisation des échanges liés à la température de surface</i> -----	72
2.4.1	Perception du bois par le toucher-----	72
2.4.2	Asymétrie de rayonnement-----	74
2.4.3	Indicateur d'uniformité thermique de surface-----	79
2.4.4	Outil de calcul des indicateurs de confort -----	79
2.5	<i>Conclusion</i> -----	84
3	Chapitre 3 : Mesures in situ en France et à Madagascar -----	87
3.1	<i>Principales caractéristiques climatiques et géographiques</i> -----	88
3.2	<i>Présentation du protocole expérimental</i> -----	93
3.3	<i>Etudes de cas en France</i> -----	96
3.3.1	Cas de la maison La Grave (G) -----	96
3.3.2	Cas de la maison La Vilette (V) -----	101
3.4	<i>Etudes de cas à Madagascar</i> -----	107
3.5	<i>Données recueillies lors des mesures in situ</i> -----	114
3.5.1	Données issues des mesures en continu -----	114
3.5.2	Données issues des mesures ponctuelles -----	120
3.6	<i>Analyse des données recueillies</i> -----	127
3.7	<i>Conclusion</i> -----	140
4	Chapitre 4 : Expérimentation en laboratoire et simulation-----	143

4.1	<i>Présentation des mesures en laboratoire</i>	144
4.1.1	Description de la cellule	144
4.1.2	Présentation de 6 configurations de revêtements en bois	147
4.1.3	Présentation du protocole de mesures	155
4.2	<i>Résultats et analyse des mesures</i>	157
4.2.1	Evaluation du confort thermique	157
4.2.2	Evaluation de l'inconfort dû à l'asymétrie de rayonnement	165
4.2.3	Analyse des 6 configurations avec le ratio de bois	170
4.3	<i>Modélisation et simulation de revêtements en bois</i>	172
4.3.1	Modélisation à l'aide de TRNSYS	172
4.3.2	Etude de 8 modèles de simulation de revêtements intérieurs	175
4.3.3	Etude de 4 variantes de revêtements intérieurs	186
4.4	<i>Conclusion</i>	190
	Conclusion générale	192
	Bibliographie	197
	Liste des illustrations	205
	ANNEXES	211
	Annexe A : Le Confort Thermique	212
	Annexe B : Choix De Revêtement En Bois	231
	Annexe C : Photo Infrarouge	237
	Annexe D : Outil De Calcul Matlab	243
	Annexe E : Interventions scientifiques durant la thèse	250
	Annexe F : Mesures sur des essences de bois malgaches	252
	Annexe G : Mesures physiques commentées en laboratoire	255
	Annexe H: Maisons traditionnelles en France et à Madagascar	258
	Annexe I : Les modèles d'équilibre hygroscopique du bois	267

Nomenclature

C	=	Flux de chaleur échangé par convection, W/m^2
		C = à la surface de peau
		C _{res} = par convection respiratoire
cp	=	Chaleur spécifique, $kJ/(kg.K)$
		cp,b = chaleur spécifique du corps [3.49 $kJ/(kg.K)$]
		cp,cr = chaleur spécifique du noyau corporel [3.49 $kJ/(kg.K)$]
		cp,sk = chaleur spécifique de la peau [3.49 $kJ/(kg.K)$]
		cp,bl = chaleur spécifique du sang [4.19 $kJ/(kg.K)$]
DISC	=	Indice d'inconfort thermique, []
DR	=	Gêne par courant d'air, %
E	=	Flux de chaleur latente échangé par évaporation, W/m^2
Edif	=	par diffusion à travers la peau
E _{max}	=	maximum possible
E _{res}	=	par évaporation respiratoire
E _{sw}	=	due à la sudation régulatrice
E _{res,req}	=	equis pour le confort
E _{sk}	=	totale à la surface de la peau
ET*	=	Température effective, °C
f _{cl}	=	Facteur d'habillement, []
f _{eff}	=	Facteur effectif de surface rayonnante
h	=	Coefficient d'échange de chaleur sensible, $W/(m^2.K)$
		h = totale à la surface
h _c	=	par convection à la surface
h _r	=	par rayonnement à la surface
h _e	=	Coefficient d'échange de chaleur par évaporation, $W/(m^2.kPa)$
HR	=	Humidité relative, %
i	=	Indice de perméabilité à la vapeur d'eau, []
		ia = couche d'air

icl	=	vêtement
im	=	total
I	=	Isolement thermique, clo1
la	=	de la couche d'air à la surface cutanée nue
la,cl	=	de la couche d'air à la surface des vêtements
Icl	=	des vêtements
Icls	=	des vêtements standard pour une activité donnée
It	=	total
iv	=	Indice de vitrage, []
K	=	Flux de chaleur échangé par conduction, W/m ²
k	=	Conductivité tissulaire, W/(m ² .K) [5.28 W/(m ² .K)]
M	=	Production de chaleur interne (taux de métabolisme), W/m ² ou Met2
MB	=	métabolisme basal
Mp	=	composante posturale
MW	=	composante d'activité
MM	=	composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse
Mshiv	=	production de chaleur interne par frisson
mbl	=	Débit sanguin périphérique, kg/(s.m ²)
msw	=	Débit de sudation régulatrice générée, kg/(s.m ²)
pa	=	Pression de vapeur d'eau, kPa
pa	=	dans l'air ambiant
pexp	=	dans l'air expiré
psk,s	=	saturée à tsk
PMV	=	Vote moyen prévisible, []
PMV*	=	Vote moyen prévisible calculé à partir de ET*, []
PPD	=	Pourcentage des personnes insatisfaites, %
Q	=	Flux de chaleur échangé par le corps humain, W/m ²

1 1clo = 0.155 W/(m².K). Si l'isolement vestimentaire est exprimé en W/(m².K), il sera noté par R au lieu de I.

2 1Met = 58 W/m²

Q_{res} = Flux de chaleur échangé par voie respiratoire

Q_{sk} = Flux de chaleur échangé à la surface cutanée

Q_{dry} = Flux de chaleur sensible échangé à la surface cutanée

Q_{evap} = Flux de chaleur latente échangé à la surface cutanée

R = Flux de chaleur échangé par rayonnement, W/m²

Re = Résistance à l'évaporation, (m².kPa)/W

Re,cl = vêtement

Re,t = total

S = Taux de chaleur stocké, W/m²

Scr = Taux de chaleur stocké à l'intérieur du corps

Ssk = Taux de chaleur dans la peau

SET = Température effective standard, °C

t = Température, °C

ta = air ambiant

tb = moyenne du corps

tcl = à la surface externe du vêtement

tconf = de confort

tcr = interne (corps)

texp = air expiré

text = air ambiant extérieur

text,j = moyenne journalière

tg = globe

tmrt = moyenne de rayonnement

tneut = de neutralité thermique

trm = moyenne mobile exponentielle

to = opérative

tsk = cutanée

tsk,req = requise pour le confort

T	=	Température absolue, K
TSENS	=	Indice de sensation thermique, []
Tu	=	Intensité locale de turbulence, %
Va	=	Vitesse de l'air, m/s
W	=	Energie utilisée par le travail externe, W/m ²
Wcr	=	Masse du noyau corporel, kg
Wsk	=	Masse de la peau, kg
α	=	Fraction de la masse corporelle concentrée dans la peau, []
σ	=	Constante de Stefan-Boltzmann, W/(m ² .K ⁴)
ε	=	Emissivité, []
ρ	=	Densité, kg/m ³
θ	=	Temps, s
ω	=	Mouillure cutanée

Abréviations

PPTTE :	Pays Pauvre Très Endetté
AUF :	Agence Universitaire de la Francophonie
CICID :	Comité de Coopération Internationale et du développement CICID
MAE	Madagascar : Ministère des Affaires Etrangères
IUT :	Indice d'uniformité thermique
M :	Maison d'étude située à Antananarivo (Madagascar)
V :	Maison d'étude située à Villette d'Anthon (Rhône France)
G :	Maison d'étude située à la Grave La Meije (Alpes France)

Introduction générale

Depuis la prise de conscience du réchauffement climatique, de la réduction des ressources en énergies fossiles et des dangers que court la planète, les conférences, sommets et débats sur le développement durable se sont multipliés [Changement-Climatique, 2010]. Le développement durable constitue un principe ordonnateur d'actions tournées vers l'avenir dans les dimensions économique, sociétale et environnementale. Il conduit les pays à prendre des engagements pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergies fossiles, et pour préserver la biodiversité dans les pays développés et en développement.

Madagascar, par sa « méga biodiversité », est considéré par la communauté internationale comme l'un des pays les plus riches de la planète mais aussi le pays où le patrimoine biologique est le plus en danger. C'est aussi, sur le plan économique, l'un des plus pauvres, classé dans le groupe des PPTTE (Pays Pauvre Très Endetté), donc vulnérable [Lesourd, 2003]. Pourtant, en 1990, Madagascar est le premier pays du continent africain à adopter une Charte sur l'Environnement. Le gouvernement malgache a défini avec la communauté internationale des cibles prioritaires notamment dans le cadre de coopération et partenariat. Pour le partenariat avec la France, les secteurs de concentration au titre des objectifs du millénaire pour le développement sont l'éducation, le développement rural, les infrastructures et la santé. Et en ce qui concerne les domaines transversaux de partenariat : la gouvernance et l'Etat de droit, l'enseignement supérieur et la recherche et la diversité culturelle.

Les partenariats universitaires et scientifiques internationaux viennent en appui de cette démarche. J'ai moi-même bénéficié d'une mobilité de l'agence universitaire de la francophonie (AUF) pour pouvoir étudier en France en 2004, dans un domaine qui est dans la suite de ma formation d'Ingénieur en Bâtiment et Travaux publics à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo Madagascar. Puis par la suite, grâce à une bourse des Ingénieurs pour les pays en développement, j'ai pu continuer par cette thèse dont le sujet a été sélectionné par le CNRS Rhône-Auvergne en 2005.

Madagascar fait parti des 14 pays à coopérations prioritaires défini par le Comité de Coopération Internationale et du développement CICID. Et dans son action internationale au service de l'enseignement supérieur, le ministère français des affaires étrangères et européennes s'appuie plus particulièrement sur le réseau des conseillers et attachés pour la science et la technologie et la coopération universitaire dont le périmètre autrefois limité aux grands pays industrialisés s'étend progressivement aux pays émergents. Cette action s'organise autour de la formation des jeunes élites en France comme à l'étranger, la construction de réseaux et partenariats scientifiques, et l'attention portée aux problèmes spécifiques du Sud, dans le cadre des enjeux du développement durable.

En France, la réduction de la consommation d'énergie est un objectif en particulier pour le secteur du bâtiment. C'est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques, utilisation et construction comprises, avec 70 millions de tonnes d'équivalent pétrole, soit 43 % de l'énergie finale totale. Cette énergie consommée entraîne l'émission de 120 millions de tonnes de CO₂ représentant 25 % des émissions nationales [Grenelle, 2010]. Le bâtiment a donc un rôle important à jouer dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre ainsi que dans le projet défini par le Grenelle de l'environnement. La France s'engage à réduire jusqu'à -38% la consommation d'énergie finale et -50% d'émission de gaz à effet de serre en 2020. La rupture technologique recommandée par le Grenelle de l'environnement 2008 et 2010 va commencer par un choix de matériaux renouvelables, et des nouvelles réglementations thermiques sont programmées. Pour la construction neuve, l'objectif est d'arriver à des bâtiments à énergie positive en 2020 et réduire de 38% la consommation énergétique des bâtiments existants par leur réhabilitation. Il faudra alors peser entre les points faibles et points forts de chacun des matériaux utilisés, dont le bois, et les techniques de rénovation [Borloo, 2010, Grenelle, 2010].

La hausse régulière de la couverture forestière en France constitue aujourd'hui une réserve importante de ressource en bois. La forêt occupe 29% du territoire de la France métropolitaine. L'évolution constatée depuis 1930 à nos jours est une croissance de 20%. La couverture forestière française atteint alors 16,2 millions d'hectares d'après l'Inventaire Forestier National (IFN). Et pourtant, son utilisation pour la construction est trois fois moins importante qu'aux Etats-Unis et cinq fois moins importante qu'en Finlande et au Japon. La

France s'engage alors à la valorisation des ressources forestières et à multiplier par 10 le seuil minimal d'utilisation du bois dans les bâtiments à partir de 2010 [Grenelle, 2010].

Alors que la surface forestière en France augmente, elle diminue à Madagascar, pourtant, l'utilisation du bois dans la construction reste toujours d'actualité, le bois étant le matériau le plus disponible localement.

A Madagascar, la culture, l'héritage architectural, le voisinage, la proximité des matériaux, mais surtout le coût sont des critères de choix de matériaux qui permettent d'opter pour le bois. Cependant cette solution fait face à un dilemme difficile à résoudre. En effet, Madagascar hérite toute une histoire qui se traduit dans l'architecture et la construction sous influence ethnique, étrangère et européenne. L'utilisation du bois dans la construction est confrontée au problème de la déforestation. Ces cinq dernières années, l'exploitation abusive de la forêt, associée à l'exportation illicite de bois précieux, a alerté les autorités du pays ainsi que les bailleurs de fond et les organismes internationaux de protection de l'environnement. En conséquence, des mesures ont été prises : restriction dans la délivrance de permis, enquêtes et recherche des moyens pour une exploitation durable de la forêt [Global-Witness, et al., 2009, MAE-Madagascar, 2010]. Pourtant, le matériau bois reste présent dans les structures et dans la finition intérieure des maisons traditionnelles. Dans l'ensemble du pays, la grande majorité des bâtiments sont à usage d'habitation (plus de 95%) et ce, quel que soit la situation géographique (dans les régions ou dans les grands centres urbains [Rabeza, 1993]. Parmi les matériaux d'origine végétale, le bois est abondant et à un coût abordable sur le marché local par rapport aux autres matériaux (béton, acier, brique, carrelage) qui sont onéreux, surtout quand ils sont importés de l'étranger. A Madagascar, le bois reste le matériau le plus disponible et le moins cher sur le marché de la construction.

D'une manière générale, le bois est un matériau apprécié pour de ses qualités esthétiques, mécaniques, physiques et environnementales. Il faut cependant distinguer le bois massif naturel et les produits dérivés du bois qui sont mélangés ou enduits d'autres produits chimiques (panneaux de particules, lamellé collé, contrecollé, à fibres de bois orientés, contreplaqué, bois peint, vernis ou lasure). Les qualités naturelles qui font la notoriété du bois résident dans sa faculté de stockage du carbone de l'air pendant sa constitution, et la continuité de ce stockage dans le bois travaillé. Ses propriétés physiques et mécaniques lui permettent d'assurer différentes fonctions, en particulier dans la construction. Il peut être

utilisé en structure, en revêtement extérieur et intérieur, en charpente, en menuiserie ou en mobiliers. Il est le matériau principal des ouvertures et des escaliers dans les constructions traditionnelles françaises et malgaches. Mais actuellement, le bois est mis en concurrence avec le plastique et le métal, pour des raisons d'entretien et esthétique et parce que le bois ne conserve pas parfaitement sa texture et sa couleur d'origine. La menuiserie en bois reste néanmoins la plus fréquente dans les maisons malgaches. Le bois assure l'aspect esthétique des finitions et de l'ameublement et, est toujours qualifié de matériau noble. En outre, le bois est un matériau « chaud » grâce à ses propriétés thermiques et visuelles. Les différentes architectures traditionnelles françaises et malgaches témoignent de toutes ses qualités : maisons en pans de bois, chalets en rondins de bois, structures et solivages en bois, etc. *« L'architecture et les acteurs de la construction retrouvent aujourd'hui avec le bois un matériau tout à la fois traditionnel, résolument contemporain et pleinement futuriste »* [Ministère de l'équipement, 1986, TROUY-TRIBOULOT, et al., 2006]

Depuis quelques années, les pouvoirs publics encouragent l'utilisation du bois dans la construction, mais l'impact du bois sur l'environnement intérieur des bâtiments est encore mal connu. Pourtant, l'homme passe 80% de son temps dans des bâtiments, et la création d'un environnement intérieur sain et confortable est une exigence fondamentale du développement durable. Les impacts du bois sur l'ambiance et le confort thermique ne peuvent donc pas être ignorés ou négligés. Le travail de thèse exposé ici vise à évaluer l'impact thermique des revêtements en bois sur l'environnement intérieur des habitations en France et à Madagascar. Nous présenterons les contextes et les principaux enjeux de l'utilisation du bois dans la construction dans ces deux pays. Nous verrons comment l'utilisation de ce matériau est une réponse aux exigences d'une construction durable. Les principales caractéristiques des constructions traditionnelles en bois seront présentées. Nous étudierons comment caractériser des échanges entre le bois et l'environnement intérieur, puis nous présenterons les campagnes de mesures in situ conduites en France et à Madagascar en rappelant les contraintes géographiques et climatiques des deux pays. Enfin une expérimentation en laboratoire, avec différentes configurations de revêtement en bois, sera présentée, permettant ainsi une évaluation plus complète de l'impact thermique du bois sur les ambiances et le confort intérieur.

Chapitre 1 : Utilisation du bois dans la construction

La réduction des ressources en énergies fossiles et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre nous confrontent à des défis sociaux, économiques, énergétiques et environnementaux. Pour rechercher des solutions aux problèmes complexes posés, de nombreuses actions à mener, qui s'inscrivent dans des politiques de développement durable, concernent le secteur de la construction.

Dans ce chapitre, nous décrivons les principales caractéristiques qui font du bois un matériau susceptible de répondre aux exigences d'une construction écologique et durable.

Nous analysons ensuite les contextes et enjeux liés à l'utilisation du bois en France et à Madagascar.

Les principales caractéristiques des constructions traditionnelles françaises et malgaches ayant recours au bois, notamment en revêtement intérieur, sont présentées.

Enfin, la problématique de la thèse est exposée avec ses objectifs et la démarche méthodologique choisie.

1.1 Un matériau naturel et renouvelable

Le cycle du carbone intègre toutes les réactions permettant aux êtres vivants d'utiliser le carbone pour fabriquer leurs tissus et libérer de l'énergie. Les végétaux représentent le point de départ du cycle du carbone. Grâce à la photosynthèse, les plantes absorbent le carbone de l'air (CO_2) et l'intègrent à leur propre biomasse (feuilles, bois, racines, fleurs et fruits). Cette matière organique sert de nourriture aux organismes hétérotrophes (consommateurs). En libérant de l'énergie, la respiration des hétérotrophes et des autotrophes renvoie du carbone dans l'atmosphère (CO_2). [GIEC, 2010]

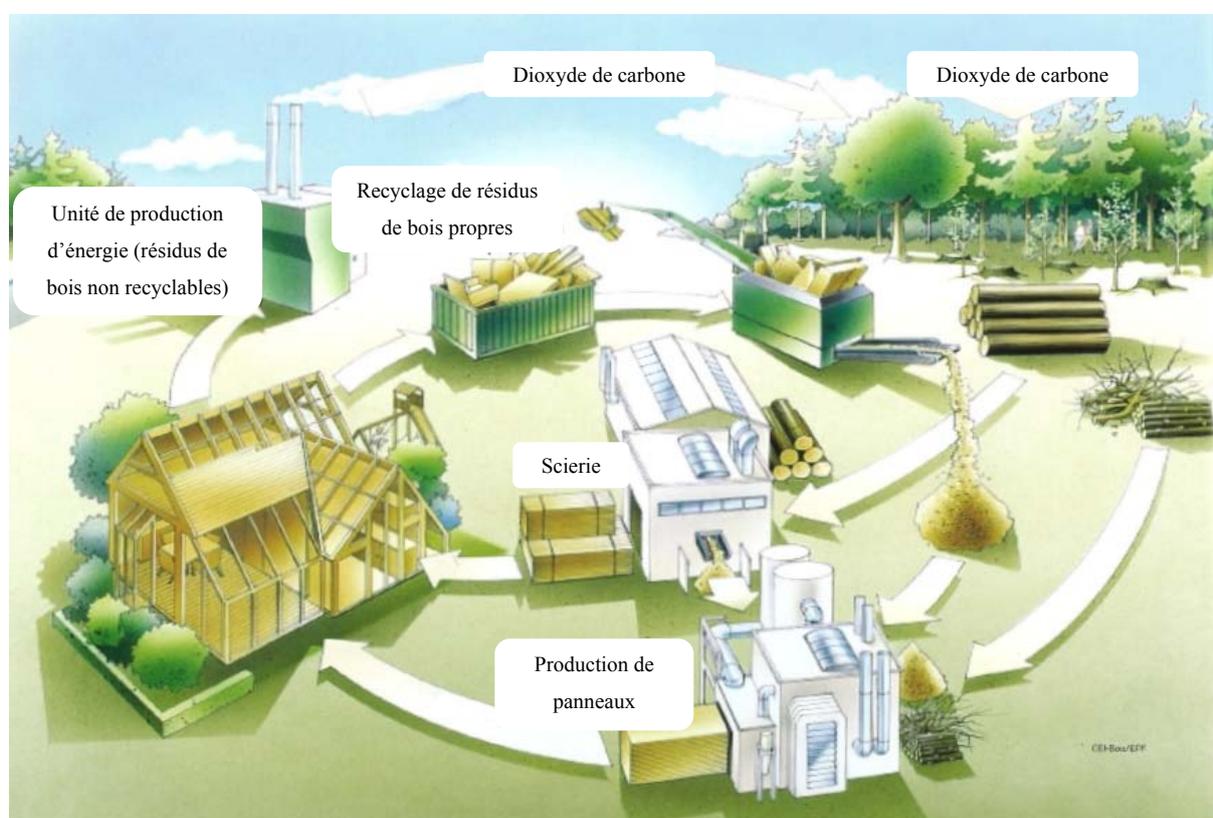


Figure 1 Le bois et le cycle du carbone [Cecobois, 2011]

Le bois est un composé chimique complexe dont environ la moitié de son poids sec (anhydre) est constituée d'atomes de carbone. Ce carbone reste dans le bois même après que l'arbre soit récolté ou qu'il soit transformé en produit.

Lors de sa croissance, par le processus de la photosynthèse, l'arbre absorbe le CO_2 de l'atmosphère. Une tonne de bois nécessite le prélèvement de 1,6 tonne de CO_2 atmosphérique, stocke 0,5 tonne de carbone et libère 1,1 tonne d'oxygène dans l'air [GIEC, 2010]. A l'état

naturel, l'arbre, une fois mort, se décompose et rejette le CO₂ stocké dans l'atmosphère, ayant ainsi un bilan carbone neutre.

La séquestration du carbone atmosphérique dans les produits du bois permet donc de compenser le déséquilibre actuel dans le cycle du carbone à l'échelle mondiale, lequel contribue aux changements climatiques. Ceci est reconnu par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), un corps scientifique créé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Un rapport de 2007 d'un groupe de travail du GIEC III indique que les forêts enlèvent le carbone de l'atmosphère et, en même temps, fournissent les produits dont la société a besoin pour le bois de construction, la fibre et l'énergie [Cecobois, 2011, CEI-bois, 2006, GIEC, 2010].

L'utilisation du bois comme matériau de construction permet de récolter et de conserver un volume conséquent de bois, optimisant ainsi sa fonction de puits de carbone. Il est admis que:

$$1\text{m}^3 \text{ de bois utilisé} = 1 \text{ tonne de CO}_2 \text{ absorbé [GIEC, 2010]}$$

Non seulement le bois fixe du CO₂ atmosphérique mais, il permet aussi d'éviter la production de CO₂ qu'aurait impliqué l'utilisation d'un autre matériau de construction plus énergivore ou polluant. En effet, le procédé de fabrication d'un kilogramme de bois consomme 4 fois moins d'énergie que celui d'un kilogramme de béton et 60 fois moins que celui d'un kilogramme d'acier [Cecobois, 2011]. Les analyses de cycle de vie indiquent que les produits de bois pour la construction de bâtiment ont une empreinte environnementale nettement moindre comparativement aux autres matériaux. Une comparaison des émissions nettes de CO₂ au cours du cycle de vie de différents éléments de construction est présentée avec la figure 1-2.

Enfin, lorsque la biomasse (résidus de bois) est employée au lieu des combustibles fossiles, cela contribue à diminuer l'apport en dioxyde de carbone dans l'atmosphère étant donné qu'il s'agit d'une source d'énergie plus propre et renouvelable. Au cours de la combustion du bois, le carbone atmosphérique séquestré dans le bois est remis en circulation dans l'air et ce cycle du carbone est considéré comme étant neutre. En revanche, la combustion de combustible fossile comme le mazout lourd et le charbon qui sont extraits du sous-sol terrestre constitue un apport net (supplémentaire) de CO₂ dans l'atmosphère. La bioénergie peut provenir par

exemple des résidus de la récolte de bois, des résidus urbains, des résidus de démolition ou de résidus industriels [CEI-bois, 2006].

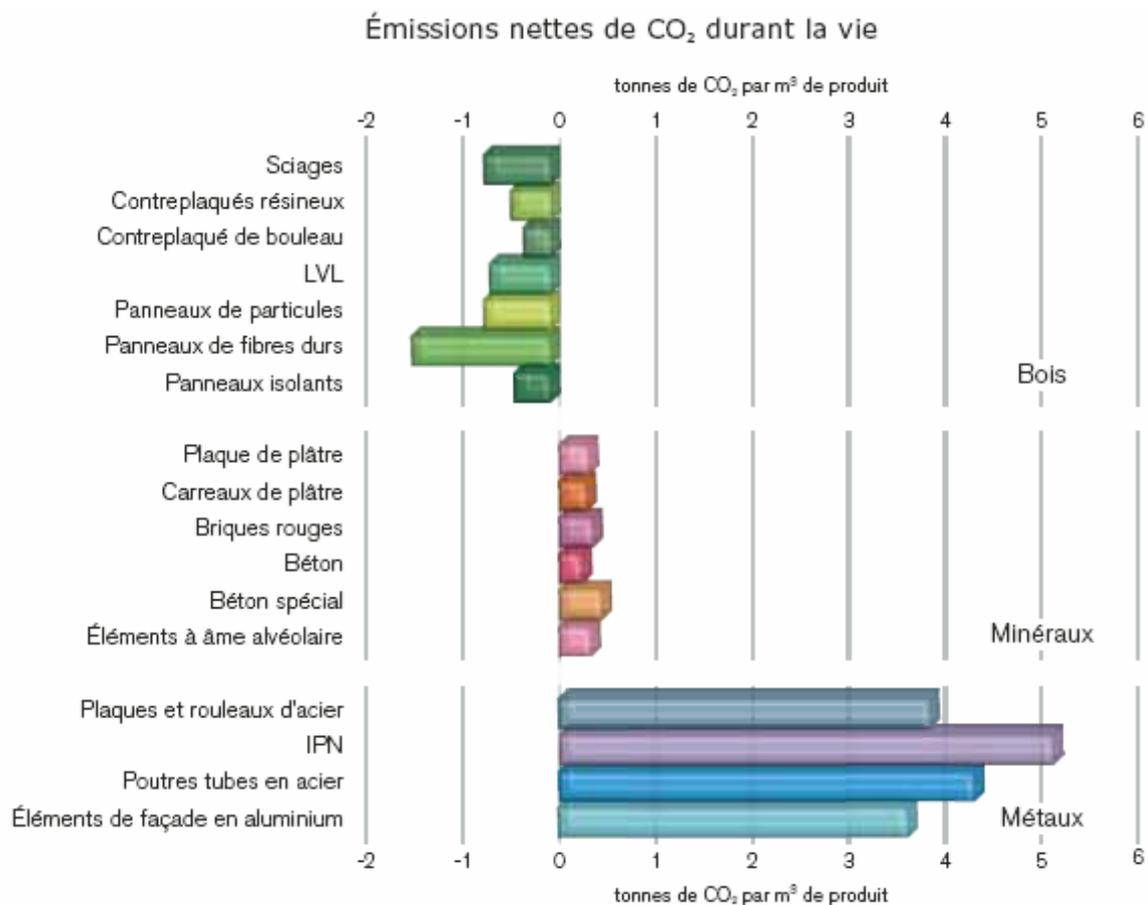


Figure 1-1 : Emissions nettes de CO₂ au cours du cycle de vie des éléments de construction [Beyer, et al., 2006]

La légèreté des structures en bois ainsi que la capacité des assemblages à reprendre les efforts, ont fait du bois un matériau de conception parasismique efficace. On peut ainsi remarquer que dans de nombreuses zones sismiques dans le monde (Japon, Californie...) de grandes structures traditionnelles en bois ont été construites et ont traversé les âges.

Le bois se consume de façon régulière (0,7 mm par minute) et ses performances intrinsèques ne sont pas diminuées au-delà du front de combustion. Enfin, il est classé comme matériau moyennement combustible à faible dégagement de fumée. En effet, contrairement à de nombreux produits de construction, le bois ne dégage, lors de sa combustion, que de l'eau et du CO₂, gaz non toxique.

Le bois ne s'oxyde pas et supporte très bien le contact avec des atmosphères corrosives, il est donc très largement utilisé dans les stations d'épurations, les hangars à sel, etc.

Le bois apparaît comme un matériau de construction intéressant du point de vue thermique. Sa faible conductivité thermique, due à sa structure cellulaire composite enfermant de l'air après son séchage, limite les transferts thermiques et l'apparition de condensation. Le tableau 1-1 fournit une comparaison des conductivités thermiques entre différents matériaux de construction.

Matériau	λ (W/m.°C)
Aluminium	230
Acier	52
Granit	3.50
Béton	1.75
Plâtre	0.50
Chêne	0.23
Sapin, épicéa	0.12
Liège	0.10
Blasa	0.054
Laine minérale	0.04

Tableau 1-1 : Conductivités thermiques de différents matériaux de construction

L'effusivité thermique du bois est en moyenne de $400 \text{ J.K}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. Cette valeur est trente fois plus faible que pour l'acier. Du point de vue du rayonnement, le bois possède une émissivité élevée voisine de 0,95 pour les grandes longueurs d'onde.

Parmi les utilisations du bois, nous pouvons prendre l'exemple de comparaisons de matériaux d'enveloppe de bâtiment. Nous pouvons nous référer à un coefficient de transfert thermique de mur U [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$] calculé par l'expression :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{int}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{ext}}$$

Équation 1-1

Dans cette expression, h_{int} et h_{ext} sont respectivement les coefficients de transmission intérieur et extérieur, e est l'épaisseur du matériau et λ la conductivité thermique du matériau.

Pour garantir un coefficient de transfert thermique de 1,9 à 2.1 W/m².K, nous avons les différentes épaisseurs nécessaires pour différents matériaux de construction utilisé en une seule couche (tableau 1-2).

Matériaux	λ [W/m.K]	Epaisseur [cm]
Granit	3,5	170
Calcaire	1,5	70
Maçonnerie tout venant	0,9	40 à 50
Béton banché	0,6	30
Béton en bloc creux	0,45	22
Béton en bloc alvéolaire	0,38	20
Brique pleine	0,5	25
Brique creuse	0,42	20
Bois massif	0,15	7 à 8

Tableau 1-2 : Comparaison de murs homogènes en différents matériaux

Ce type de mur (homogène) n'est plus employé de nos jours sauf pour une conductivité thermique inférieure à 0,45W/m.K. Comme nous observons dans le tableau 1-2, le bois présente l'avantage de nécessiter une épaisseur faible pour garantir une même performance de l'enveloppe.

En général, un mur est constitué de plusieurs couches de matériaux différents pour donner la performance de l'enveloppe. Le calcul du coefficient de transfert thermique de l'équation 1-1 se fera alors avec la somme des résistances de chaque couche $\Sigma (e/\lambda)$ au lieu de (e/λ) .

Cette performance thermique de l'enveloppe dépend des différents matériaux constituant chaque couche. Dans notre travail, nous travaillons sur l'impact d'une couche de revêtement intérieur en bois de faible épaisseur. L'impact du bois sur l'enveloppe ne peut être significatif que si l'on compare les mêmes murs avec ou sans le revêtement intérieur en bois. Nous travaillerons sur ce sujet plus loin dans l'étude des paramètres physiques du bois.

L'utilisation du bois en construction contribue largement à la lutte contre les changements climatiques par la séquestration du carbone atmosphérique dans le bois et par la substitution de produits plus énergivores et polluants à fabriquer tels que l'acier ou le béton.

Cependant, l'inquiétude que suscite l'exploitation des forêts dans le monde entier, et notamment à Madagascar, incite parfois les consommateurs à opter pour des matériaux non renouvelables, dont la fabrication est beaucoup plus polluante et dommageable pour l'environnement que le bois. A Madagascar, la conservation et la limitation des exploitations abusives du bois massif, spécialement des bois de luxe (Ebène, bois de rose) qui sont maintenant protégés. Malgré ces interdictions, nous avons rencontré deux des plus grandes sociétés du bois à Madagascar, qui ne s'inquiètent pas de la réduction de leur production. En effet, quelques entreprises malgaches possèdent leur propre exploitation forestière, mais il s'agit de bois rapidement renouvelable (sapin, pin).

Lorsque les forêts sont gérées de façon durable, le bois constitue un matériau ayant l'une des plus faibles empreintes sur l'environnement. Le bois permet alors de répondre aux contraintes de la construction écologique :

- réduire la consommation d'énergie pendant toute la durée de vie du bâtiment ;
- réduire au minimum la pollution externe et l'impact environnemental ;
- réduire l'énergie intrinsèque et l'épuisement des ressources ;
- réduire au minimum la pollution et les effets nuisibles sur la santé.

Ainsi, le bois, recherché pour ses multiples qualités, peu cher à mettre en œuvre et écologique, peut être considéré comme une ressource naturelle et renouvelable s'il provient

d'une forêt gérée avec une logique de développement durable, que ce soit en France ou à Madagascar.

1.2 Contexte et enjeux français

La conférence de Rio en 1992 met en avant la nécessité d'intégrer aux politiques économiques et commerciales des politiques de conservation et d'exploitation écologiquement viable des ressources de la planète et notamment des forêts.

En France, en 1996, le vote de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie a impliqué de façon directe le bois de construction dans le processus de diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'article 21-V stipule : « pour répondre aux objectifs de la présente loi, un décret en Conseil d'Etat fixe les conditions dans lesquelles certaines constructions nouvelles devront comporter une quantité minimale de matériau en bois ». L'État français a établi un plan de développement associant les différents ministères concernés et les organisations professionnelles du bâtiment et du bois.

En 1997, le sommet de Kyoto a abouti à un protocole visant à ramener le niveau des émissions de CO₂ de 2010 à celui de 1990. La France étant signataire de ce protocole, il lui a fallu se donner les moyens de respecter ses engagements. Le Plan Bois Construction Environnement [Borloo, 2010, Grenelle, 2010] devrait permettre d'économiser 7 millions de tonnes de CO₂, soit 14% des engagements de la France à Kyoto en 2012. Ce calcul prend en compte à la fois le CO₂ stocké dans les matériaux de constructions et le CO₂ évité, dû à la préférence du bois sur un autre matériau plus énergivore ou ayant une plus importante émission de CO₂.

Avec l'ambition de lutter contre le changement climatique et l'épuisement des ressources naturelles, le Grenelle de l'environnement (2008 et 2010) doivent favoriser le choix des matériaux renouvelables pour les constructions neuves ainsi que pour la rénovation des bâtiments existants. La loi du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle Environnement fixe les objectifs à atteindre dans le domaine de la gestion forestière, de la production de bois et de son utilisation, en particulier en ses articles 34 et 48 : l'Etat a notamment pour ambition de développer significativement l'usage du bois dans la

construction en valorisant ses atouts environnementaux. Les usages du bois dans la construction sont variés : structure porteuse (dont charpente), façade (panneaux, bardage), menuiseries extérieures, menuiseries et aménagements intérieurs, revêtements de sol et mur (parquet, lambris), etc. En France, la part de marché du bois dans la construction est aujourd'hui évaluée à 10 %.[Grenelle, 2010]

Il est aussi prévu la valorisation des ressources forestières en France, notamment en multipliant par 10 le seuil minimum de bois dans les nouvelles constructions à partir de 2010.

La France possède une ressource forestière de 16 millions d'hectares. Elle se classe 3^{ème} au niveau européen, mais l'utilisation du bois dans les bâtiments est cinq fois moins importante qu'aux Etats-Unis et trois fois moins importante qu'en Finlande ou au Japon. Cette situation devrait être débloquée en incitant les propriétaires privés qui détiennent les 11 millions d'hectares (70% de la ressource forestière) à développer l'exploitation (allègement fiscal et investissement) [Développement-Durable, 2010].

Le chiffre d'affaires de la filière forêt-bois en France est de 32 845 millions d'€ en 2006 [Sessi, et al., 2006]. La filière bois tient une place importante dans l'économie. Elle regroupe de nombreuses activités (figure 1-2).

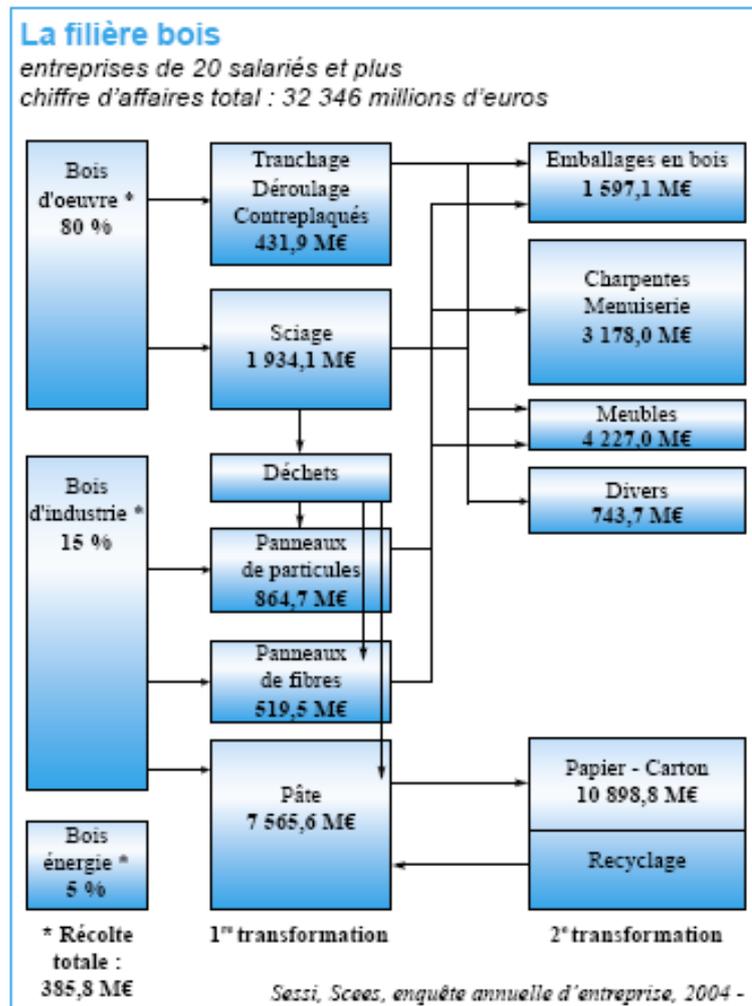


Figure 1-2 Nomenclature de la filière bois en France, [Sessi, et al., 2006]

Cette filière bois rencontre différents problèmes, notamment des problèmes liés à une sous-exploitation des forêts françaises, une industrie du bois non adaptée aux grands marchés comme la construction, et une demande soutenue de la consommation mondiale qui favorise la concurrence et l'exportation avec de nouveaux marchés (Chine, Inde).

1.3 Contexte et enjeux malgaches

Madagascar par sa biodiversité est considéré par la communauté internationale comme l'un des pays les plus riches de la planète où le patrimoine biologique est le plus en danger. C'est aussi, sur le plan économique, l'un des plus pauvres, classé dans le groupe des PPTE (Pays Pauvre Très Endetté), donc vulnérable [Lesourd, 2003]. Pourtant, en 1990, Madagascar est le premier pays du continent africain à avoir adopté une Charte sur l'Environnement. Le Plan d'Action Environnemental (PAE) vise à protéger et améliorer l'environnement tout en

œuvrant pour un développement durable. Ses quatre objectifs spécifiques sont : conserver et gérer le patrimoine de la diversité biologique; promouvoir le développement durable par une meilleure gestion des ressources naturelles; améliorer les conditions de vie dans les zones rurales et urbaines; développer les ressources humaines et la capacité institutionnelle. La décision s'inscrit dans le mouvement d'idées qui relie les questions d'environnement et de développement, et aboutissant aux résolutions du premier Sommet de la Terre tenu à Rio en 1992. Comme dans d'autres pays du Nord et du Sud, l'environnement est désormais un enjeu politique et social, traité dans le cadre du Développement Durable. Dans le cas malgache, les enjeux entre le global et le local sont particulièrement complexes. Imposée de l'extérieur, la question environnementale est récupérée et intégrée par les politiques publiques puis par la suite gérée par différents acteurs opérant sur le territoire national (ONG, services techniques déconcentrés de l'Etat, communes). Dans un tel enchevêtrement, gouverner l'environnement pour un développement durable est une forme de politique publique qu'il reste à mettre en pratique.

Depuis 2002, une forte volonté politique a engagé le pays dans un vaste programme de réformes, soutenu par la communauté internationale, qui ouvre la voie du développement et de l'intégration à l'économie mondiale. La « vision commune pour Madagascar et ses régions », rendue publique en décembre 2004 par l'ancien Président de la République sous la devise « Madagascar naturellement », propose une dynamique de croissance forte et durable, qui repose sur la nature et l'agriculture, et a pour objectif la réduction de la pauvreté en particulier dans le monde rural.[Diplomatie, 2010, MAE-Madagascar, 2010].

La communauté des bailleurs inscrit son action jusqu'à présent dans le cadre du Document Stratégique de Réduction de la Pauvreté (DSRP), document qui a permis de dégager des objectifs sectoriels susceptibles de faire reculer la pauvreté de moitié d'ici 2015. Des partenaires œuvrent au développement de Madagascar : multilatéraux (Union Européenne, Banque mondiale, FMI et organisations des Nations-Unies spécialisées), comme bilatéraux (États-Unis, Japon, Allemagne, Norvège et Suisse principalement), la France restant le premier bailleur bilatéral.

Le CIFOR à Madagascar (Center for International Forestry Research) annonce en 2004 que la reconnaissance des droits coutumiers et savoirs des populations locales a cessé d'être une spécialité des experts de la sécurisation foncière. Elle s'inscrit, désormais, dans la

construction d'un paradigme de « conservation intégrée ». A Madagascar, la déforestation tropicale est un problème de population avant d'être un problème environnemental de gouvernance. En raison du maintien en zone rurale d'une grande partie de la population, le pays se caractérise par une forte demande locale de biens et services forestiers, sous forme de bois mais aussi de produits forestiers non ligneux et surtout de réserves de terres cultivable. La récolte du bois est en soi peu dégradante de l'environnement, comme ailleurs sous les tropiques, mais elle fournit l'occasion d'une installation de migrants dans les peuplements dégagés.

Ainsi, le pays n'est pas à l'encontre des politiques environnementales mondiales. Toujours est-il que les Malgaches doivent mettre leurs efforts en parallèle à d'autres problèmes socio-économiques avant de pouvoir régler les problèmes planétaires.

En ce qui concerne le domaine de la construction, l'histoire de l'architecture locale explique comment Madagascar tient aux matériaux locaux pour construire et combien l'architecture du pays s'est inspirée des cultures successives, plus tard, sous l'influence européenne. Les règles de construction actuelles sont celles utilisées en France pour la structure (Eurocode). A Madagascar, la construction joue toujours en priorité le rôle d'abri. Les préoccupations sur le confort de l'occupant restent réservées à une minorité de construction (hôtels, nouveaux bâtiments destinés à recevoir du public et personnalités diplomatiques).

1.4 Construction traditionnelle en France

1.4.1 Les structures en bois

Depuis longtemps, le bois est utilisé dans les constructions traditionnelles dans toutes les régions françaises, des chalets en zone montagneuse aux plateaux et plaines, dans les campagnes et dans les villes. Actuellement, les préoccupations environnementales favorisent l'utilisation du bois en concurrence avec d'autres matériaux comme le béton, l'acier, la terre. Les principales règles de dimensionnement d'ouvrages en bois sont spécifiées dans l'Eurocode 5, qui donne les différentes propriétés du bois existant exigées pour la construction.

Il existe principalement 3 méthodes constructives utilisant le bois comme matériau de structure dans le bâtiment : ossature bois, bois massif empilé, panneaux de bois contrecollés.

- Le bâtiment à ossature de bois

Il s'agit d'une construction dont les murs sont réalisés sur la base d'un squelette constitué de membrures de bois entre lesquelles sont placés des matériaux isolants. C'est le principe de la maison à colombage dans de nombreuses régions françaises comme l'Alsace ou le Centre.



Figure 1-3 : Maison à colombage alsacienne (Strasbourg)

Il y a aussi les maisons à ossature en bois qui ont les structures et l'enveloppe du mur du bâtiment en bardage de bois. Ces murs sont composés de différentes couches de bois, de panneaux de bois et d'isolant selon les constructeurs. C'est le cas de la maison située à St Didier au mont d'or (figure 1-4, annexe B).



Figure 1-4 : Maison à ossature en bois (St Didier au mont D'or)

- Le bâtiment en bois massif empilé

Souvent appelée chalet, il est constitué de murs en bois massif montés par empilement de madriers (finition rectangulaire), de rondins (finition lisse) ou de fustes (finition rustique).



Figure 1-5 : Chalet en bois massif empilé

- Le bâtiment en panneaux de bois contrecollés

Il s'agit d'un mélange des deux techniques précédentes avec une ossature en bois sur lesquels sont fixé des panneaux de bois massifs contrecollés.



Figure 1-6 : Maison en panneaux de bois massifs contrecollés

1.4.2 Les finitions en bois

Les finitions extérieures peuvent être effectuées avec un bardage ou tavaillon (différents noms sont utilisés selon les régions). Les tavaillons sont faits en planchettes de bois refendu dans le fil mesurant 15 à 20 centimètres de large pour 30 à 40 cm de long fixées à l'aide de clous. Le bardage est un système d'éléments de parement qui se fixe sur une ossature secondaire en bois ou métallique solidarisée à la structure porteuse.



Figure 1-7 : Bardage tavaillon

Il existe une grande variété de finition intérieure en bois brut. Bien qu'historiquement le bois était utilisé dans les finitions intérieures telles que les planchers pour des raisons de légèreté de la structure et de simplicité de mise en œuvre, le bois est de nos jours choisi pour son aspect esthétique. Nous ne citerons pour exemple que quelques unes de ces finitions : les parquets, les plafonds en bois avec poutres apparentes et les lambris.



Figure 1-8 : Parquet en bois au grand temple Lyon 3ème



Figure 1-9 : Lambris bois à Vilette d'Anthon

1.4.3 Les menuiseries en bois

Pour les portes, fenêtres, hublots, ou cadres des ouvertures vitrées, le bois a été le matériau destiné à la menuiserie dans le bâtiment. Son utilisation est aujourd'hui concurrencée par de nouveaux matériaux comme le plastique, l'aluminium, etc.

En ce qui concerne la toiture, les charpentes traditionnelles en bois sont généralement composées de la couverture, des voliges, des chevrons, des pannes qui reposent sur les éléments constituant les fermes : arbalétrier, poinçon (élément de support vertical), entrails et faux entrails, aisselier et contrefiche (figure 1-10).

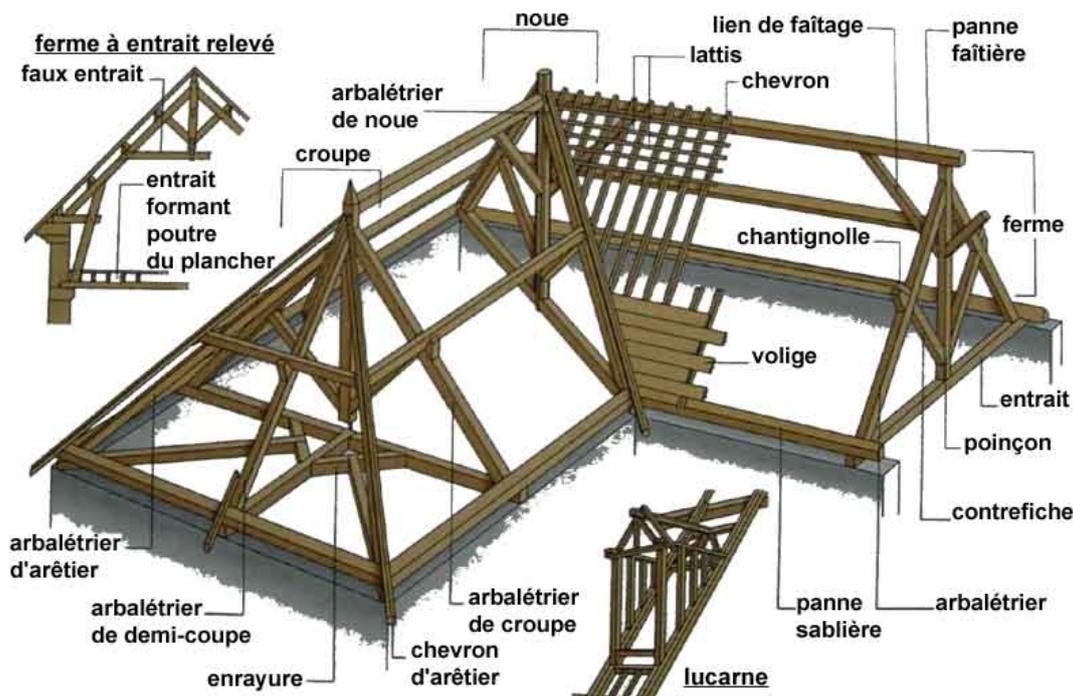


Figure 1-10 : Composition d'une structure traditionnelle en bois[Morbihan, 2010]

1.5 Construction traditionnelle à Madagascar

1.5.1 Matériaux traditionnels locaux

L'architecture malgache reflète, dans sa diversité, l'influence des conditions naturelles et les matériaux, partagés selon la richesse de chaque région géographique et climatique. On constate qu'en dehors des villes et chef lieu de province, les maisons sont faites artisanalement selon les matériaux (surtout d'origine végétale) existants. Les artisans ne construisent pas de maisons durables par crainte des violents cyclones fréquents et par manque de moyens.

En ce qui concerne les villes, malgré le transfert des nouvelles techniques venant de l'étranger (brique cuite, béton armé, menuiserie aluminium et autres), la conservation de la culture du bois se perpétue dans l'aménagement intérieur des maisons malgaches pour réaliser par exemple le plancher, le plafond, l'escalier, les poteaux, les poutres ou encore les menuiseries diverses. La richesse du pays en essence de bois tropicaux (palissandre, Ambora, Arofy, Eucalyptus, pin, ramy, varongy...) explique cette grande présence du bois, surtout dans les bâtiments d'habitation.

Aucun règlement n'est appliqué en matière de confort intérieur. Les acteurs dans la construction s'intéressent beaucoup plus à l'aspect architectural et structurel. Les ingénieurs et architectes sont focalisés sur la conception de bâtiments résistant aux intempéries et qui durent le plus longtemps possible en suivant des règlements français sur la structure comme les Eurocodes. L'utilisation des matériaux importés de l'étranger ne conduit pas encore aux respects des règlements étrangers.

L'habitation traditionnelle malgache correspond à une construction de plan rectangulaire avec un grand côté allongé nord-sud, une ouverture à l'ouest et un toit aigu à deux pans. Les matériaux utilisés, qui dépendent bien évidemment des ressources locales, sont essentiellement d'origine végétale. Ainsi, sur les côtes Est et Ouest, le ravinala (fontsy - arbre du voyageur) et le falafa (feuilles et tiges de ravinala) sont communément utilisés tandis que dans le Nord, on se servira plutôt des nervures de raphia. D'autres matériaux comme le bambou aplati et séché (en pays Tanala), l'aloès ou le sisal (dans le Sud Ouest), le bois des épineux (en pays Antandroy) voire les roseaux (pour les pêcheurs Vezo) sont également utilisés. Il est à noter que sur les hauteurs d'Antananarivo, l'architecture en bois était réservée à l'aristocratie pour des raisons liées entre autres à sa raréfaction et à la culture : le bois est destiné aux vivants tandis que la pierre l'est aux morts.



Figure 1-11 : Ravinala, construction traditionnelle à base de Ravinala, construction traditionnelle en bambou aplati (Source www.architecture-madagascar.com)

Ce fut une grande révolution culturelle dans les hauts plateaux, lorsqu'on a remplacé le bois par des maçonneries de pierres pour le palais de Manjakamiadana (palais de la Reine) et les temples de l'époque vers 1860, (granites et basaltes) malgré la culture expliquée ci-dessus. Dorénavant, la pierre sera considérée comme matériau de construction d'habitation des vivants.

Les demeures Betsileo et Merina des hautes terres, qui bénéficient d'un climat plus tempéré que sur le littoral, sont construites en briques de terre rouge qui a une grande inertie thermique favorable aux occupants surtout en période hivernale parce que la chaleur accumulée par l'enveloppe de la journée est restituée à l'air intérieur pendant la nuit. Si on retrouve l'ajout des balcons dans certaines constructions, les toitures en chaume sont toujours conservées en certains endroits.



Figure 1-12 : Demeure en brique rouge, et recouverte de chaume

Le pisé (argile latéritique) monté par lits successifs comme la brique crue est un matériau perméable qui nécessite un enduit protecteur. Les maisons prennent ainsi, selon les localités, des teintes allant de l'ocre jaune (terre naturelle) au rouge de la latérite ou au blanc du kaolin.

1.5.2 Histoire de l'architecture Merina

La case royale d'Andrianampoinimerina (1787-1810) ci-dessous est d'une architecture typique malgache avec son toit à 2 pans principaux et son ouverture à l'ouest. A noter qu'à l'origine, la toiture était en herana (roseaux triangulaires). Ce fut la première utilisation du bois comme matériau de construction. La toiture à deux pentes aiguës est conservée jusqu'à ce jour chez les Tananariviens.



Figure 1-13 : La case royale d'Andrianampoinimerina

Le charpentier Louis Gros construisit pour le roi successeur Radama I (1820–1840) un palais en bois situé sur la rive droite du fleuve Ikopa, faisant de cet édifice en bois (constitué d'un étage et d'une véranda ouverte) le plus important du pays. Premier édifice à varangue (véranda) il influencera largement les constructions futures dans les Hauts Plateaux.

Louis Gros créa également le prototype de la maison malgache répandue par la suite dans tout l'IMERINA avec ses éléments caractéristiques : colonnes de pierre ou de brique soutenant une loggia. L'architecte est également à l'origine du plus ancien plan de la ville, qui fut publié par ELLIS en 1838 dans l'ouvrage "History of Madagascar".

Les Hautes Terres, région la plus peuplée de Madagascar (1,8 millions d'habitant sur 60km² de superficie), sont aussi celles où le bois de construction s'est fait, de longue date, le plus rare. Dans leurs sites fortifiés à fossés concentriques, les villageois ont dû développer une architecture de pisé, tandis que souverains et aristocrates merina se réservaient le privilège de construction du bois et s'attachaient, dès l'arrivée des Européens, à améliorer la maison traditionnelle de planches.

Les palais et les premières maisons des souverains perpétuent le caractère noble de l'architecture en bois. A partir des années 1870, la haute société tananarivienne copie la maison en bois à étage et loggia, couverture de bardeaux, conçue par James Cameron pour loger la London Missionary Society et qui intègre si bien les proportions de l'architecture ancestrale des Hautes Terres. Les Malgaches ont su incorporer leurs coutumes à cette

architecture étrangère : respect des orientations, forme de la toiture et fonctions de chaque coin et pièces de l'habitation.

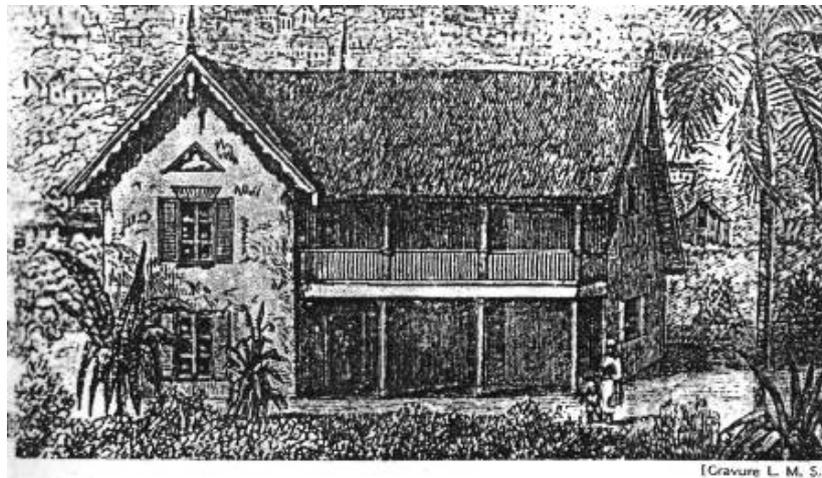


Figure 1-14 : Maison réalisée par Cameron au pied du Faravohitra

Cette maison a été réalisée pour le missionnaire Pearse fut copiée et reproduite à de multiples exemplaires à Tananarive et dans toute l'île de Madagascar.

Aujourd'hui, la présence de loggia sur l'architecture malgache s'explique par le climat chaud en période estivale. La loggia sert d'espace extérieur protégé du soleil où l'on bénéficie de la circulation d'air pour se rafraîchir. C'est aussi l'endroit pour sécher les semis, et est occupé par les femmes au foyer qui s'occupent du riz. De plus, l'ombrage apporté par les loggias permet de bénéficier d'un rafraîchissement de l'air en période de chauffe pour le rez-de-chaussée.

1.6 Problématique de la thèse

Le bois peut être considéré comme un matériau de construction naturel et renouvelable qui présente pour les acteurs de la construction de nombreuses qualités:

- Il répond à des programmes variés et peut être utilisé tant pour la conception d'ouvrages d'arts que pour de l'habitat collectif ou individuel.
- Il peut être utilisé pour de nombreuses fonctions : structure, charpente, enveloppe, revêtement, bardage, etc.
- La diversité de ses essences permet une grande variété de couleurs, de formes et de textures.

- Il oblige à une grande rigueur conceptuelle garante de la qualité finale d'un ouvrage.
- Il répond aux exigences d'une construction durable par une réduction d'impact sur l'environnement (haute qualité environnementale, construction écologique).

Son utilisation dans la construction est souvent associée à l'enveloppe du bâtiment. Or, la création d'un environnement intérieur sain et confortable est une exigence pour la qualité d'une construction durable. La promotion d'une architecture écologique utilisant le bois en finition intérieure exige donc de bien connaître l'impact du bois sur l'ambiance et l'occupant. En particulier, son utilisation fréquente comme revêtement intérieur doit s'appuyer sur une connaissance approfondie des influences complexes, notamment hygrothermiques, sur l'environnement intérieur.

Pour aborder cette question de l'évaluation de l'influence du revêtement en bois, nous considérons le revêtement intérieur comme un des éléments constitutifs du sous-système 'Bâtiment' dans une vision systémique du confort thermique qui le met en relation avec l'occupant (figure 1-15).

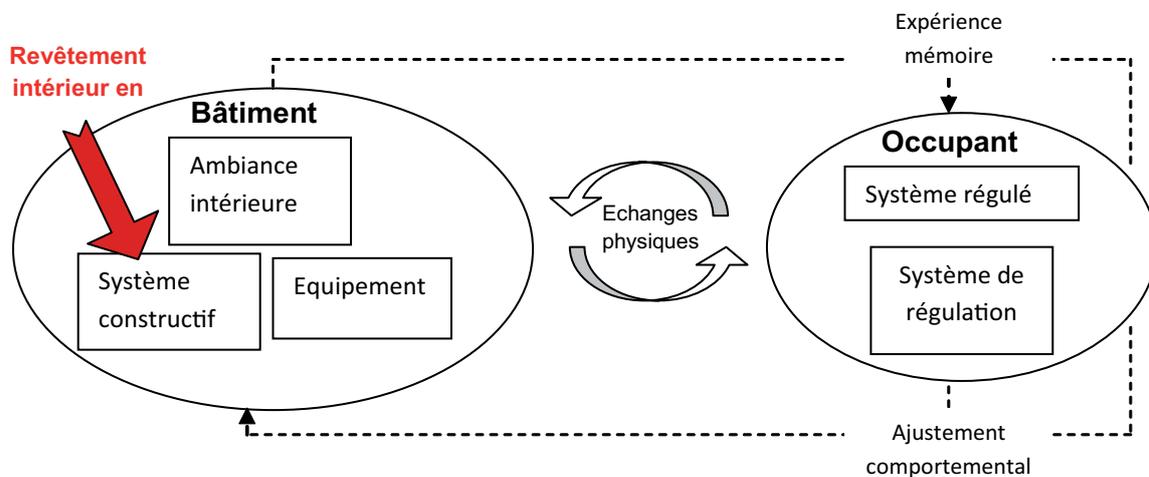


Figure 1-15 : Introduction du bois dans le système Bâtiment - Occupant

Cette vision s'appuie ainsi sur une approche globale de ce qu'est le bois dans l'habitat. Il ne s'agit pas uniquement de considérer le bois seulement à l'échelle microscopique du matériau, mais du bois utilisé comme un système constructif, le revêtement intérieur, en interaction avec l'environnement à l'échelle de la pièce d'habitation. Il s'agit alors de s'interroger sur l'influence par exemple d'une surface ou de la position du parement intérieur en relation

directe avec l'ambiance et l'occupant. Le positionnement de nos travaux de thèse est précisé sur la figure 1-16.

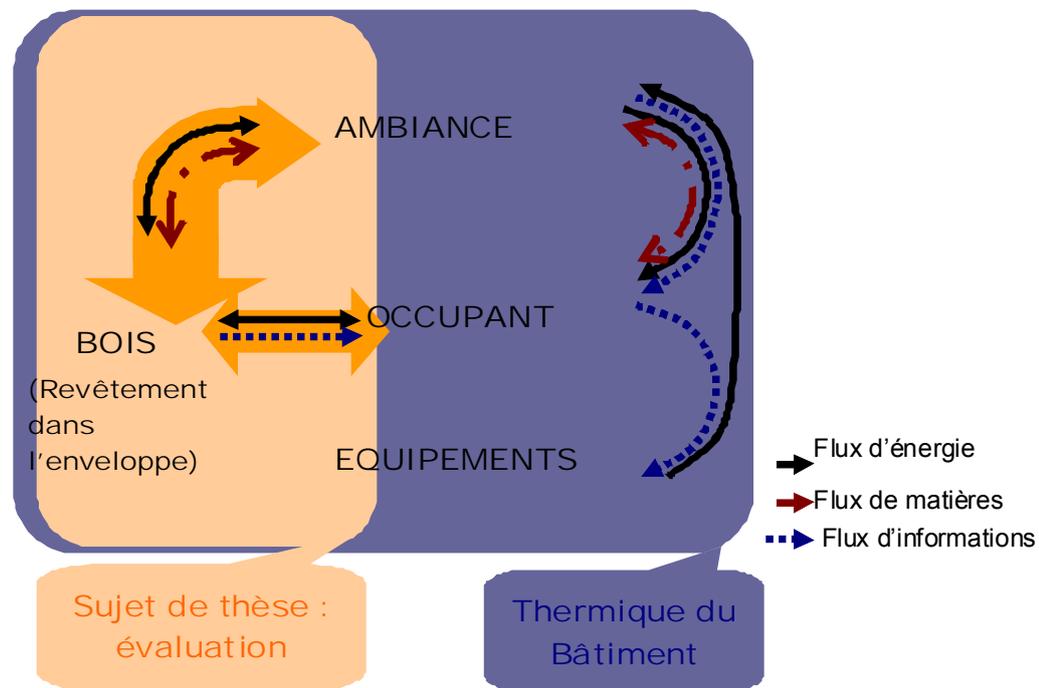


Figure 1-16 : Positionnement du sujet de thèse

Les interactions entre le bâtiment, l'ambiance et l'occupant sont définies par des flux d'énergie (chaleur, froid), de matières (gaz, eau, humidité) ou d'informations (décision, sensation, perception). L'étude de ces interactions peut s'appuyer sur l'analyse d'habitat occupé, de situations réelles où le bois est utilisé comme revêtement intérieur : plafond, murs, plancher, etc.

Nous avons déjà mené au laboratoire une étude multicritère sur les paramètres qui peuvent intervenir lorsqu'on a pour objectif d'améliorer le confort thermique intérieur. Pour cela nous avons intégré des paramètres d'adaptation de l'occupant dans une pièce : modifier la vêtue, possibilité d'intervenir sur les ouvertures, possibilité d'intervenir sur les équipements, et les paramètres physiques de l'air (températures, humidité relative, ...). Les résultats obtenus sont des aides à la décision en aménagement intérieur et la prise en compte du confort optimal dans le positionnement de l'occupant en fonction de l'utilisation de la pièce et les opportunités d'adaptation offert par le bâtiment. Cette étude multicritère enrichie les utilisations visées dans ce sujet de thèse. L'objectif étant de répondre à quelle mesure on peut

recommander l'utilisation du bois en revêtement intérieur des bâtiments. On pourrait ainsi préconiser que dès la conception, on considérerait la future fonction de chaque pièce. [Harijaona, 2005]. Dans ce sens, les résultats attendus sont positions du revêtement en bois auxquelles on associe les meilleurs confort. Et en fonction des revêtements en bois choisis, où va-t-on positionner l'occupant pour qu'il ait le meilleur confort thermique ? Utiliser le bois en revêtement intérieur est-il toujours une bonne idée pour le confort ?

Pour conduire ces travaux de thèse, nous cherchons à caractériser des échanges entre le revêtement en bois et l'environnement intérieur, notamment à l'aide d'un état de l'art sur les connaissances relatives aux échanges hygrothermiques du bois. Nous suivons alors la méthode représentée avec la figure 1-17.

La méthode choisie consiste tout d'abord à élaborer et à conduire plusieurs campagnes de mesures dans des habitations près de Lyon en France et à Antananarivo à Madagascar. Les locaux choisis présentent des revêtements en bois naturel pour éviter de travailler sur les finitions comme les vernis, lasures ou peinture.

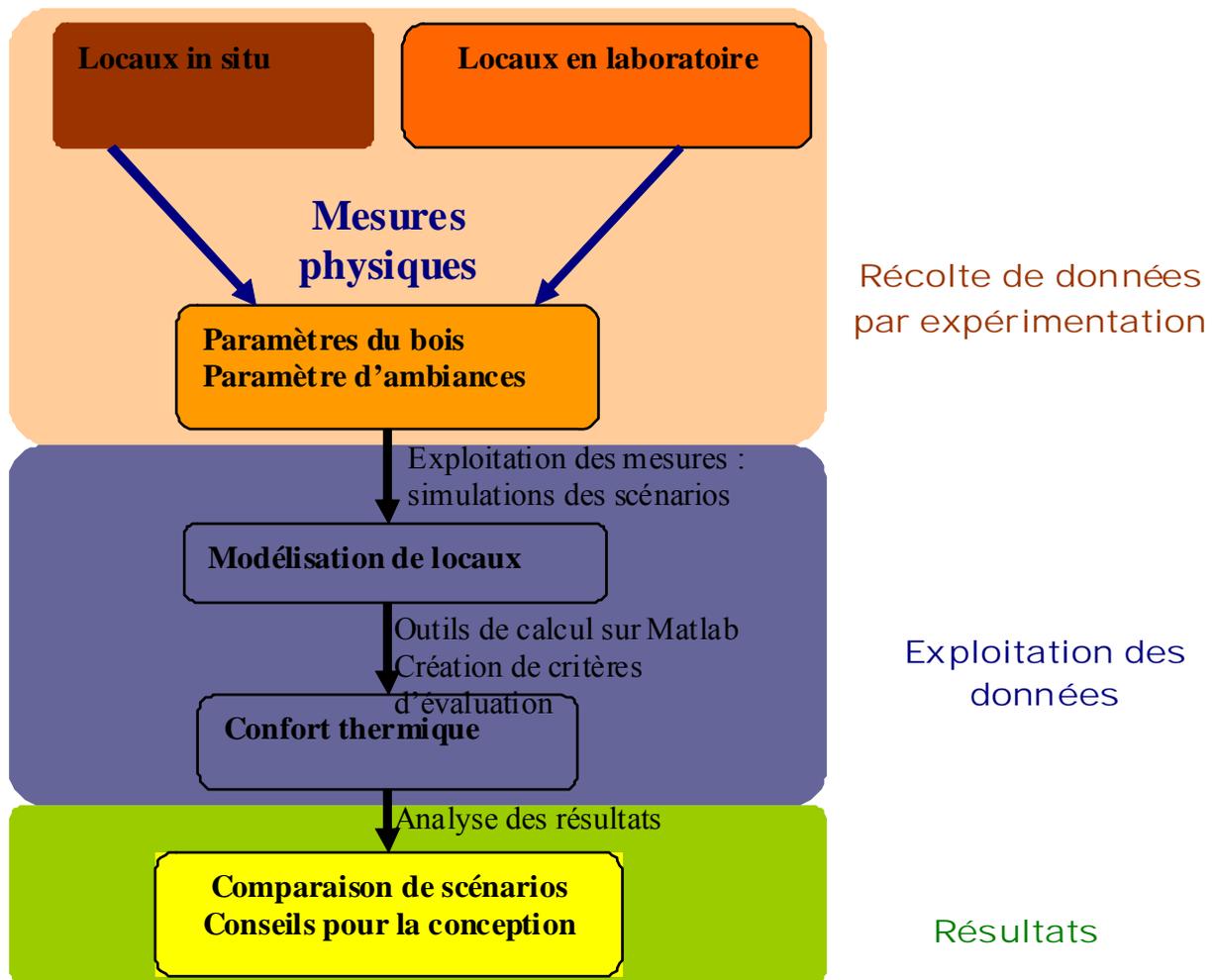


Figure 1-17 : Enchaînement de la méthode

Ces études de cas in situ sont complétées par une étude en laboratoire à l'ENTPE. Un local est transformé pour étudier l'influence de différentes configurations de revêtement en bois dans une pièce.

A partir de ces études in situ et en laboratoire, nous construisons plusieurs modèles numériques pour compléter l'évaluation de l'impact du bois. Ces modèles permettent de simuler de nouvelles configurations et environnements climatiques.

Enfin, nous effectuons une comparaison des scénarios d'utilisation du bois pour élaborer des recommandations sur les conditions d'amélioration du confort thermique intérieur.

Chapitre 2 : Caractérisation des échanges entre le bois et l'environnement intérieur

Dans ce chapitre, nous effectuons un état de l'art sur le bois, à l'échelle du matériau et du revêtement, en précisant ses échanges hygrothermiques avec l'environnement intérieur des bâtiments.

Il s'agit d'identifier les interactions thermo physiques entre le bois et son environnement immédiat : bois et eau, bois et air humide, transferts de chaleur et de masse.

Nous déterminons alors plusieurs modes de caractérisation de l'influence du bois avec le confort thermique, les échanges liés à l'humidité et à la température de surface des parois. Les caractéristiques mécaniques du bois sont données en annexe.

2.1 Echanges hygrothermiques

2.1.1 Structure chimique de la cellulose

La cellulose est le constituant majeur qui assure la protection et le soutien mécanique et structurel dans les organismes végétaux. Elle se trouve en abondance dans le monde végétal dont on estime la production journalière d'un arbre à 10 grammes. Elle est présente de 40% à 50% de la masse totale du bois, selon les essences.

La cellulose est un polymère composé d'une chaîne indéfinie d'unités de glucose liées entre elles par une liaison de groupes hydroxyles (figure 2-1). Ces molécules de cellulose peuvent s'organiser à plusieurs niveaux. Elles peuvent être agrégées pour former des microfibrilles dans lesquelles certaines zones sont hautement ordonnées (zones cristallines) et d'autres moins (zones amorphes). Les zones amorphes sont hydrophiles et c'est l'existence de ces zones qui rend la cellulose, donc le bois, hygroscopique.

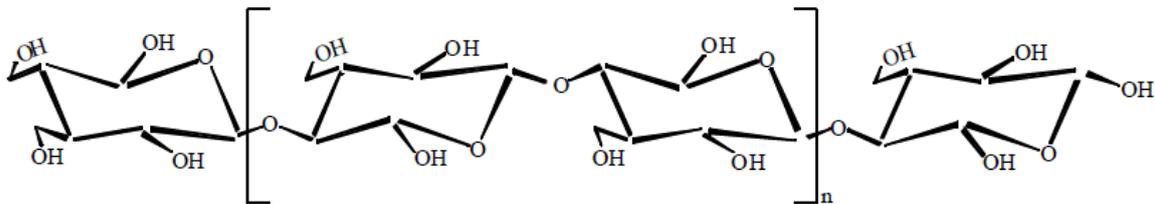


Figure 2-1: structure en chaîne de la cellulose

Le niveau supérieur d'organisation, appelé également niveau tertiaire, inclut la structure cristalline et fibreuse et n'est pas complètement résolue. C'est à ce niveau d'organisation que le bois tire toute sa complexité structurale, morphologique et comportementale face aux actions incessantes de son environnement.[Merrakeb, 2006, Satge, 2002]

L'unité de base de la cellulose est le glucose. Il possède trois groupes hydroxyles – OH très hydrophiles appelés sites de sorption (figure 2-3). La masse moléculaire du glucose est de 180g/mol. Si trois molécules d'eau s'accrochent aux trois groupes hydroxyles, la teneur en eau du glucose ainsi saturé est de 30%. Cette valeur est une limite théorique maximale que peut avoir une molécule de cellulose. Cependant, cette valeur ne peut être atteinte à cause de

l'existence des zones cristallines qui limitent le nombre de sites de sorption. La présence des impuretés fait augmenter la masse sèche de la cellulose [Merrakeb, 2006]

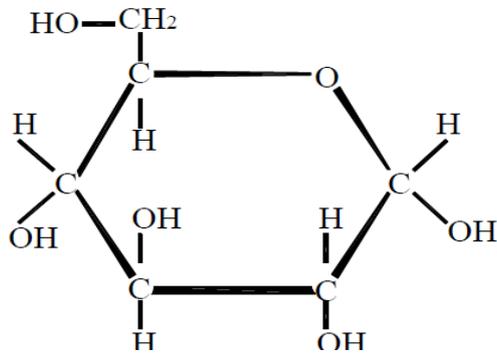


Figure 2-2: structure moléculaire du glucose

2.1.2 Différentes phases de l'eau dans le bois

L'eau dans le bois se présente sous plusieurs phases: eau libre ou capillaire. Elle occupe les vides cellulaires et est soumise aux forces capillaires et de gravité. Ces forces de capillarité sont responsables du transport de la sève brute (des racines vers la cime des arbres).

L'eau liée ou adsorbée est l'eau à l'origine des modifications physiques et mécaniques du bois tel le retrait/gonflement libre. C'est une eau dite hygroscopique liée principalement sur les chaînes cellulosiques qui composent les parois cellulaires. Tant que l'eau libre est présente dans les cavités, ces parois cellulaires sont saturées et la quantité d'eau liée est appelée « point de saturation des fibres » (PSF).

La vapeur d'eau est présente dans les cavités et les micropores dans le cas où ces derniers ne sont pas saturés en eau libre. Si l'eau libre est présente, la pression de vapeur prend sa valeur saturante. Si l'eau libre n'existe pas dans les cavités, la vapeur entre en équilibre thermodynamique avec l'eau liée présente sur les parois cellulaires. Cette vapeur d'eau n'est pas « titrable », c'est à dire que l'eau sous forme vapeur n'est pas quantifiable par une simple connaissance de l'état hydrique d'un échantillon. D'autres paramètres liés à la structure du matériau bois, notamment la porosité, sont nécessaires pour quantifier la vapeur d'eau dans une pièce de bois. L'eau est dite de constitution si elle participe à l'élaboration des molécules du squelette du matériau.

2.1.3 Mesure de l'état hydrique du bois

Pour quantifier la quantité d'eau dans un échantillon, ou son état hydrique, nous pouvons utiliser trois variables différentes :

- La concentration c est la quantité d'eau présente dans une unité de volume. On la retrouve généralement dans l'étude des solutions aqueuses.
- La teneur en eau w est la quantité d'eau présente dans une unité de masse soit anhydre (la teneur en eau est dite de base sèche), soit saturée (la teneur en eau dite de base humide).
- La saturation S est le taux de remplissage des volumes des vides. Cette variable est surtout utilisée en géo matériaux.

L'état hydrique d'un échantillon est donc défini par l'une des trois variables décrites ci-dessus.

$$w = \frac{\Delta m}{m} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad [2-1]$$

Avec m_h la masse humide et m_s la masse sèche

Δm est donc la quantité d'eau présente dans l'échantillon, m_s est la masse à l'état sec de l'échantillon obtenue en plaçant l'échantillon dans une ambiance sèche ou en le plaçant dans une étuve à 103°C jusqu'à ce que sa masse se stabilise (variation relative inférieure à 1% en 24 heures) [Merrakeb, 2006]

Les méthodes de mesure utilisées pour quantifier l'état hydrique du bois sont nombreuses. Notons la méthode de la double pesée. Elle est à la fois simple et précise mais ne peut être appliquée que sur des échantillons de laboratoire. Elle ne peut donc être appliquée sur une structure in situ. De plus, elle est destructive car elle nécessite le séchage des échantillons dans une étuve à 103°C. Pour cela, des méthodes électriques basées sur la mesure de la résistivité électrique ont été développées spécialement pour une utilisation in situ. Ces méthodes sont simples d'utilisation, non destructives, mais moins précises et ne s'utilisent que sur des domaines limités de teneur en eau dans le domaine hygroscopique.

On utilise aussi la gammamétrie (difficile à exploiter et destructive, mais précise) facile à mettre en œuvre et capable de fournir le champ d'humidité à l'intérieur des pièces en bois.

Une équipe de l'Université Technique de Danemark [Hameury, 2005] a étudié la capacité de stockage d'humidité par les matériaux de construction. Ils ont défini le paramètre : MBV (Moisture Buffer Value), qui a une définition, basée sur l'analyse théorique et les propriétés standards de transport et de stockage d'humidité. C'est l'effusivité à l'humidité qui est une propriété pouvant être similaire à l'effusivité thermique :

$$b = (\lambda \cdot \rho \cdot C)^{1/2} = \lambda / \sqrt{\alpha} \quad [2-2]$$

b : effusivité thermique [J/m².K.s^{1/2}]

λ : conductivité thermique [W/m.K]

α : diffusivité [m² / s]

L'effusivité thermique peut être définie comme la capacité du matériau à accumuler la chaleur. Elle indique le taux de transfert de chaleur contenu et extérieur au matériau lorsque la température de surface est amenée à une autre situation.

L'effusivité hygrothermique est l'équivalent : elle indique la capacité du matériau à perdre ou gagner de l'humidité (extérieur en surface) lorsque celui-ci est en contact avec un environnement dans d'autre condition. [Rode, et al., 2003]

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi}}{p_{sat}}} \quad [2-3]$$

b_m : effusivité hygrothermique [K/m².Pa.s^{1/2}]

δ_p : perméabilité à l'eau [Kg/m.s.Pa]

u : humidité contenue [Kg/Kg]

φ : humidité relative [%] ou [-]

p_{sat} : Pression de vapeur à saturation [Pa]

Le taux de transfert d'humidité $g_m = \frac{b_m}{\sqrt{t-t_0}}$ [2-4] permet d'écrire l'expression de

$$MBV = \frac{\int_0^{t_p} g_m \cdot dt}{\Delta RH} = b_m \cdot \sqrt{t_p} \quad [2-5]$$

La première expression est préférée car elle est basée sur des expériences dynamiques et la deuxième est basée sur les propriétés standards de transport et de stockage d'humidité des matériaux.

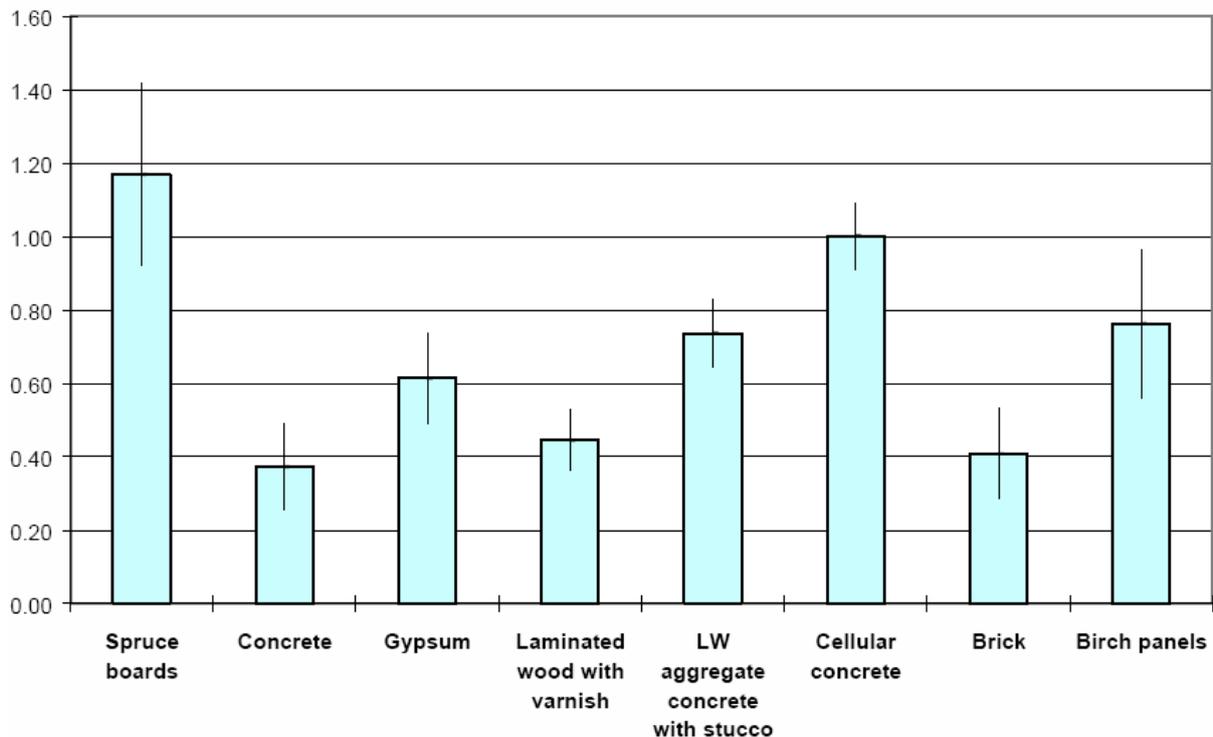


Figure 2-3 : Comparaison de MBV de différents matériaux de construction

La figure 2-3 représente une comparaison de MBV plusieurs matériaux de construction : le bois, le béton, le gypse, bois vernis, stuc d'agrégats de béton, béton cellulaire, briques et planche de bouleau.

2.1.4 Phénomène d'hygroscopie dans le bois

2.1.4.1 Définition

Physiquement, l'hygroscopie se présente comme l'étude de l'équilibre de l'eau liée dans le bois avec sa pression de vapeur, sachant que le domaine d'étude est le domaine hygroscopique limité à une teneur en eau maximale appelée point de saturation des fibres, obtenu en plaçant le bois dans un environnement caractérisé par une humidité relative de 100%.

Si nous soumettons un échantillon de bois à une condition climatique de température et d'humidité définie, nous constatons que son poids, sa masse ou plus généralement son état hydrique, se stabilise sur une valeur bien déterminée. Dans ce cas, on dit que l'équilibre hygroscopique est atteint.

Prenons par exemple une température sèche d'air de 40°C et une humidité relative de l'air de 60%, on détermine par le diagramme de la figure 2-4, l'humidité d'équilibre du bois et l'on trouve 10%.

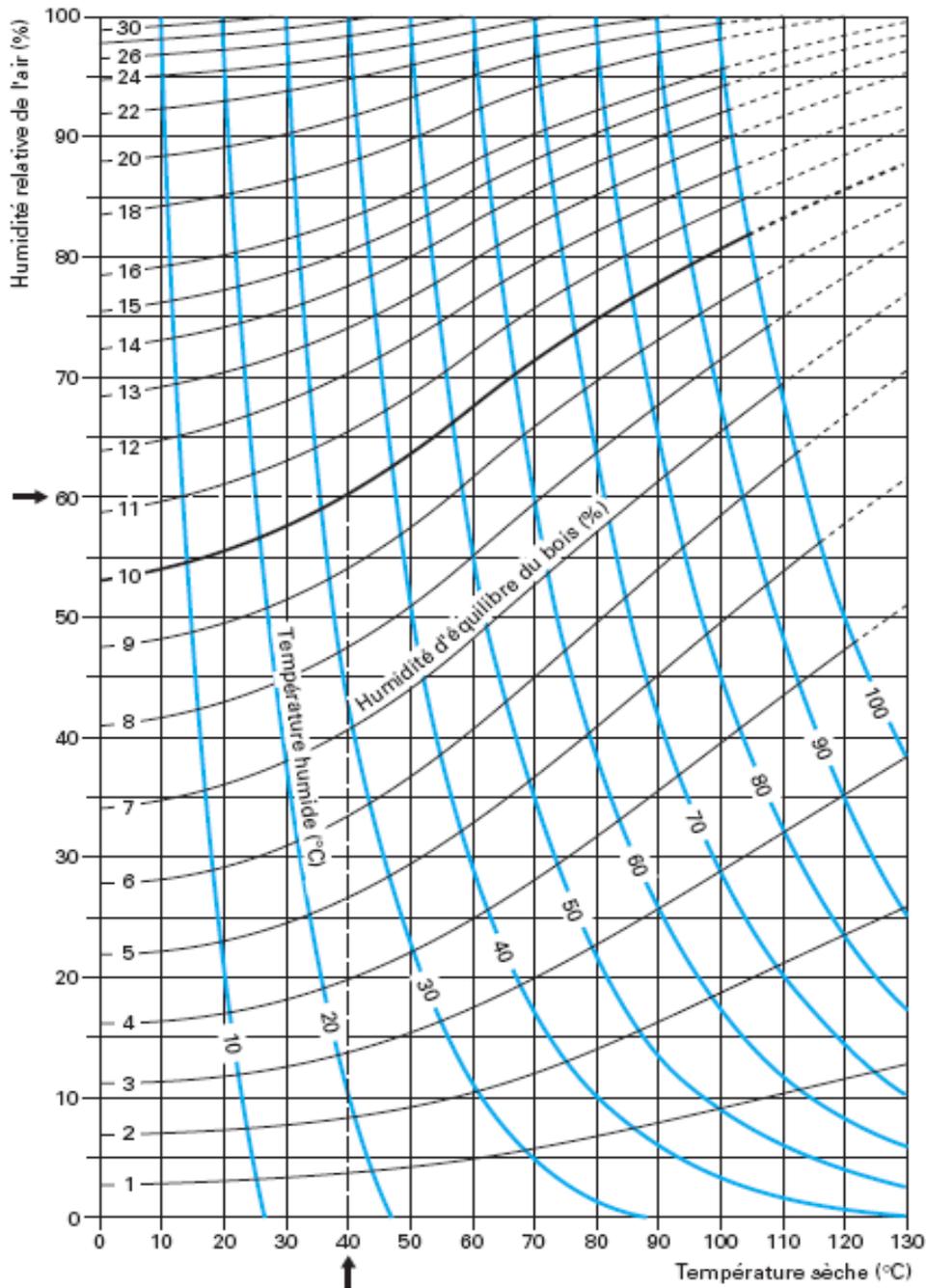


Figure 2-4 : Détermination de l'humidité d'équilibre du bois

[TROUY-TRIBOULOT, et al., 2006]

L'état hydrique de l'échantillon nous renseigne sur la quantité d'eau présente dans cet échantillon. Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$\Delta m = m_h - m_s$$

Équation 2-6

Lorsqu'on fait varier l'humidité relative de l'air h , nous constatons que la masse de l'échantillon varie également. Sur un graphique comme sur la figure 2-4, où l'on représente en abscisse l'humidité de l'air h et en ordonnée la teneur en eau w , nous pouvons tracer une courbe d'adsorption ou de désorption selon qu'il s'agisse d'une augmentation ou d'une diminution de la teneur en eau.

Si la température reste fixe pendant la transformation, la courbe est appelée isotherme d'adsorption ou de désorption.

Nous pouvons ainsi caractériser plusieurs essences de bois grâce à ces courbes d'isotherme. Mais d'une manière générale, l'humidité de l'air de l'ambient varie de manière aléatoire. Sur la figure 2-5, nous constatons que des tronçons de courbes d'isotherme différents peuvent apparaître à cause de ces variations climatiques aléatoires de température et d'humidité relative. [Merrakeb, 2006]

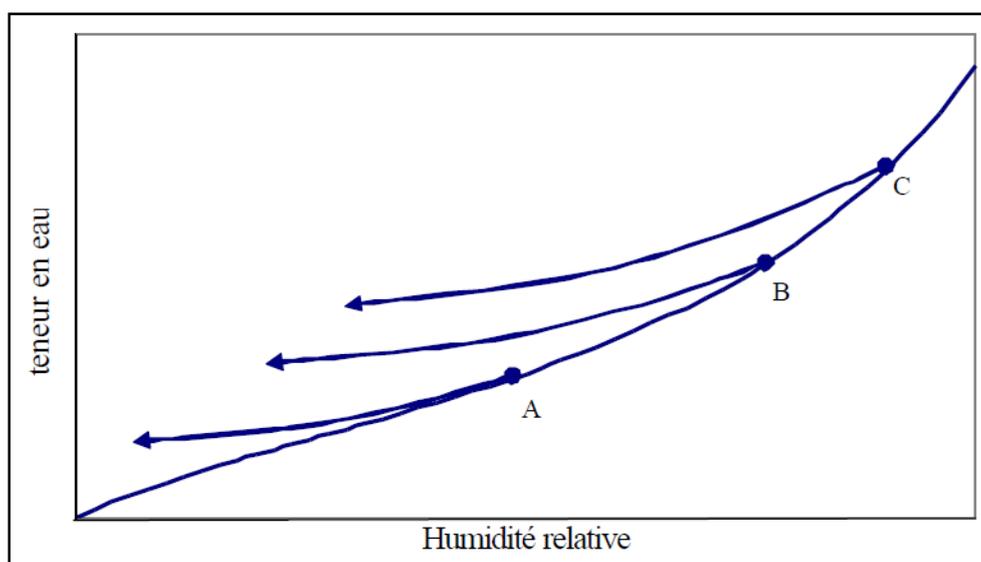


Figure 2-5: problématique de l'existence des hystérésis

2.1.4.2 Modèles d'isotherme de sorption

Il existe dans la littérature plusieurs modèles décrivant l'équilibre de l'eau liée dans une substance hygroscopique à l'exemple du bois avec l'eau de l'ambiance.

Beaucoup d'équations théoriques, semi-empiriques et empiriques ont été développées pour relier la teneur en eau d'un matériau hygroscopique avec la température et l'humidité relative de l'environnement [Kaleemullah, et al., 2004, Merrakeb, 2006]

Les modèles d'isotherme de sorption ont été construits à partir de considérations théoriques ou empiriques. Généralement, les courbes d'isotherme ont été partitionnées en trois segments correspondant chacun :

- Aux basses humidités relatives : fixation de la première couche de molécules,
- Aux humidités relatives intermédiaires : adsorption de plusieurs couches de molécules sur d'autres déjà fixées ou sur de nouveaux sites,
- Aux fortes humidités relatives : condensation capillaire qui correspond à la fixation des dernières molécules sur les irrégularités de la surface.
- Au dessus du point de saturation des fibres, il n'existe pas de relation univoque entre la teneur en eau et l'environnement séchant : c'est le domaine non hygroscopique. La fraction massique de la vapeur d'eau dans l'air est égale à sa valeur saturée. Par contre, dans le domaine hygroscopique, sa valeur est fonction de la température et de la teneur en eau du bois.

Nous avons présenté quelques modèles en annexe I de ce mémoire et dont les résultats ont été utilisés pour caractériser le matériau bois en comparaison avec d'autres matériaux. Nous rappelons ici que ce travail de thèse n'est pas une vérification de ces modèles mais l'état de l'art permet d'avoir des informations susceptibles d'influencer le confort thermique intérieur.

2.1.4.3 Comportement thermodynamique de l'équilibre hygroscopique

L'équilibre hygroscopique est interprété comme une propriété thermodynamique de l'eau liée dans le bois sachant qu'il n'est pas différent de l'équilibre de l'eau libre avec sa pression de vapeur saturante. La seule différence est qu'à température fixe, l'eau libre s'équilibre toujours avec une pression de vapeur fixe car sa chaleur latente de vaporisation reste constante, contrairement à l'eau liée dont la chaleur de sorption dépend de l'état hydrique du matériau bois. Egalement, il a été observé que les variations de l'enthalpie, de l'énergie libre et de l'entropie de l'eau liée dans le bois en fonction de l'état hydrique sont à l'origine de ces isothermes. Ces dernières sont différentes selon que le bois est dans la phase d'adsorption ou

de désorption [Rawat 1996]. Ceci fait apparaître le phénomène d'hystérésis, un phénomène difficile à négliger dans le cas des structures en bois soumises à un climat variable.

Pour comprendre comment s'installe l'équilibre hygroscopique entre le bois et l'environnement humide, nous pouvons nous appuyer sur la représentation schématique de la figure 2-6 :

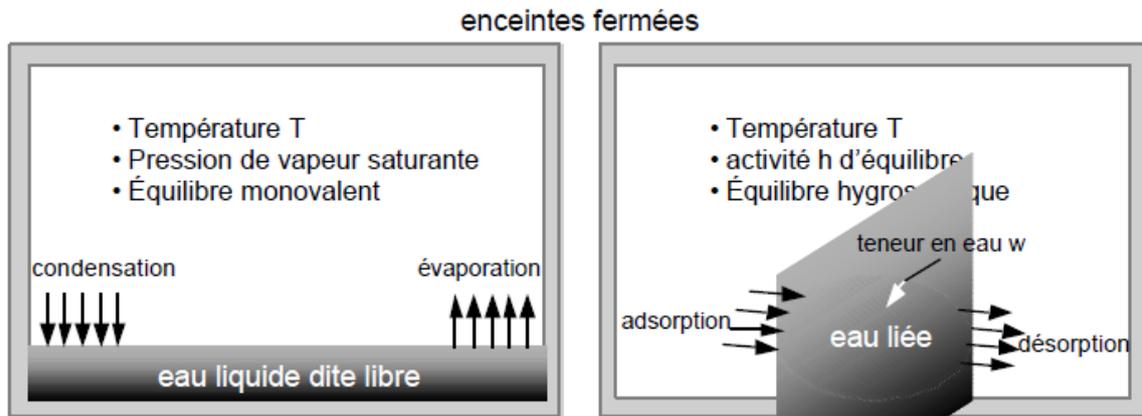


Figure 2-6: Représentation des équilibres de l'eau libre et liée avec l'environnement extérieur.

Nous pouvons constater que la température n'est qu'un paramètre fixé et donc secondaire. L'adsorption et la désorption de l'eau liée dans le bois correspondent respectivement à la condensation et la vaporisation de l'eau libre. Il existe cependant une différence. La quantité d'eau libre dans l'enceinte de gauche de la figure 2-6, n'influe pas sur l'équilibre de vapeur saturante (la principale cause de cet équilibre indifférent est certainement la chaleur de vaporisation de l'eau libre qui reste constante). Par contre, dans l'enceinte de droite, la chaleur de sorption est liée au niveau de l'état hydrique du matériau bois. Il faut s'attendre donc à ce que la pression de vapeur à l'équilibre soit variable et fonction de cette chaleur de sorption et donc de l'état hydrique du matériau bois. Nous pouvons affirmer intuitivement que cette pression de vapeur à l'équilibre hygroscopique est inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau libre car la chaleur de vaporisation de cette dernière est inférieure à celle de l'eau liée.

Il faut noter que la pression de vapeur saturante est une propriété de l'eau liquide ordinaire à une température donnée. Ce n'est pas le cas d'une eau qui interagit avec une forme d'énergie potentielle comme le potentiel capillaire. En effet, l'eau capillaire possède une pression de

vapeur saturante légèrement inférieure à l'unité, selon le rayon de courbure de la surface avec laquelle elle entre en contact. A titre d'exemple, pour une eau confinée dans des tubes capillaires de rayons de courbure de 1 m, 0.1 m et 0.01 m, la pression de vapeur d'équilibre est respectivement de 0.999, 0.99 et 0.9. [Merrakeb, 2006]

Il est observé des phénomènes d'hygroscopie liés à la température et à l'état mécanique du bois. L'amplitude des hystérésis de sorption est plus grande sur des isothermes à 21°C que sur celles à 45°C. [Kaleemullah, et al., 2004]. Le point de saturation des fibres diminue avec la température selon la formule :

$$W_s = 0.598 - 0.001T \quad [\text{Équation 2-7}]$$

De plus, l'application d'une contrainte de compression sur le bois fait diminuer sa teneur en eau tandis qu'une contrainte de traction la fait augmenter [Merrakeb, 2006]

Les études effectuées sur l'hygroscopie du bois nous a conduit à prendre ces résultats de recherche comme hypothèses. Le bois contribue à la stabilité de l'air ambiante puisqu'il effectue un équilibre avec l'ambiance. D'un côté, il existe un seuil d'absorption et si l'air se trouve dans les conditions où le bois n'atteint pas ce seuil, alors il réduit l'humidité relative, néanmoins, la quantité (importance) de cette influence dépend de l'objectif de l'étude et l'échelle de l'ambiance : ici, c'est le confort thermique de l'occupant à l'échelle d'un local d'habitation. Nous allons aborder ce sujet dans les paragraphes suivants.

2.1.5 Transferts de masse à l'échelle de l'habitat

Le bois naturel, utilisé dans l'habitat, est un matériau poreux (murs, plancher, plafond) qui peut amortir la variation du climat intérieur en terme de température et d'humidité.

Une étude in situ, menée par Hameury et Lundström, a été faite dans un bâtiment à plusieurs étages en Suède en 2003 [Hameury, et al., 2004]. Les résultats montrent un respect des recommandations ASHRAE pendant les périodes froides avec une faible humidité relative à l'intérieur et on constate qu'une grande surface de bois massif exposé contribue à l'amortissement des variations de température intérieure. En outre, il n'y a pas d'évidence à ce que le bois atténue les fluctuations quotidiennes de l'humidité relative. L'HR varie de 20%

à 60% en hiver et l'humidité des parois tend à se stabiliser avec celle de l'air ambiant et elle ne fait apparaître que 6% de fluctuation correspondant à l'absorption du pin.

Une autre étude numérique et in situ [Hameury, 2005, Hameury, 2006, Padfield, 1998] menée par les mêmes auteurs, montre que l'utilisation de paroi en bois permet d'avoir un air sec intérieur par rapport aux autres matériaux non hygroscopiques. Ceci est confirmé par les mesures in situ avec $HR < 25\%$. On a des températures moyennes de 19 à 23°C et qui peuvent descendre jusqu'à 19°C et 17°C. Dans quatre études de cas en Europe du Nord, les ambiances sont en situations agréables en été : HR est maximale à 60% et minimale à 25%. Cependant, ils ont constaté que la température peut arriver à une valeur supérieure à 25°C avec des pics allant jusqu'à 34°C pour les appartements à orientation au sud et qui sont toujours exposés au soleil.

Une autre explication de cette forte chaleur est la grande inertie thermique du bâtiment qui permet le stockage d'une grande quantité de chaleur.

L'ambiance intérieure d'une enveloppe d'un bâtiment en bois massif [Hameury, 2006] face à une variation de température extérieure est favorisée par une grande inertie du mur. La fraîcheur de la nuit n'a pas d'impact sur le climat intérieur comme le cas des bâtiments à faible inertie thermique. La chaleur stockée par l'enveloppe pendant la journée est retransmise à l'intérieur par les murs intérieurs en bois massif la nuit.

La structure en bois massif montre un besoin en énergie spécifique inférieure à une construction légère. Ceci n'est pas nécessairement vrai concernant le taux de ventilation. En effet, la capacité d'un bâtiment en bois à atténuer le changement de température est supérieure à la capacité d'atténuer les changements d'humidité relative.

D'après les chercheurs de l'Institut finlandais de recherche de la construction : VTT [Kunzel, et al., 2005, Osanyintola, et al., 2006, Padfield, 1999, Rode, et al., 2003] en collaboration avec l'Institut Fraunhofer: Institut allemand de physique de la construction et l'Université technique d'Helsinki, le fort pouvoir d'échange d'humidité des surfaces en bois non traité fait que le degré d'humidité des pièces contenant du bois est considérablement plus stable que dans les pièces sans bois. Il y a moins de différence entre les maximum et minimum d'humidité relative dans une journée.

En effet, dans la relation entre le bois et la qualité de l'atmosphère ambiante, celui du bois présent dans une pièce au sol, murs ou plafond exerce véritablement une fonction de tampon sur le climat. En fonction de la température et de l'humidité de l'air, le bois se stabilise à une humidité d'équilibre qui est pratiquement indépendante de l'essence du bois.

Parmi les résultats qui confirment la capacité du bois à réduire la fluctuation d'humidité dans les bâtiments, les travaux de Kunzel et al. ont permis de comparer des murs couverts par des feuilles en aluminium (paroi non absorbante) avec des panneaux en bois et des parements en plâtre. On constate que le bois absorbe l'humidité et réduit la fluctuation (moins de 20%) durant une journée, tandis que le plâtre laisse une fluctuation d'humidité de plus de 20%, et l'aluminium plus de 50% pour les mêmes conditions climatiques extérieures (chaud et humide) [Kunzel, et al., 2005]

2.2 Caractérisation du confort thermique

2.2.1 Le bois et le confort thermique

2.2.1.1 Perception esthétique du bois

Les travaux sur la perception mettent un accent sur l'appréciation du bois par les occupants par rapport à d'autres matériaux de revêtement du point de vue esthétique et physiologique. La perception esthétique résulte de l'émotion ressentie à la vue d'un ensemble de couleurs ou de sensation colorée provoquées par l'environnement (paysage, tableaux d'une galerie de peintures, objets colorés, mosaïques anciennes, meubles, décoration intérieure...). Cette perception esthétique, positive ou négative, est souvent instinctive, voire irrationnelle, et dépend aussi de l'éducation reçue, du vécu artistique de l'individu comme de son expérience professionnelle [Janin, et al., 2001].

Une enquête a été effectuée en 2006 [Tsunetsugu, et al., 2006] correspondant aux variations des impressions ressenties pour des salles avec des finitions intérieures en bois disposées différemment : enquête par questionnaire avec l'utilisation des photographies pour la sensation et désir de calme ou d'activité. La pièce photographiée est soit avec un plancher en bois avec murs et plafond en béton peints en gris clair, soit avec des murs et plancher entièrement en bois avec plafond gris en béton, soit avec un plancher entièrement en bois et les murs avec une partie en bois et une autre partie en béton peinte en gris et enfin, une autre

cas où toutes les parois de la pièce sont en béton peint en gris clair [Sakuragawa, 2006, Tsunetsugu, et al., 2006]. Le résultat global montre que la présence du bois au plancher et murs induit à la recherche de calme alors que le béton peint en gris est associée à la recherche d'activités. Le cas du plafond en bois correspond à la fois à la recherche d'activité et de calme. Le même auteur a conclu lors d'un autre travail de recherche que le contact physique avec le bois (au toucher) n'induit à aucun état de stress physiologique, contrairement au toucher de l'aluminium et du plastique.

Concernant le confort thermique, on remarque qu'il n'y a pas d'effet de la couleur sur la perception de la température d'air [Laurentin, 2001]. Cependant, les couleurs sont perçues différemment suivant les conditions thermiques. Lorsqu'on parle de « ambiance chaleureuse due au bois », il s'agit de la température de couleur.

2.2.1.2 Confort thermique des occupants

Dans une ambiance thermique occupée par un individu, la convection, le rayonnement et la conduction sont les trois modes d'échange de chaleur sensible à la surface cutanée de l'occupant. La chaleur latente est reprise par évaporation de la sueur à la surface de la peau. La ventilation respiratoire dissipe la chaleur du corps par convection (chaleur sensible) et par évaporation (chaleur latente).

Les variables de l'environnement thermique sont la température d'air, la température de rayonnement, la vitesse d'air et l'humidité relative. L'individu est caractérisé par deux variables personnelles : l'activité et la vêtue. La vêtue est représentée par l'isolation thermique et la perméabilité à la vapeur des vêtements.

Outre les phénomènes physiques et physiologiques mis en jeu, il est nécessaire de spécifier des méthodes de mesure et d'utiliser des échelles de jugement pour une bonne estimation des aspects subjectifs de la perception de l'état thermique des individus. Pour définir les plages de confort on utilise les travaux de Fanger, qui par le biais de questionnaires et d'indices a caractérisé la situation de confort utilisée dans la norme NF EN ISO 7730 [AFNOR, 1995]

Nous avons présenté plus de précision sur la notion de confort thermique de l'occupants dans l'annexe A de ce mémoire.

2.2.2 L'indicateur PMV – Predicted Mean Vote

La caractérisation du confort thermique par le PMV (Predicted Mean Vote) se base sur des expériences menées aux USA et en Scandinavie, avec notamment les travaux de Fanger [Candas, 1998, Fanger, et al., 2002]. Les études consistent à recueillir les ressentis d'un échantillon représentatif de sujets exposé dans des conditions déterminées. Une centaine de conditions thermiques ont été étudiées, avec un échantillon d'environ mille personnes avec des vêtements classiques et des niveaux d'activité faibles. Les sujets optent pour une notation comprise entre -3 et +3 qui représente symboliquement les sensations suivantes :

- -3 : très froid
- -2 : froid
- -1 : légèrement froid
- 0 : ni l'un ni l'autre
- +1 : légèrement chaud
- +2 : chaud
- +3 : très chaud

Dans les années soixante-dix, Fanger a établi une méthode qui permet d'analyser et d'évaluer l'ambiance thermique en vue de déterminer les conditions de confort thermique. Cette méthode est la plus largement utilisée pour l'évaluation du confort thermique. Elle a servi pour développer la norme française et internationale NF EN ISO 7730 [AFNOR, 1995]. Avec le maintien de l'équilibre du bilan thermique du corps humain (condition nécessaire mais non suffisante pour le confort thermique), Fanger considère, pour le confort thermique, deux conditions supplémentaires concernant la limitation du débit sudoral et de la température cutanée dans les limites du confort [ASHRAE, 1997]. L'ASHRAE présente les deux équations déterminées par Rohles et Nevins pour calculer les valeurs de la température cutanée ($t_{sk,req}$) et du débit sudoral ($E_{rs,req}$) nécessaires pour le confort thermique à partir du métabolisme ($M-W$). (Equation 2-19 et 2-20).

$$tsk,req = 35,7 - 0,0275.(M - W) \quad [Équation 2-8]$$

$$Ersw, req = 0,42.(M - W - 58,15) \quad [Équation 2-9]$$

La méthode de Fanger consiste à déterminer de façon analytique les échanges de chaleur entre le sujet et l'environnement. Puis en fonction de l'écart entre la chaleur produite et la chaleur dissipée (bilan thermique) par le corps humain vêtu, supposé être aux valeurs de confort du débit sudoral et de température cutanée, il a établi un indice, le « PMV », qui prévoit le vote moyen de sensation thermique (globale) d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE. Le PMV est lié à un autre indice, le « PPD », qui prévoit le pourcentage des personnes qui seront insatisfaites dans l'ambiance considérée. Les personnes insatisfaites sont considérées celles dont le vote de sensation est extérieur à l'intervalle [-1,1]. La relation prévoit un minimum de pourcentage des insatisfaits de 5% pour un vote égal à zéro (sensation neutre), puis ce pourcentage augmente de façon symétrique de part et d'autre du vote zéro vers les sensations chaude et froide.

$$PMV = [0,303.exp(-0,036.M) + 0,028].L \quad [Équation 2-10]$$

$$L = M - W - Edif - Ersw,req - Eres - Cres - R - C \quad [Équation 2-11]$$

Avec:

L = l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue, W/m²

M = taux du métabolisme, W/m²

W = travail externe, W/m²

Qres = flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m²

Qsk = flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m²

Cres = flux de chaleur échangé par convection respiratoire, W/m²

Eres = flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire, W/m²

C = flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface du peau, W/m²

R = flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface du peau, W/m²

K = flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface du peau, W/m²

Esk = flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface du peau, W/m²

Scr = taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, W/m²

Ssk = taux de chaleur stockée dans la peau, W/m²

PMV = vote moyen prévisible sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE

PPD = pourcentage prévu des insatisfaits, %

Ces grandeurs qui permettent de trouver l'écart L dans le bilan thermique sont exprimées en détail dans l'annexe A. Le PMV peut être calculé à partir des six paramètres de base du confort thermique (les quatre grandeurs physiques de l'ambiance thermique, avec l'activité et la vêtue des sujets). Comme le PMV a été déterminé dans des conditions stationnaires (chambres climatiques), son application reste limitée aux ambiances stationnaires et homogènes où les conditions ne varient pas, ou peu, dans le temps. Si une ou plusieurs variables fluctuent faiblement, le PMV peut être utilisé à condition de considérer leurs moyennes pondérées en fonction du temps pendant la période de 1 h précédente. [AFNOR, 1995].

Ainsi, en fonction des variables humaines (M et Icl) et des paramètres d'ambiance (Ta, Tr, Va, hr) considérés, on détermine le vote moyen et la charge thermique.

L'hypothèse des faibles variations de ces paramètres sera faite en considérant l'inertie des différents matériaux.

2.2.3 L'indicateur PPD – percentage of people dissatisfied

Le PMV est un indice moyen qui recouvre plusieurs valeurs qui peuvent être très dispersées. Par exemple, un PMV de -1 peut correspondre à 27% des sujets qui ont déclaré avoir froid (-2), 46% avoir légèrement froid (-1) et 27% qui ont déclaré n'avoir ni chaud ni froid (0). Fanger a donc introduit la notion de PPD, en posant le postulat suivant : sont déclarées en situation d'inconfort toutes les personnes qui ont donné des valeurs absolues de sensation thermique ≥ 2 . Ainsi toute personne ayant répondu -1, 0 ou +1 est dite en situation de confort. Le PPD donne le ratio de personnes considérées en situation d'inconfort pour des conditions déterminées.

Le PPD est relié au PMV de la manière suivante :

$$PPD = 100 - 95e^{-\left\{0.03353 \times (PMV)^4 - 0.2179 \times (PMV^2)\right\}} \quad [Équation 2-12]$$

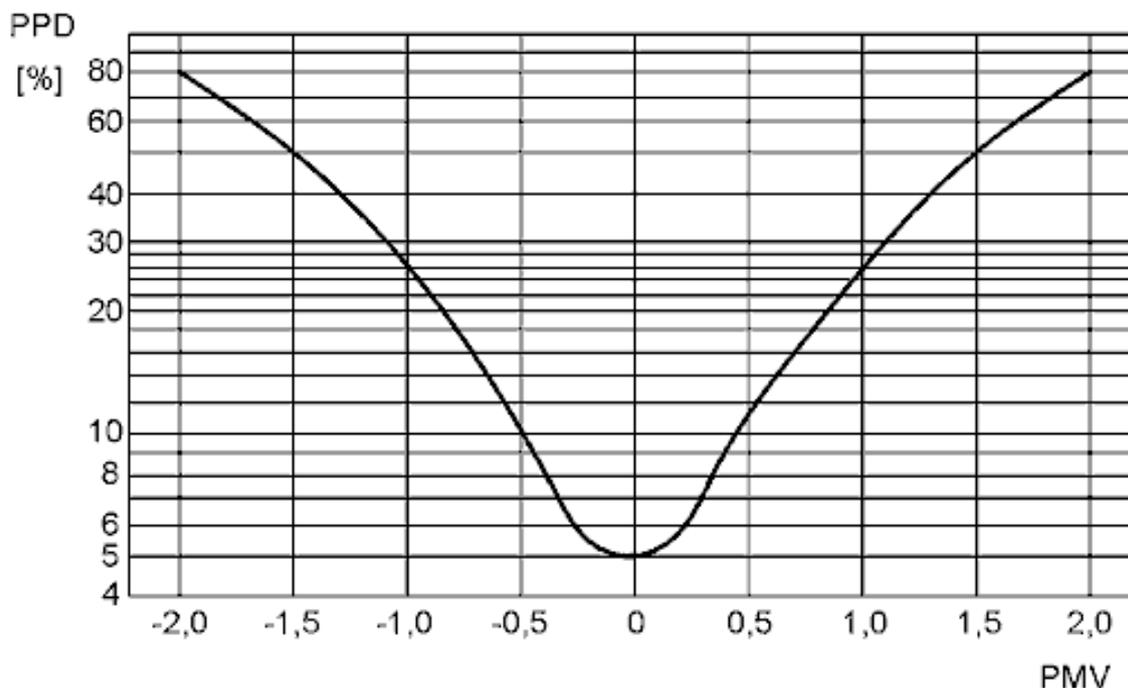


Figure 2-7: Graphe représentant les valeurs du PPD en fonction du PMV

Le PMV et le PPD sont donc deux indices associés qui nous permettront d'évaluer le confort thermique. Ces indices correspondent aux normes actuelles. Le PMV et le PPD nous permettent d'avoir une caractérisation du confort global ressenti par l'utilisateur dans une pièce. Cependant il est important de ne pas négliger les inconforts locaux sur lesquels le rayonnement thermique peut avoir une forte influence.

2.3 Caractérisation des échanges liés à l'humidité de l'air

2.3.1 Relation entre la température et l'humidité de l'air intérieur

L'humidité relative (HR) est définie comme le rapport de la fraction molaire de vapeur dans l'air par la fraction molaire de vapeur dans l'air à saturation à une même température et une même pression. Tant que la fraction molaire de vapeur est assimilée à la pression partielle de vapeur, on peut écrire :

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad [\text{Équation 2-13}]$$

$$P_{vs} = f(T) = e^F \quad [\text{Équation 2-14}]$$

La pression de vapeur saturante correspond à la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air saturé. La pression de vapeur saturante est une fonction croissante de la température. Elle est la pression maximale de vapeur d'eau que peut contenir l'air à une température et une pression déterminée.

Le paramètre F de l'équation 2-26 est défini par les expressions suivantes [ASHRAE, 1997] :

$$F = \begin{cases} \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 \cdot T + C_4 \cdot T^2 + C_5 \cdot T^3 + C_6 \cdot T^4 + C_7 \cdot \ln T & ; 173\text{K} < T < 273\text{K} \\ \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{12} \cdot T^3 + C_{13} \cdot \ln T & ; 273\text{K} < T < 173\text{K} \end{cases} \quad [2-15]$$

C_i sont des constantes définies dans ASHRAE Fundamentals 1997 [ASHRAE, 1997]

$C_1 = -5\,674,5359$, $C_2 = 6,3925247$, $C_3 = -9,677843 \cdot 10^{-3}$, $C_4 = 6,22115701 \cdot 10^{-7}$, $C_5 = 2,0747825 \cdot 10^{-9}$, $C_6 = -9,484024 \cdot 10^{-13}$, $C_7 = 4,1635019$, $C_8 = -5800,2206$, $C_9 = 1,3914993$, $C_{10} = -4,8640239 \cdot 10^{-2}$, $C_{11} = 4,1764768 \cdot 10^{-5}$, $C_{12} = -1,4452093 \cdot 10^{-8}$ et $C_{13} = 6,5459673$.

Lorsque la température diminue, nous constatons aussi que la pression de vapeur à saturation diminue.

La relation suivante définit l'humidité absolue :

$$w = 0,62198 \cdot \frac{P_v}{P_a} \quad [2-16]$$

où P_v est la pression de vapeur et P_a la pression de l'air

Ces quatre relations définissent la relation entre la température, l'humidité absolue, l'humidité relative et constituent ainsi le diagramme psychrométrique (figure 2-8)

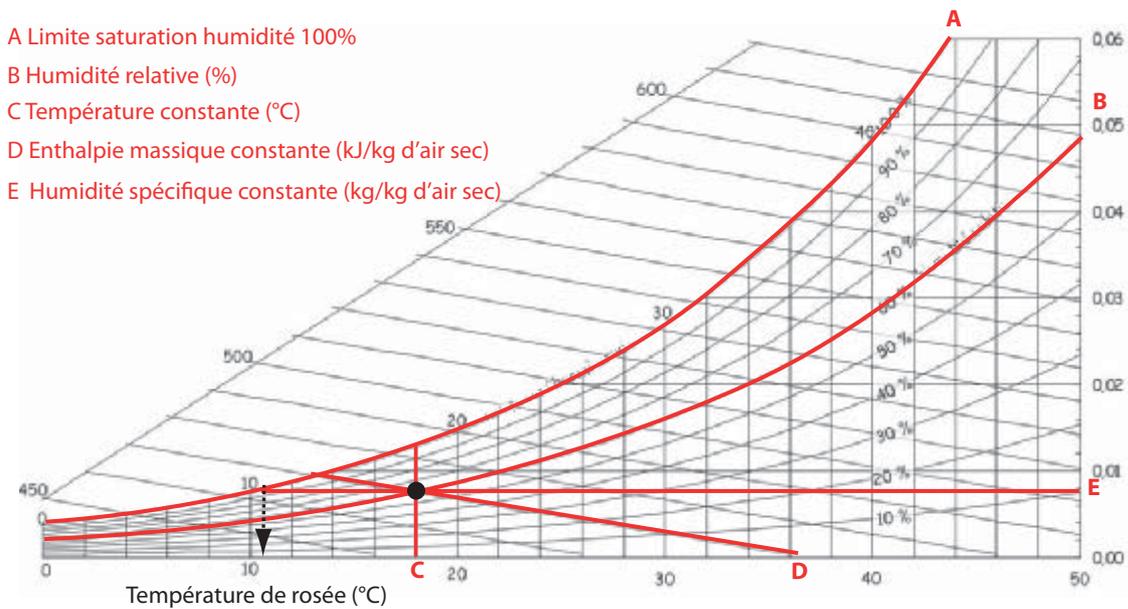


Figure 2-8 : Diagramme psychrométrique

Ce diagramme fait aussi apparaître l'enthalpie de l'air humide. Elle représente l'énergie contenue dans l'air et est la somme des enthalpies partielles des composants : vapeur d'eau et air sec. Lorsque la température et l'humidité de l'air augmentent, l'enthalpie augmente aussi selon la relation :

$$H = 1,006 \cdot T + w (2500,8 + 1,805 \cdot T) \quad [\text{Équation 2-17}]$$

2.3.2 Influence de l'humidité sur le confort thermique

L'importance de l'humidité de l'air intérieur vient du fait que la qualité de l'air intérieur et le climat intérieur ont une influence sur le confort des occupants, leur santé et leurs productivités. L'humidité a une faible influence sur le confort thermique général (c'est-à-dire pour tout le corps de l'occupant) mais elle se fait sentir en confort local par une gêne sur la respiration et la perception de la qualité d'air intérieur.

Parmi les paramètres pris en compte pour caractériser l'ambiance intérieure, l'humidité est retenue dans les normes internationales qui situent le confort thermique : ISO 7730 de 1995, ASHRAE 55, DIN 1946. [AFNOR, 1995, ASHRAE, 1997, Brager, et al., 1998, de-Dear, et al., 2005]

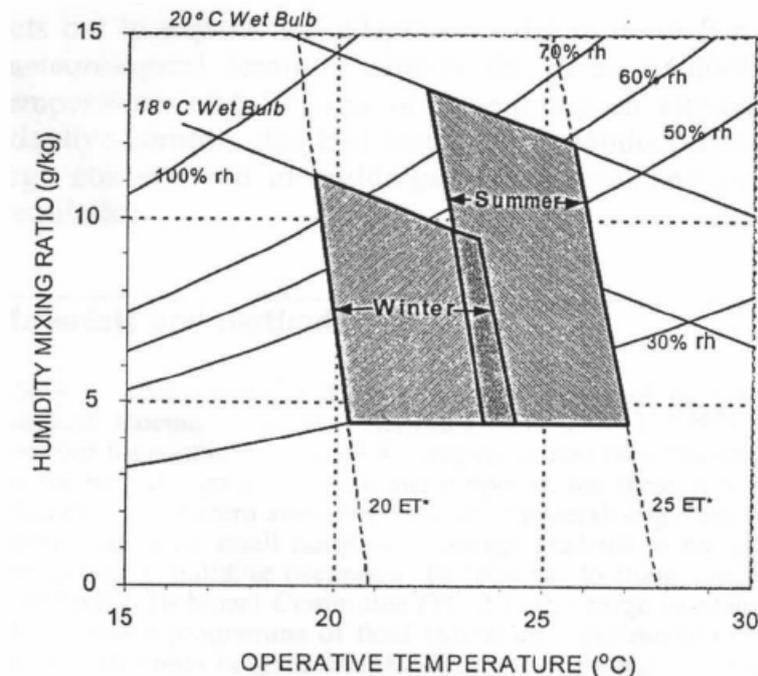


Figure 2-9 : Zones de confort selon ASHRAE [de-Dear, et al., 2005]

Ainsi, le pourcentage d'humidité relative est recommandé à moins de 60% à l'intérieur mais on peut trouver des critères d'ambiance pouvant arriver jusqu'à 80% selon l'utilisation spécifique (hôpital, salle expérimentale) et le climat extérieur du milieu. En général, une ambiance est perçue désagréable lorsque l'humidité relative est trop faible (inférieure à 30%) ou trop importante (supérieure à 70%).

2.3.3 Influence de l'humidité sur les inconforts locaux

Lorsqu'on parle de confort local, il s'agit de ce qui est senti par seulement une partie du corps de l'occupant. Il est alors plus clair de parler d'inconfort local ; Ils sont dus aux gradients de température ou courant d'air. En 1997, Toftum et al [Toftum, et al., 1997(2)] ont démontré que le confort local est aussi ressenti en présence d'humidité relative de la peau supérieure à 70% avec une insuffisance sur les membranes muqueuses des appareils respiratoires.

En se basant sur les réponses de 38 occupants exposés en chambre climatique expérimentale, Toftum et al [Toftum, et al., 1997] ont étudié le pourcentage d'insatisfaits en utilisant une combinaison d'ambiance variant en température de 20°C à 29°C et en humidité relative de 45% à 70%. Les occupants ont inhalé 3 à 4 fois en plaçant leur tête dans une chambre

expérimentale en contact avec l'air de la chambre. Cette expérimentation a permis de définir l'expression du pourcentage d'insatisfaits suivant :

$$PD = \frac{100}{1 + \exp[-3.58 + 0.18(30 - T) + 0.14(42.5 - 0.01P_v)]} \quad [\text{Équation 2-18}]$$

Avec T la température (°C) et P_v la pression de vapeur d'eau (Pa)

Cette relation est validée pour une ambiance propre et sera utilisée pour évaluer le pourcentage d'insatisfaits au confort de la respiration.

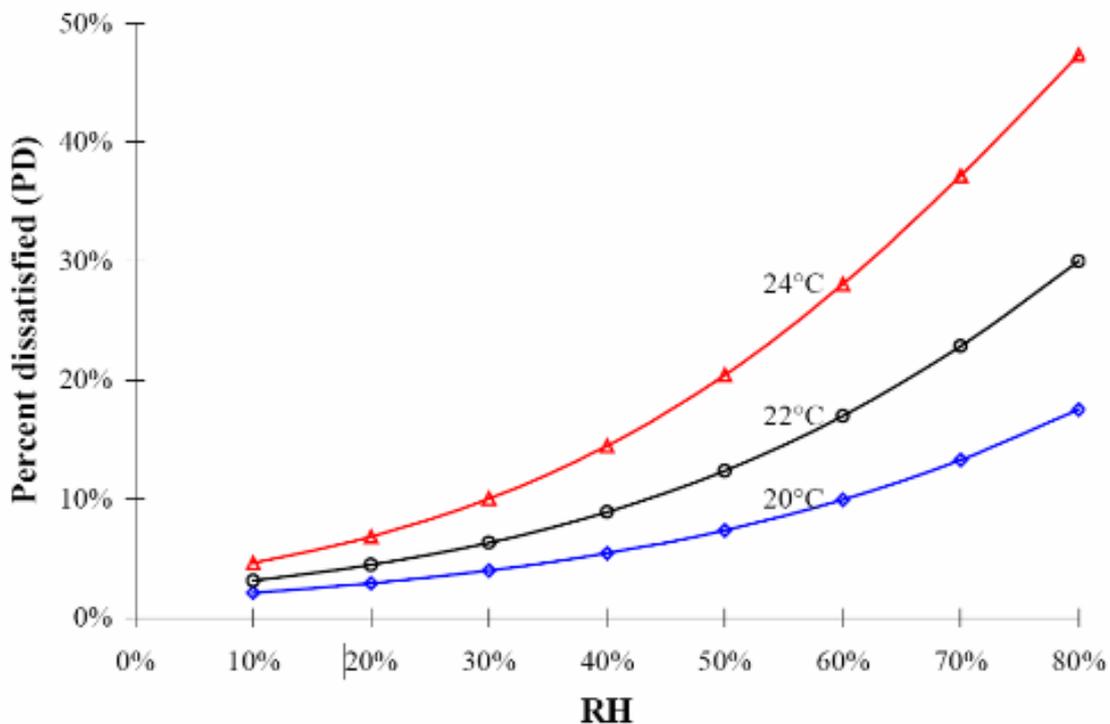


Figure 2-10 : Pourcentage d'insatisfaits pour le confort thermique local [Fanger, et al., 2002]

Comme pour le confort thermique général, la figure 2-11 représente le pourcentage d'insatisfaits en fonction de l'humidité relative et la température d'air intérieur. Nous pouvons constater que le pourcentage d'insatisfaits : PD (Percentage of Dissatisfaction) est très sensible à la variation d'humidité relative, surtout lorsqu'on a une température importante. Le pourcentage d'insatisfaits augmente lorsque l'humidité relative augmente.

A partir des deux figures (figure 2-9 et 2-10) nous ne pouvons comparer les pourcentages d'insatisfaits par le confort général et le confort local. En effet, on recommande un PD inférieur à 15% pour le confort local et inférieur à 10% pour le confort thermique général.

Par exemple : pour une température de 22°C, la limite de satisfaction au confort local correspond à environ 55% d'humidité relative (PD=15%) alors qu'on se situe toujours à PD<10% pour le confort général. De même, à 24°C, une humidité de 40% limite le PD du confort local à 15% alors que PD reste inférieur à 10% pour une humidité jusqu'à 48%.

2.4 Caractérisation des échanges liés à la température de surface

2.4.1 Perception du bois par le toucher

Une balustrade métallique est perçue comme trop chaud au toucher en été et trop froide en hiver. Par contre, la perception du bois par le toucher est indépendante des saisons [Obata, et al., 2005]. Une technique d'évaluation de cette différence de chaleur au toucher entre le bois et différents métaux a été développée pour proposer l'utilisation du bois comme matériaux de remplacement des ressources minérales.

Le confort fourni par les revêtements de sol intérieur est important pour le bien-être des usagers du bâtiment, en particulier dans les chambres et salles de bains où les gens sont souvent à pied nus. Bien que le confort dépend de l'environnement (air intérieur), il est également déterminé par les caractéristiques thermiques du matériau, à savoir, la diffusivité thermique et de l'effusivité. Barreira a effectué une étude comparative en utilisant la thermographie infrarouge pour le contact du pied avec les différents matériaux : tapis en textile, le liège, vinyle, carrelage en céramique et en granite et le bois. [Barreira, et al., 2007]

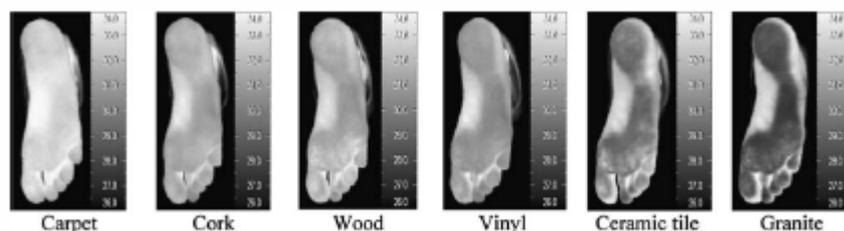


Figure 2-11 : Thermographie infrarouge du pied en contact avec divers matériaux après 1minute [Barreira, et al., 2007]

Dans les mêmes conditions thermiques intérieures, ils ont testé la température ressentie par le pied d'un occupant au bout de 1minute de contact, puis 2minutes. On constate qu'après une minute le tapis procure une sensation la plus chaude (32,6°C) suivie du liège (31,6°C), puis le bois (31,5°C), le vinyle (31°C), le carrelage céramique (30,5°C) et enfin le granite (29,6°C). Par contre après 2minutes, le contact avec le bois se rapproche du tapis et du liège (32,5°C), tandis que le céramique et le granite reste plus froide (30,6°C et 30,1°C). En effet, la faible effusivité produit un toucher moins choquant avec une température plus proche de la température initiale du pied (33,5°C).

De même, l'évaluation effectuée par des chercheurs japonais est basée sur les jugements des personnes (la perception)[Obata, et al., 2005]. L'une des propriétés physiques mesurées est la conductivité thermique [Wang, et al., 2004] et on constate que les matériaux à faible conductivité donnent une sensation plus chaude au toucher que les matériaux à fortes conductivités.

Obata et al. ont traité une large gamme de conductivité thermique allant des tissus et ameublements, au bois et aux différents métaux utilisés en matériaux de construction. Cependant, ils n'ont pas pu trouver d'expression simple pour expliquer une relation entre conductivité thermique et la chaleur au toucher.[Obata, et al., 2005]

Wang et al. ont montré que la chaleur ressentie au toucher du bois a une grande corrélation linéaire négative avec le logarithme de la conductivité [Wang, et al., 2004]. Ces résultats ont été considérés comme une relation avec les propriétés physiques du bois mais il est difficile de comparer entre différentes sortes de bois et des métaux puisque ces expérimentations, n'ont étudié que quelques variétés de matériaux. Les évaluations de la chaleur sentie au toucher ont été effectuées en ayant pour objectifs :

La détermination sans le jugement de sujets humains : seules les propriétés physiques sont mesurées ;

- La validation des mesures pour plusieurs matériaux et non pas seulement pour le bois ;
- L'explication des avantages du bois par rapport aux autres matériaux.
- Les auteurs ont aussi mis en relation l'effusivité du bois avec la chaleur sentie au toucher.

Ces travaux ont montré que la température de surface et l'effusivité thermique sont des paramètres importants pour l'évaluation puisque les gênes occasionnées par le contact d'une partie du corps avec un parement en bois sont moins importantes que celles des matériaux à forte émissivité : carreaux, marbre, béton [Barreira, et al., 2007, Wang, et al., 2004]

2.4.2 Asymétrie de rayonnement

Bien que l'inconfort résultant de l'asymétrie de rayonnement ait été étudié dès le milieu des années 80, l'apparition de méthodes de calcul dans les normes AFNOR ne date que de 2005.[AFNOR, 1995]

La température asymétrique de rayonnement est égale à la différence entre les températures radiantes orientées mesurées sur les deux faces opposées d'un même plan. La valeur de l'asymétrie de rayonnement ΔT_{pr} dépend du coefficient d'émissivité des surfaces concernées ainsi que du facteur de forme: la température asymétrique de rayonnement est inférieure à la différence de température des parois en regard.

Nous prendrons donc en compte des indices caractérisant l'inconfort créé par une asymétrie de rayonnement. Ces indices sont donnés par la norme ISO 7730 [AFNOR, 1995]

Le pourcentage d'insatisfaits pour une asymétrie de rayonnement des parois verticales est défini par:

$$PIV = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \cdot \Delta T_{pr})} \quad [Équation 2-19]$$

Le pourcentage d'insatisfaits pour une asymétrie de rayonnement des parois horizontales est défini par :

$$PIH = \frac{100}{1 + \exp(9,93 - 0,5 \cdot \Delta T_{pr})} \quad [Équation 2-20]$$

Ces deux définitions sont valables pour une différence de température moyenne radiante inférieure à 15°C entre deux surfaces opposées. La perception de l'asymétrie due au rayonnement correspond à des occupants immobiles (au bureau, au repos, ou en salle d'attente par exemple). Si la personne est en mouvement, l'équilibre thermique change selon sa posture et ses activités. La part relative des échanges par rayonnement est alors moins importante car les échanges par convection, respiration, sudation, et par le métabolisme vont augmenter.

La norme ISO 7726 [AFNOR, 2002] propose une méthode de calcul simple des facteurs de formes entre une personne et une surface verticale ou horizontale. Cette méthode de calcul permet de différencier une personne assise, d'une personne debout. Dans les deux cas l'orientation de la personne n'est pas prise en compte. Ce modèle sous-estime le facteur de forme du sol ou des parois lorsque celles-ci sont proches. Il permet cependant d'obtenir une approche rapide et simple des interactions radiatives entre l'homme et son milieu.

Les facteurs de forme sont calculés à partir de l'équation suivante :

$$F_{\text{usager} - \text{paroi}} = F_{\max} \left(1 - \exp\left(\frac{-a/c}{\tau}\right)\right) \times \left(1 - \exp\left(\frac{-b/c}{\gamma}\right)\right) \quad [Équation 2-21]$$

avec $\tau = A + B(a/c)$

$\gamma = C + D(b/c) + E(a/c)$

a et b représentent les dimensions de la surface étudiée

c la distance entre l'occupant et la paroi

A, B, C, D, E et F_{\max} sont des coefficients définis dans la norme et explicités dans le tableau 2-2.

	Fmax	A	B	C	D	E
Personne assise						
surface verticale (mur, fenêtre)	0,118	1,216	0,169	0,717	0,087	0,052
surface horizontale (sol, plafond)	0,116	1,396	0,13	0,951	0,08	0,055
Personne debout						
surface verticale (mur, fenêtre)	0,12	1,242	0,167	0,616	0,082	0,051
surface horizontale (sol, plafond)	0,116	1,595	0,128	1,226	0,046	0,044

Tableau-2-1 : coefficients de calcul de facteur de forme [AFNOR, 2002]

Les limites de cette méthode de calcul sont aux abords des parois et c'est justement là que l'influence du matériau de finition peut être la plus grande. De plus cette méthode de calcul des facteurs de forme ne permet pas de prévoir les asymétries de rayonnement. Il est donc nécessaire de se doter d'un autre modèle.

Le calcul de la température moyenne de rayonnement sera

$$Tr^4 = F_{ind-nord} \cdot \epsilon_{nord} \cdot T_{nord}^4 + F_{ind-sud} \cdot \epsilon_{sud} \cdot T_{sud}^4 + F_{ind-est} \cdot \epsilon_{est} \cdot T_{est}^4 + F_{ind-ouest} \cdot \epsilon_{ouest} \cdot T_{ouest}^4 + F_{ind-sol} \cdot \epsilon_{sol} \cdot T_{sol}^4 + F_{ind-plafond} \cdot \epsilon_{plafond} \cdot T_{plafond}^4 \quad [Équation 2-22]$$

Avec T_r la température moyenne radiante (°C)

F_{ind-i} le facteur de forme entre l'individu et la surface i

ϵ_i l'émissivité de la surface i

T_i la température de la surface i

ASHRAE [de-Dear, et al., 2002] propose le modèle suivant de l'homme afin de rendre compte de ses échanges radiatifs avec le milieu extérieur. Dans la situation considérée le milieu d'échange radiatif avec l'homme est une pièce rectangulaire dont les murs sont des surfaces grises de températures respectives $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$.

Le modèle proposé consiste à représenter l'homme comme une combinaison de 6 surfaces différentielles regardant dans 6 directions différentes formant un cube élémentaire dont le centre est situé par convention à 1,5 m du sol.

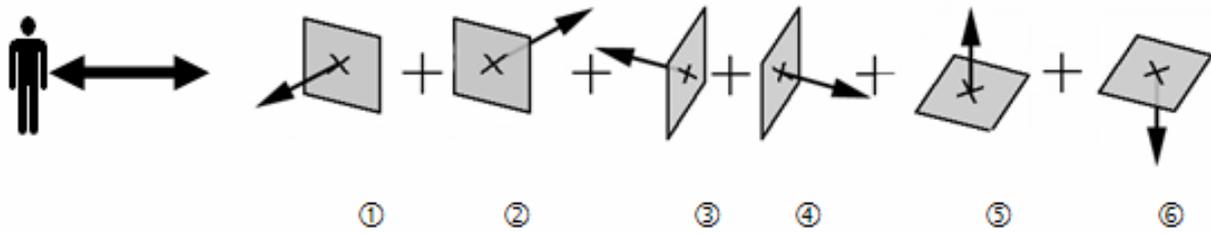


Figure 2-12 Représentation de l'homme selon ASHRAE

Ainsi dans ce modèle, l'homme est symbolisé par l'ensemble de ces 6 faces différentielles et le flux total reçu de l'environnement par le sujet est supposé égal au flux total que recevraient ces 6 faces dans ce même environnement.

Le modèle ajoute une précision quant à la représentativité des surfaces. En effet, un homme debout aura en majeure partie des surfaces verticales exposées au rayonnement. Ainsi dans le modèle l'ensemble des 4 faces verticales (①,②,③,④) représentent symboliquement 88% de la surface totale du corps humain irradié (surface corrigée par les facteurs de vêture et le facteur de posture : $AT = F \cdot f_v \cdot A_h$).

Aucune orientation n'est privilégiée et on considère que la surface est répartie équitablement entre les quatre faces. Ainsi chaque face verticale représente 22% de la surface totale du corps humain irradié. Les surfaces horizontales (⑤,⑥) représentent quant à elles les 12% restant, également réparties, ainsi chaque face horizontale correspond-elle à 6% de la surface totale.

$$Q_r = A_{nu} \times f_v \times F \cdot \varepsilon \cdot \sigma T_v^4 - \alpha [A_1 \cdot J_1 \cdot F_{1h} + A_2 \cdot J_2 \cdot F_{2h} + A_3 \cdot J_3 \cdot F_{3h} + A_4 \cdot J_4 \cdot F_{4h} + A_5 \cdot J_5 \cdot F_{5h} + A_6 \cdot J_6 \cdot F_{6h}]$$

[Équation 2-23]

Avec :

A_{nu} la surface du corps de l'homme nu (m^2)

f_v le facteur de vêture qui correspond à l'augmentation de la surface du corps due aux vêtements (coefficient adimensionnel)

F le facteur de posture qui correspond à la diminution de la surface exposée aux radiations en fonction de la posture de l'individu. (Coefficient adimensionnel)

ε l'émissivité des vêtements

σ la constante de Stefan-boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(m^2K^4)$

J_i la radiosité de la paroi i

A_i la surface de la paroi i

F_{ih} le facteur de forme entre la paroi i et l'individu

T_v la température à la surface des vêtements

On calcule alors le flux reçu par le corps humain de manière fractionnée. On somme les flux reçus par chaque orientation.

$$\Phi_{reçu\textcircled{1}} = \alpha [A_1 \cdot J_1 \cdot F_{1\textcircled{1}} + A_2 \cdot J_2 \cdot F_{2\textcircled{2}} + A_3 \cdot J_3 \cdot F_{3\textcircled{3}} + A_4 \cdot J_4 \cdot F_{4\textcircled{4}} + A_5 \cdot J_5 \cdot F_{5\textcircled{5}} + A_6 \cdot J_6 \cdot F_{6\textcircled{6}}]$$

[Équation 2-24]

$$\Phi_{reçu\textcircled{1}} = \alpha A_{\textcircled{1}} [J_1 \cdot F_{\textcircled{1}} + J_2 \cdot F_{\textcircled{2}} + J_3 \cdot F_{\textcircled{3}} + J_4 \cdot F_{\textcircled{4}} + J_5 \cdot F_{\textcircled{5}} + J_6 \cdot F_{\textcircled{6}}]$$

[Équation 2-25]

Avec

$$A_{\textcircled{1}} = 22/100 \times A_{nu} \times f_v \times F = A_{\textcircled{2}} = A_{\textcircled{3}} = A_{\textcircled{4}} \quad [\text{Équation 2-26}]$$

On considère alors que le flux total reçu par l'homme est :

$$\Phi_{reçu} = \Phi_{reçu\textcircled{1}} + \Phi_{reçu\textcircled{2}} + \Phi_{reçu\textcircled{3}} + \Phi_{reçu\textcircled{4}} + \Phi_{reçu\textcircled{5}} + \Phi_{reçu\textcircled{6}}$$

[Équation 2-27]

Dans le schéma équivalent l'homme est entouré de surfaces noires de températures T_w . Le schéma étant équivalent cela signifie que le flux reçu par l'homme dans les deux configurations est identique :

$$\Phi_{reçu} = \Phi_{reçu\textcircled{1}} + \Phi_{reçu\textcircled{2}} + \Phi_{reçu\textcircled{3}} + \Phi_{reçu\textcircled{4}} + \Phi_{reçu\textcircled{5}} + \Phi_{reçu\textcircled{6}} = \alpha \times A_{nu} \times f_v \times F \times \sigma T_w^4$$

[Équation 2-28]

On remarque dans l'expression des flux reçus par les surfaces différentielles que l'on peut factoriser par $(A_{nu} * f_v * F)$. Si on considère des surfaces noires, alors $J_i = \sigma * T_i^4$. De part et d'autre de l'équation d'égalité des flux on pourra simplifier $\alpha, \sigma, A_{nu} * f_v * F$. On aura donc :

$$T_w^4 = \Phi'_{reçu①} + \Phi'_{reçu②} + \Phi'_{reçu③} + \Phi'_{reçu④} + \Phi'_{reçu⑤} + \Phi'_{reçu⑥}$$

[Équation 2-29]

Pour des surfaces grises :

$$\Phi'_{reçu①} = 22/100 \left[F_{①1} \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1^4 + F_{①2} \cdot \varepsilon_2 \cdot T_2^4 + F_{①3} \cdot \varepsilon_3 \cdot T_3^4 + F_{①4} \cdot \varepsilon_4 \cdot T_4^4 + F_{①5} \cdot \varepsilon_5 \cdot T_5^4 + F_{①6} \cdot \varepsilon_6 \cdot T_6^4 \right]$$

[Équation 2-30]

$$\Phi'_{reçu⑥} = 6/100 \left[F_{⑥1} \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1^4 + F_{⑥2} \cdot \varepsilon_2 \cdot T_2^4 + F_{⑥3} \cdot \varepsilon_3 \cdot T_3^4 + F_{⑥4} \cdot \varepsilon_4 \cdot T_4^4 + F_{⑥5} \cdot \varepsilon_5 \cdot T_5^4 + F_{⑥6} \cdot \varepsilon_6 \cdot T_6^4 \right]$$

[Équation 2-31]

2.4.3 Indicateur d'uniformité thermique de surface

La dispersion de la température des surfaces intérieures permet de prendre en compte l'hétérogénéité de la paroi et est liée au confort thermique. En effet le confort thermique dépend de la température radiative des parois ainsi que du gradient de température. Aussi nous déterminons la température moyenne sur la paroi et un indice d'uniformité thermique (IUT). Cet indice est défini comme le rapport entre la température minimum de la surface et sa température moyenne :

$$IUT = T_{min}/T_{moy}. \quad [Équation 2-32]$$

Plus cet indice est proche de 1 et plus la température de surface est uniforme. Un indice semblable est utilisé en éclairagisme pour quantifier l'uniformité de l'éclairage d'une pièce.

Il faut remarquer que la valeur de cet indicateur est liée à la différence de température de chaque coté de la paroi. Il faut donc opérer dans des conditions identiques afin de comparer les résultats.

2.4.4 Outil de calcul des indicateurs de confort

Le diagramme de la figure 2-12 présente le déroulement chronologique des calculs du programme que nous avons effectué pour analyser les mesures. Une fois les paramètres entrés

par l'utilisateur (voir l'utilisation de l'outil en annexe D) le programme utilise soit le modèle développé par ASHRAE soit le modèle développé dans la norme ISO 7726 (le choix est effectué par l'utilisateur dans les paramètres). Puis une fois les facteurs de formes calculés pour toutes les positions considérées (par défaut un maillage de 50 par 50 de la surface du local), si le choix du modèle ISO a été effectué le programme calcule la température moyenne de rayonnement pour toutes les positions puis le PMV et le PPD correspondant. [Courbe, 2008]

Si le choix du modèle ASHRAE est effectué, le programme calcule la température moyenne de rayonnement pour toutes les positions puis le PMV et le PPD correspondant ainsi que les asymétries de rayonnement et les pourcentages d'insatisfaits correspondant.

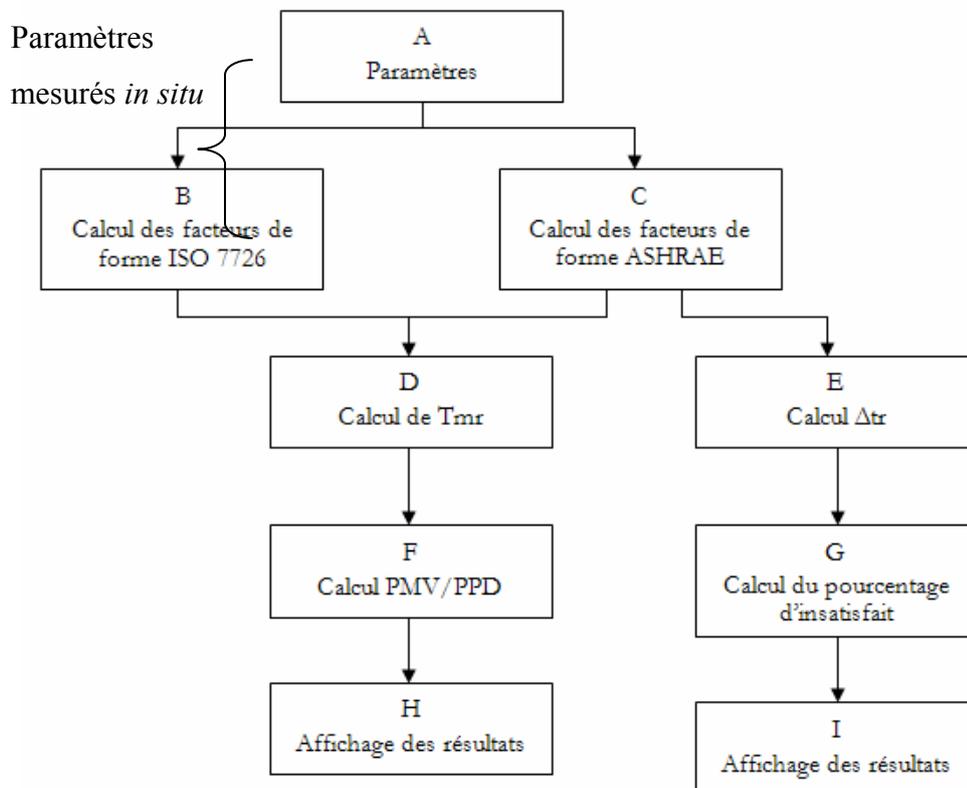


Figure 2-13 : Schéma général de fonctionnement du calculateur

La suite explique le fonctionnement de chaque module (A, B, C, D, E, F, G, H et I) en précisant les paramètres d'entrée, les variables et les données de sortie.

Le module A consiste en l'interface avec l'utilisateur. L'utilisateur devra renseigner le programme sur les paramètres nécessaires à son fonctionnement :

Température de surface des parois T_s (°C)

Température de l'air T_a (°C)

Vitesse relative de l'air V_a (m/s)

Humidité relative RH (%)

Isolement vestimentaire

Métabolisme

Assis/Debout

Dimension de la pièce (X, Y,Z) (m)

Emissivité de chaque paroi

Le module B calcule les facteurs de formes en fonction de la position de l'individu dans la pièce et des différents paramètres selon la norme ISO 7726

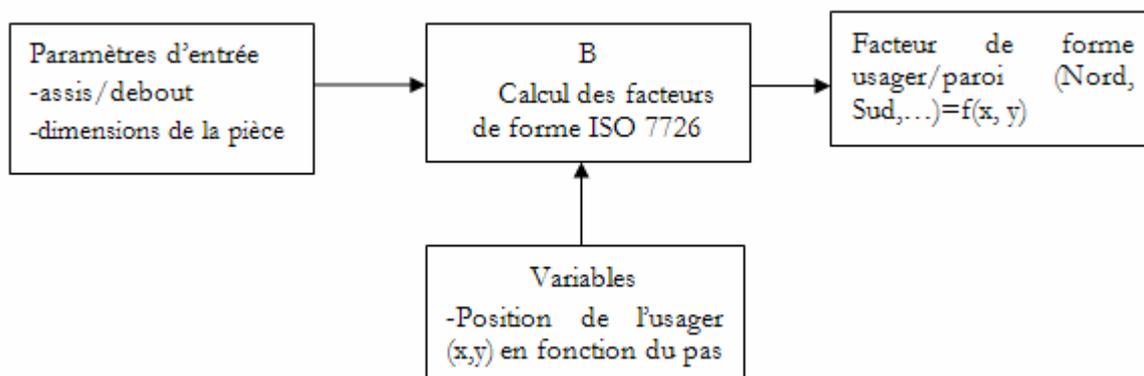


Figure 2-14: Module de calcul des facteurs de forme ISO 7726

Le module C calcule les facteurs de formes en fonction de la position de l'individu dans la pièce et des différents paramètres selon le modèle développé

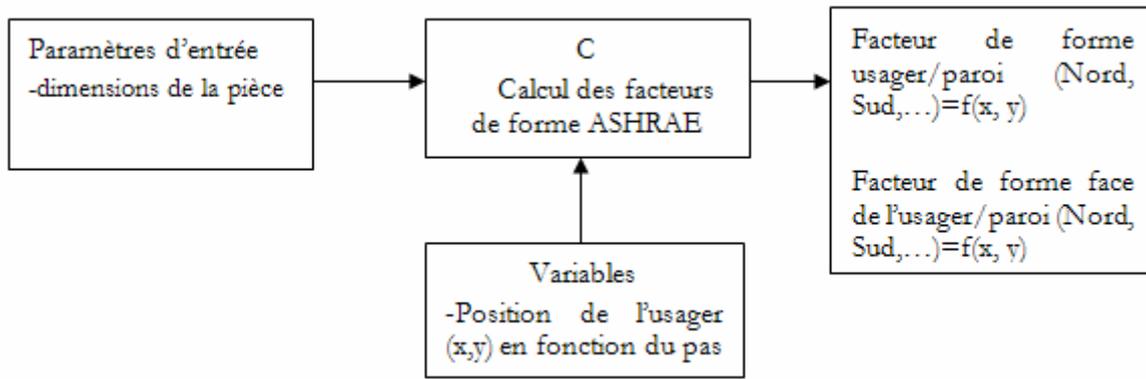


Figure 2-15: Module de calcul des facteurs de forme ASHRAE

Le module D calcule la température moyenne de rayonnement en fonction de la position de l'individu dans la pièce et des différents paramètres.

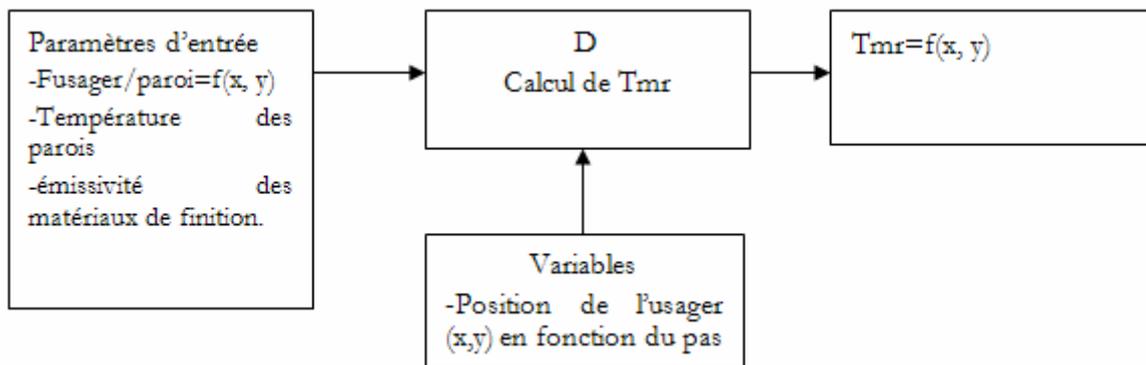


Figure 2-16: Module de calcul de la température moyenne radiante

Le module E calcul les asymétries de rayonnement en fonction de la position de l'individu dans la pièce et des différents paramètres.

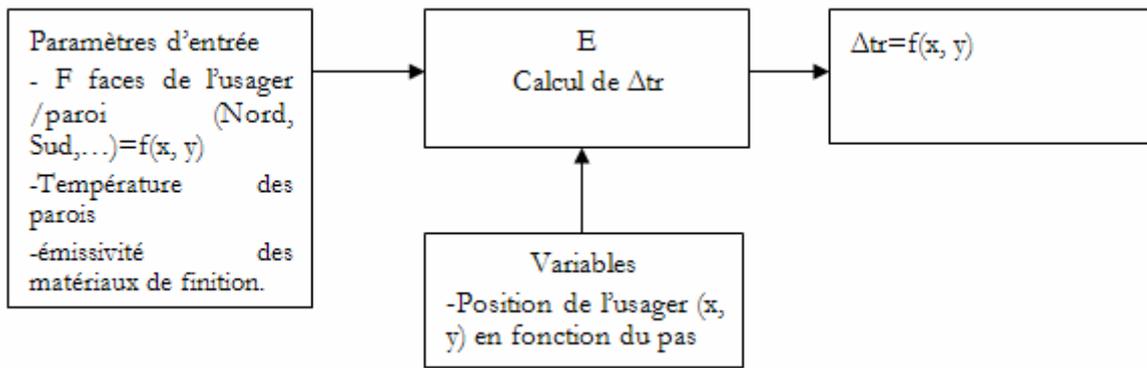


Figure 2-17: Module de calcul de l'écart de température

Le module F calcul le PMV et le PPD en fonction de la position de l'individu dans la pièce et des différents paramètres.

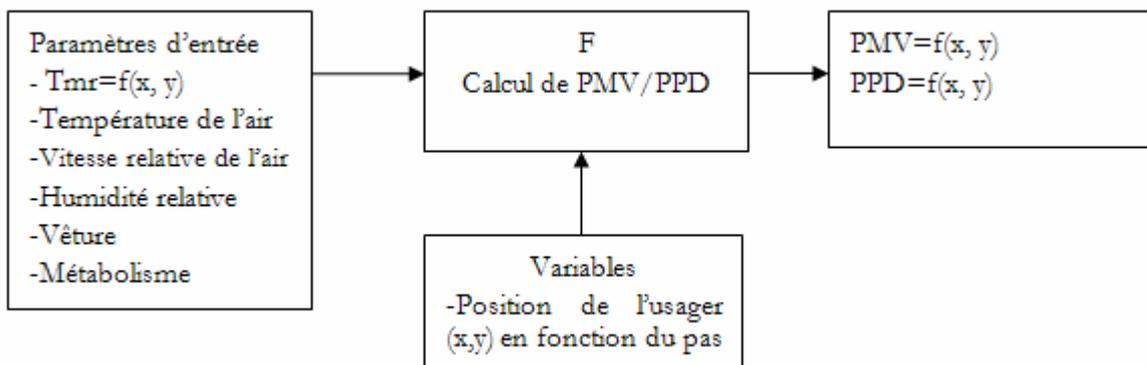


Figure 2-18: Module de calcul du PMV et du PPD

Le module G calcul les PIV et PIH en fonction de la position de l'individu dans la pièce et des différents paramètres.

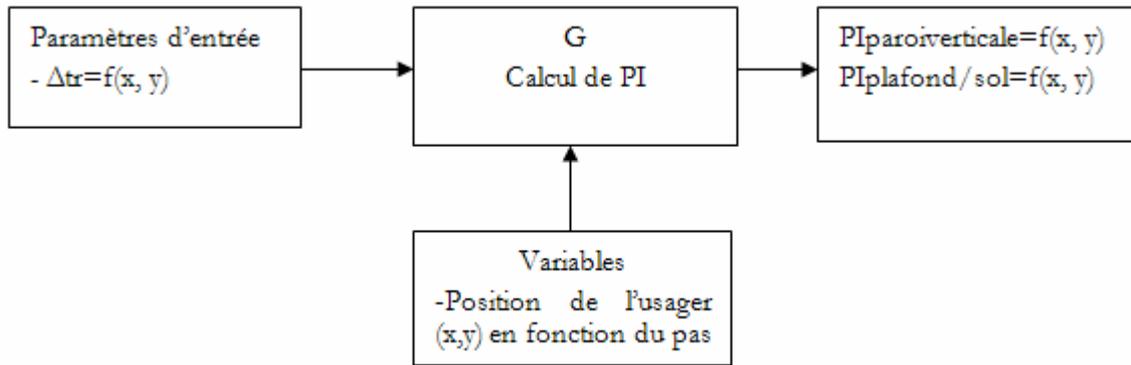


Figure 2-19: Module de calcul des PI

Les modules H et I affichent respectivement les résultats des modules F et G dans des fenêtres graphiques.

Cet outil de calcul a été effectué pour analyser les mesures in situ et en laboratoire et il est disponible pour n'importe quelle pièce en ayant les paramètres demandés dans le module A.(voir utilisation Annexe D)

2.5 Conclusion

En rappelant quelques propriétés thermo physiques du matériau bois, nous disposons de plusieurs modèles et indicateurs pour caractériser les échanges entre une finition en bois naturel et l'environnement intérieur d'une habitation. Le rôle de l'eau dans le bois est précisé ainsi que les phénomènes liés à l'hygroscopie.

Nous avons des résultats d'études bibliographiques sur les propriétés du bois comparées avec celles d'autres matériaux de construction, en particulier les matériaux de revêtement intérieur. En partant de ces travaux de recherches, nous avons les paramètres du bois qui ont une influence sur le confort thermique : taux d'humidité, température de surface, conductivité thermique, effusivité thermique, densité.

La caractérisation de l'influence du bois sur le confort thermique de l'occupant peut être envisagée en utilisant des indicateurs tels que le PMV et le PPD, dans la mesure où les

ambiances sont relativement homogènes et stables. Les caractérisations de l'influence du bois liée à l'humidité de l'air et de l'influence liée à des asymétries de rayonnement sont également quantifiables. Nous avons créé un outil de calcul sur matlab pour analyser les mesures. Nous proposons également d'utiliser un indice d'uniformité thermique de surface.

Par la suite, nous aurons recours à ces approches de la caractérisation des échanges thermo hygrométriques entre un revêtement en bois et l'environnement intérieur, notamment pour développer nos protocoles de mesures in situ et en laboratoire.

Chapitre 3 : Mesures in situ en France et à Madagascar

Pour évaluer l'impact thermique de différentes configurations de revêtement en bois, nous avons décidé de mener plusieurs campagnes de mesures in situ dans des habitations en France et à Madagascar.

Dans ce chapitre, après avoir présenté les principales caractéristiques climatiques et géographiques des deux pays, nous décrivons le protocole expérimental mis en œuvre. Les études de cas de chaque pays sont alors présentées. Nous analysons les données recueillies pour déterminer l'impact du bois sur les ambiances thermiques intérieures.

3.1 Principales caractéristiques climatiques et géographiques

La France est un état d'Europe occidentale et possède un climat tempéré, marqué par 4 saisons, et fortement influencé par l'océan atlantique. Madagascar, état insulaire d'Afrique, possède un climat subtropical fortement influencé par l'océan indien.

Les saisons dans l'hémisphère sud sont inversées par rapport aux saisons dans l'hémisphère nord. Ainsi l'été dans un hémisphère correspond à l'hiver dans l'autre hémisphère et le printemps dans un hémisphère correspond à l'automne dans l'autre hémisphère (figure 3-1).

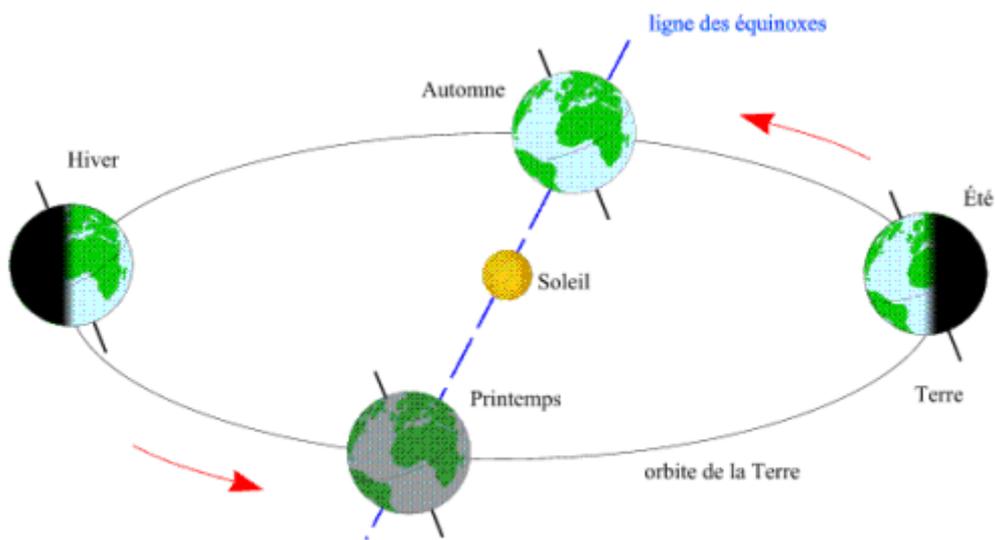


Figure 3-1 : Saisons dans l'hémisphère nord

Dans notre travail, nous avons cherché des habitations utilisant le bois en revêtement intérieur en France, dans la région lyonnaise, et à Madagascar, dans la région d'Antananarivo.

En France, la région lyonnaise est classée dans la zone d'été H1C par la réglementation thermique 2005. Il s'agit d'une zone relativement chaude par rapport aux autres zones d'été de la France (figure 3-2).

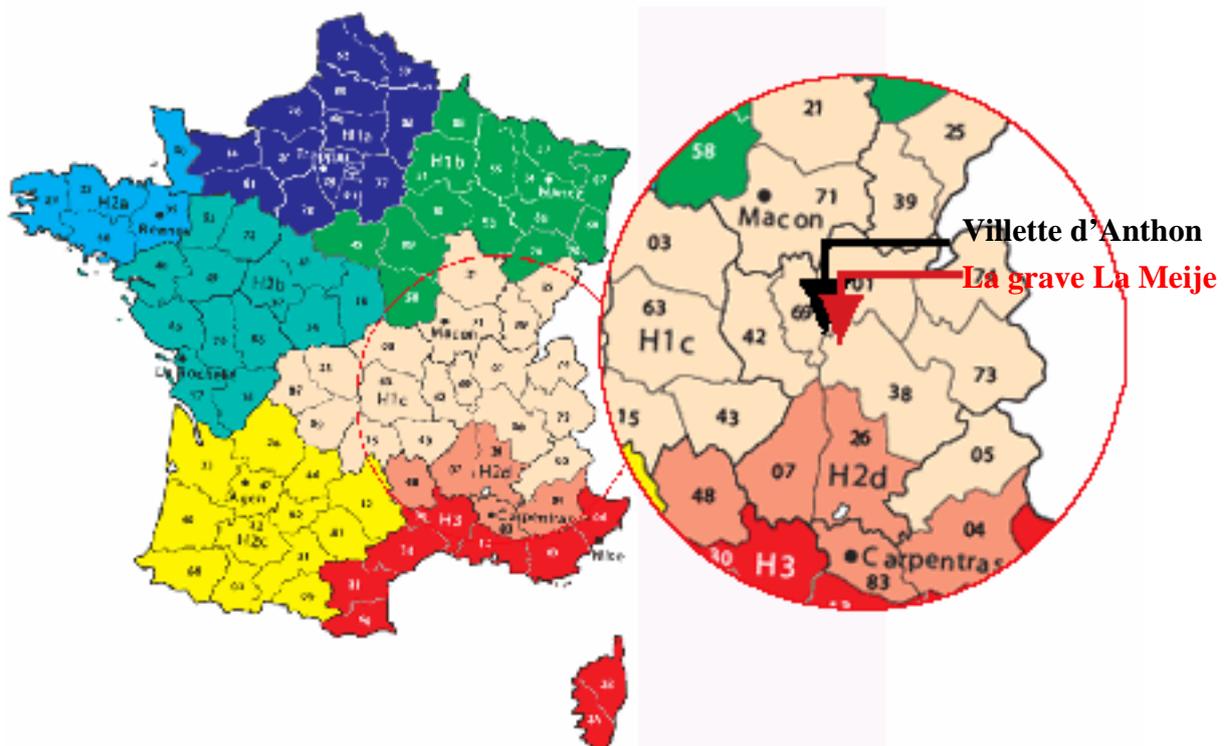


Figure 3-2: représentation de la zone climatique de la région Rhône-Alpes

La température moyenne quotidienne pour le jour chaud de base est de 24,5 °C avec un écart quotidien de 8°C.

A Madagascar, dans les Hautes Terres Centrales où se trouve Antananarivo, le climat est donc subtropical (figure 3-3). Avec la succession de massifs montagneux du Nord au Sud, les altitudes sont élevées et la température moyenne avoisinant 20°C. La pluviosité est relativement élevée (1500-2000 mm/an). Le climat se traduit par une grande différence de température entre le jour et la nuit.

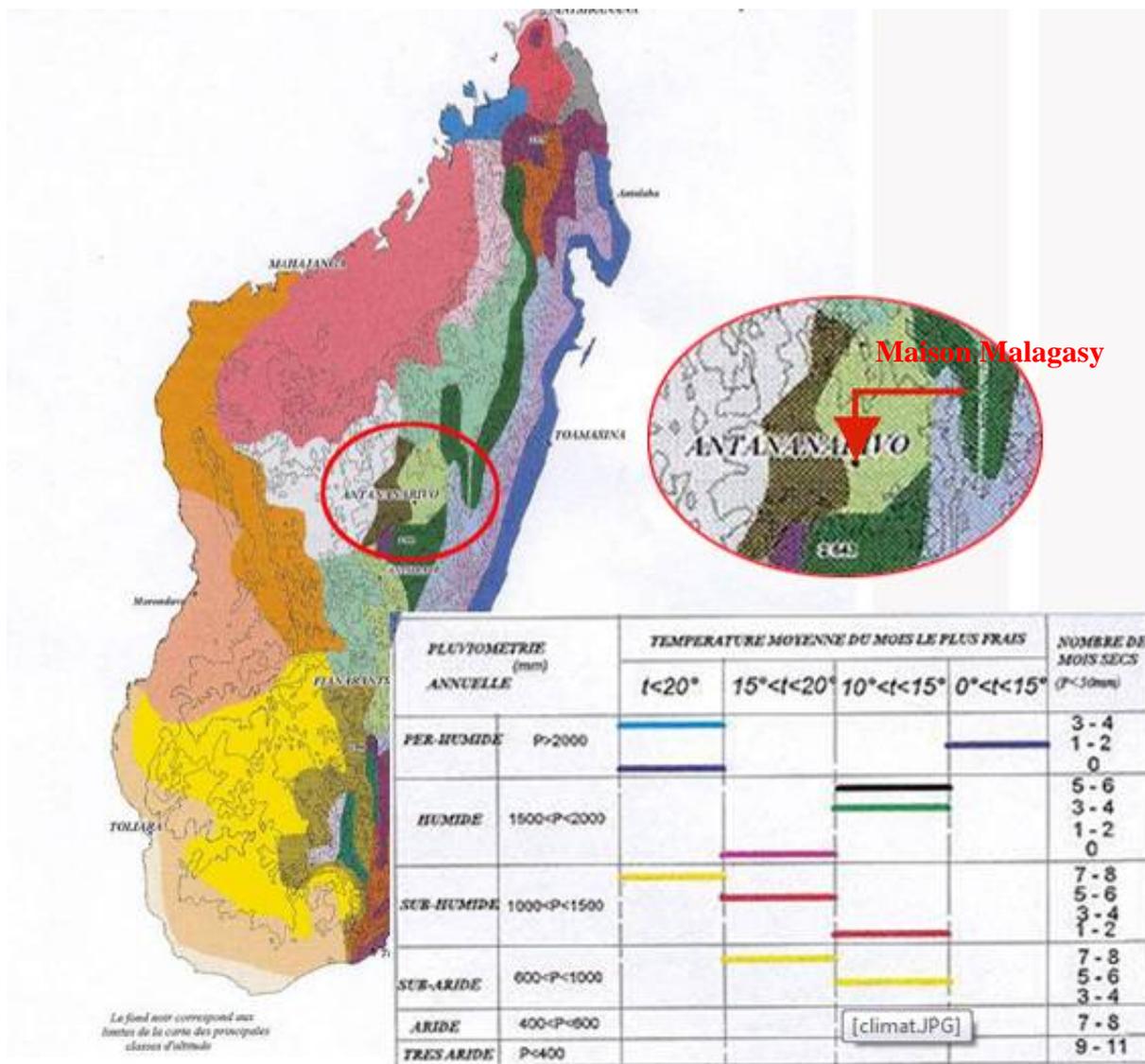


Figure 3-3: représentation de la zone climatique de la région d'Antananarivo

En utilisant la base des données météorologiques de Lyon et d'Antananarivo (données météo de l'ENTPE Vaulx en Velin et données Météo Ampandrianomby Antananarivo en 2005), nous avons effectué une comparaison des deux climats pour connaître les saisons pendant lesquelles il est possible de comparer les ambiances intérieures des maisons. Nous avons à notre disposition, pour l'année 2005, les mesures de l'irradiation globale horizontale, de la température sèche d'air, de l'humidité relative, de la précipitation et enfin de la vitesse du vent.

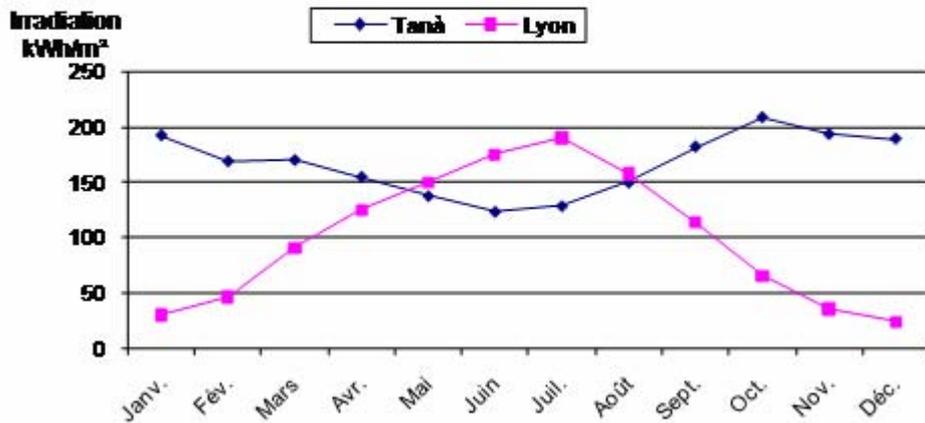


Figure 3-4 : comparaison de l'irradiation globale horizontale (année 2005)

La comparaison de l'irradiation globale horizontale montre un décalage de saison entre les deux régions (figure 3-4). Entre le mois de mars et le mois d'octobre, les irradiances globales horizontales dans les deux régions sont inversées. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 200 kWh/m² et les valeurs minimales entre 100 et 150 kWh/m² pour Antananarivo. Par contre pour la saison d'hiver française, l'ensoleillement baisse beaucoup plus entre Novembre et Mars où l'irradiation globale horizontale est inférieure à 30 kWh/m².

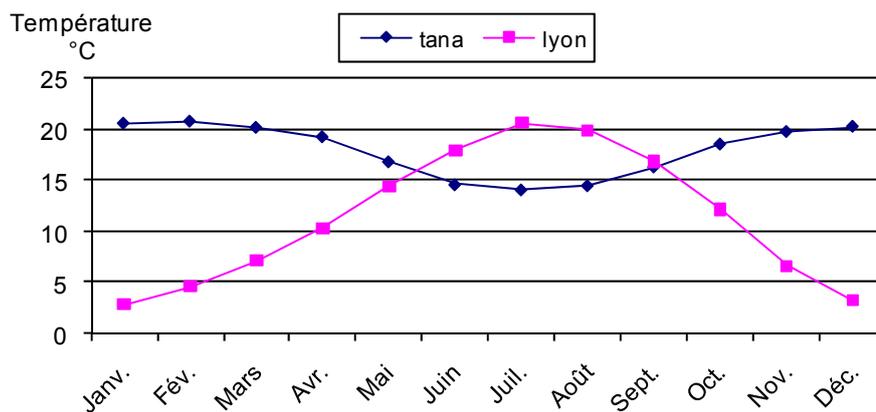


Figure 3-5 : comparaison de la température sèche d'air (année 2005)

En ce qui concerne la température, elles sont aussi inversées dans les deux régions en dehors de la période d'hiver français. Le maximum entre octobre et mars à Antananarivo correspond à la température moyenne à Lyon en juillet et août. La température minimale à Lyon descend jusqu'à 5°C alors que celle de Antananarivo ne descend pas en dessous de 12 à 15°C.

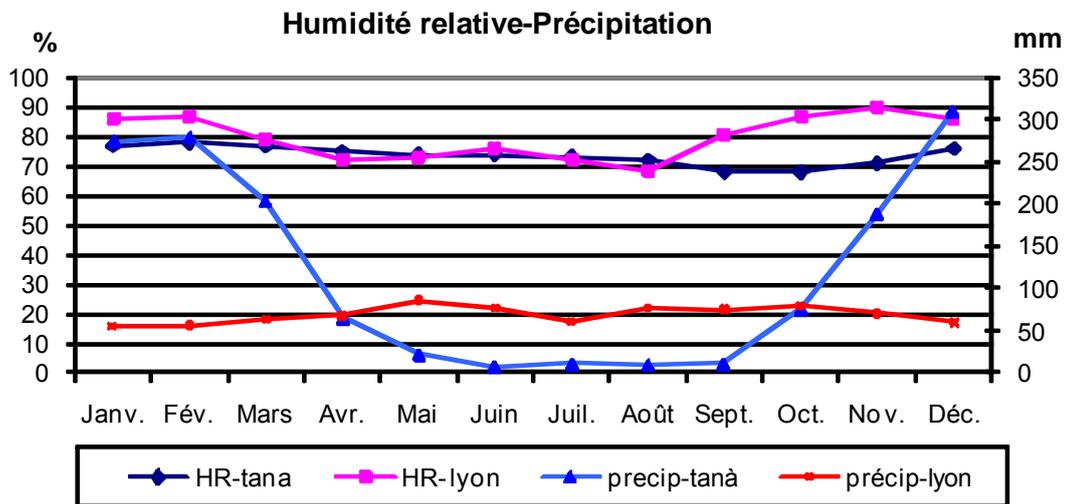


Figure 3-6 : précipitation et humidité relative (année 2005)

Les précipitations à Lyon et à Antananarivo sont complètement différentes au cours d'une année type comme l'indique la figure3-6.

Par contre, l'évolution de l'humidité relative a des valeurs très proches entre les deux régions en particulier entre les mois de mars et septembre. Après septembre, l'humidité relative à Lyon augmente plus que celle d'Antananarivo.

En ce qui concerne la vitesse du vent (figure 3-7) les deux régions ont des valeurs de vitesse inversées et elles sont comprises entre 2,5m/s et 3,7m/s. L'évolution de la vitesse du vent d'Antananarivo décale de 6mois celle de Lyon.

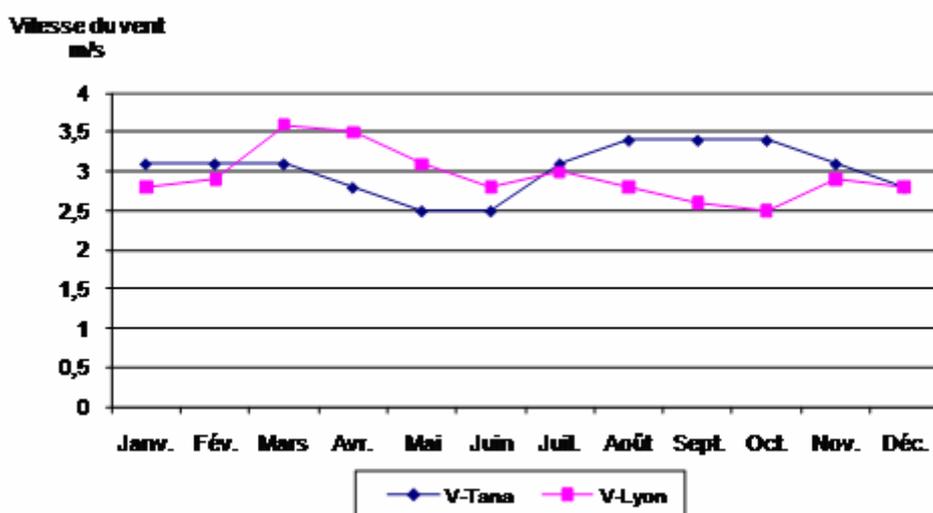


Figure 3-7: comparaison de la vitesse du vent

On peut tirer de ces constats, que notre travail de recherche sur les bâtiments de ces régions de France et de Madagascar se base sur des zones climatiques voisines lorsqu'on tient compte des périodes de Mars à Novembre en France puisque les périodes d'hiver de Novembre à Mars n'existent pas dans les climats à Madagascar. La saison d'hiver sera considérée seulement pour les bâtiments en France. Nous allons alors effectuer des études sur une même base de données météorologiques.

3.2 Présentation du protocole expérimental

Après plusieurs visites de bâtiments utilisant le bois en revêtement intérieur (voir chapitre 1), nous avons pu étudier trois maisons d'habitation, deux en France et une à Madagascar.

Nous avons demandé l'accord des occupants pour pouvoir disposer des locaux selon leur convenance. Pour chacune des habitations visitées, nous réalisons une description des locaux puis en parallèle, nous procédons aux mesures physiques. Nous effectuons des mesures en continu sur une durée de deux semaines en moyenne, que nous complétons par des mesures ponctuelles.

Nous avons pu effectuer des mesures in situ en France pendant le printemps (mai 2007 et avril 2008), un été (aout 2007) et un automne (novembre 2007) et hiver (Février 2008) A Madagascar, nous avons pu réaliser une campagne de mesures au printemps (avril 2008).

- Critères de sélection des locaux

L'échelle de notre étude est celle de la pièce d'habitation. Les études de cas sont donc choisies de façon à obtenir un échantillon hétérogène représentatif des pièces d'habitation contenant du bois en revêtement intérieur. Les critères de sélection pris en compte sont appréciables dans des maisons existantes en France et à Madagascar. Ils sont :

- Le site : urbain ou périurbain.
- Structure du bâtiment : béton, ossature en bois, maçonnerie de pierres ou de brique
- Revêtement intérieur : au moins une paroi couverte de bois naturel
- Mode de contrôle des ambiances intérieures : bâtiments à ventilation naturelle
- Occupation (fonction) des locaux : chambre, pièce principale ou pièce à vivre
- Zone géographique : Lyon, Antananarivo

- Mesures des ambiances et des surfaces intérieures

Les grandeurs physiques mesurées sont :

- Mesures en continu : température sèche de l'air [°C], température moyenne radiante [°C], humidité de l'air [%], CO₂ [ppm]
- Mesures ponctuelles : humidité des parois [%], température des parois [°C], température d'air [°C], humidité relative de l'air [%]

Les appareils de mesure sont :

- un thermomètre infrarouge Raytek. Il permet de mesurer la température des surfaces à partir du rayonnement infra rouge émis par les parois. Les six températures obtenues sur une orientation de paroi représentent la température de surface (figure 3-8).
- un analyseur Telaire 7001. C'est un appareil mobile qui permet une mesure ponctuelle ou séquentielle de la concentration de CO₂. Ils sont reliés à des enregistreurs HOBO pour effectuer des mesures en continu.

- un hygromètre Testo 606. C'est un appareil mobile qui permet de mesurer le degré d'humidité du bois et des matériaux de construction calibré sur une température du bois de 20°C.

Les capteurs enregistreurs HOBO sont laissés sur place à l'intérieur des pièces étudiées, et à l'extérieur de l'habitation (orienté sud et nord). Nous disposons de :

- 10 capteurs HOBO U12-012 pour mesurer l'humidité relative de l'air, la température, l'éclairement des pièces
- 4 capteurs HOBO pro V2 U23-001 pour mesurer l'humidité relative extérieure et la température extérieure.

Les mesures des paramètres de confort thermique (vitesse d'air, température opérative, température sèche de l'air et humidité relative) sont effectuées avec une station VIVO (Figure 3-8).

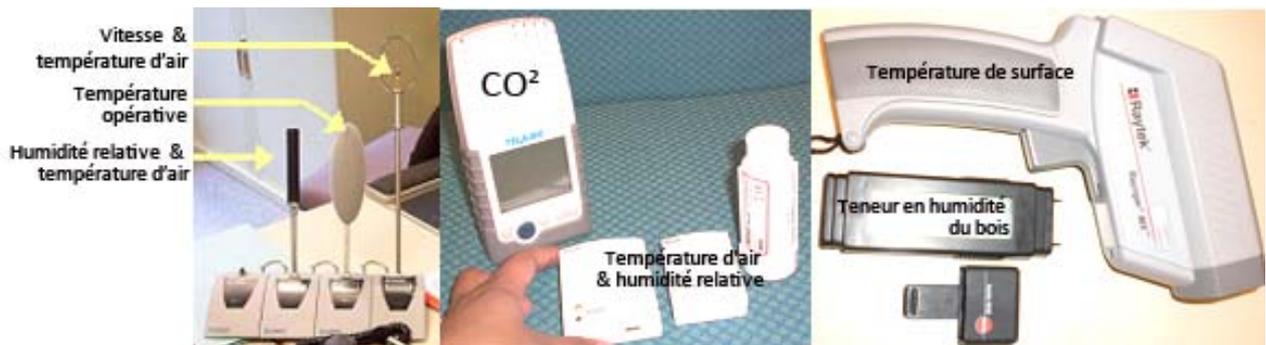


Figure 3-8 : Matériels de mesure utilisés

- Procédures et emplacements des matériels

Le premier jour de chaque campagne de mesures, nous plaçons 2 capteurs enregistreurs au moins dans chaque pièce étudiée, en des endroits représentatifs du milieu (par trop près des sources de chaleur ou de fraîcheur, ou source d'humidité...). Ils sont attachés ou collés avec des adhésifs double-face sur un meuble pour éviter que les occupants les déplacent lors de leurs activités dans la pièce. Ces dispositions sont préconisées dans la norme ISO 7726 sur les instruments de mesures des grandeurs physiques.

A chaque visite, nous effectuons des mesures ponctuelles et décrivons les locaux (photographies, dimensions, questionnaire auprès des occupants). En ce qui concerne

les capteurs ponctuels, les mesures sont faites systématiquement à chaque visite sur chaque paroi des pièces (plancher, plafond, et murs).

Les points de mesures sont situés sur chaque paroi, en des lieux les plus représentatifs du revêtement de surface (figure 3-9). Chaque paroi revêtue du même matériau comporte 6 points de mesure. Une même paroi revêtue de matériaux différents aura 8 points de mesure comme le montre l'exemple du mur Est sur la figure 3-9.

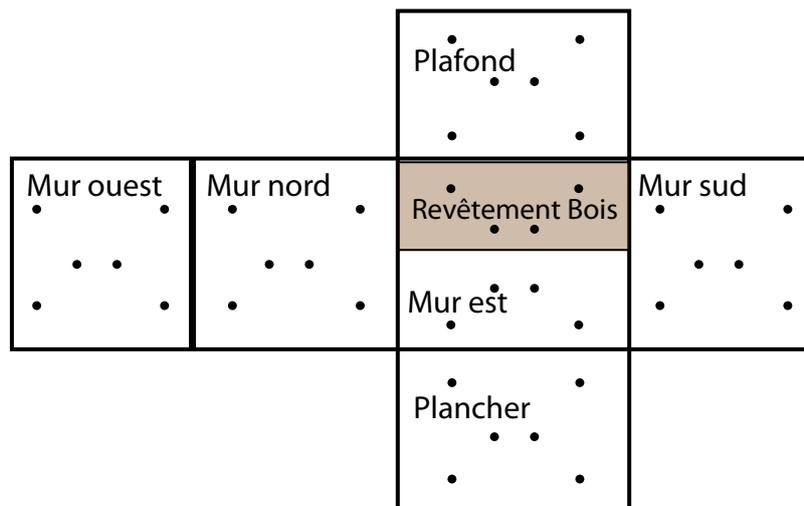


Figure 3-9 : Points de mesure d'une pièce, les revêtements en bois sont représentés en grisé.

Selon l'orientation de l'étude de cas, les murs d'une pièce sont nommés mur Nord (N), Sud (S), Est (E), Ouest (O) ou Nord-Est (NE), Nord-ouest (NO), Sud-Est (SE), Sud-ouest (SO), Plafond (Pf), Plancher (Pr).

3.3 Etudes de cas en France

3.3.1 Cas de la maison La Grave (G)

Le premier ensemble de pièces étudiées se situe en France, dans une maison en maçonnerie de pierres, rénovée en 2005. C'est une maison située aux Fréaux, La Grave-La Meije, en Isère (latitude 45°2N, longitude 6°17E, climat de montagne sous influence méditerranéenne).

Les travaux de rénovation réalisés concernent l'amélioration de l'enveloppe extérieure, la mise en place d'isolation, la mise en place d'un revêtement intérieur en bois fixé sur des

montants en bois, des ouvertures vitrées avec menuiseries en bois. L'ossature intérieure est en rondins de bois. Cette maison à usage d'habitation s'élève sur deux niveaux avec des combles aménagés. Les géométries irrégulières en plan et les variations d'épaisseur de murs ont été ajustées pour que les revêtements intérieurs soient horizontaux et verticaux. C'est une habitation secondaire d'une famille de quatre personnes. La façade sud présente une baie vitrée, menuiserie bois, ajoutée lors de la réhabilitation (figure 3-10).

Trois pièces dans cette habitation ont été sélectionnées de façon à obtenir un échantillon représentatif des pièces d'habitation contenant du bois en revêtement intérieur (figure 3-11).

Les murs extérieurs de la maison sont tous en maçonnerie de pierres d'épaisseur variables (45 à 90 cm) doublés par une isolation en fibre de bois de 15 cm avec une lame d'air et un revêtement en bardage bois de 2 cm. Les séparations sont des cloisons en bois isolées par de la fibre de bois.

Le renouvellement d'air s'effectue par ventilation naturelle (ouverture de fenêtres). Le chauffage du bâtiment est un plancher chauffant sur le niveau du rez-de-chaussée : ce système de chauffage électrique peut être commandé pour préchauffer la maison deux heures avant chaque occupation. La maison dispose aussi d'une poêle à bois pour chauffer l'intérieur pendant l'occupation. Une fiche technique fournit un récapitulatif des principales caractéristiques de cette habitation. (figure 3-10).

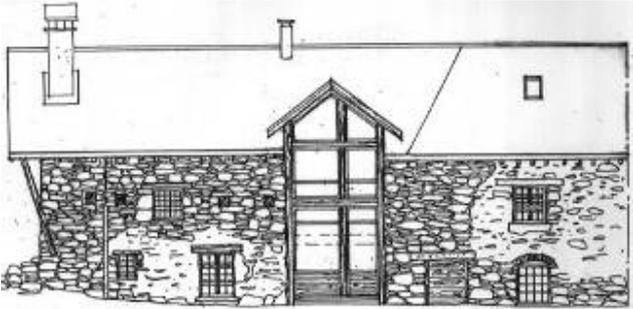
Nom : LA GRAVE		Situation	La Grave – La Meije
	Coordonnées géographiques	latitude 45°2N, longitude 6°17E	
	Usage	Habitation	
	Adresse	Hameaux des Fréaux	
	Année de construction	Avant 1900	
	Année de rénovation	2005	
	Surface [m ²]	66.21	
	Nombre de niveaux	3	
	Nombre de pièces	6	
	Structure extérieure	pierres	
	Toiture	tuiles	
	Type de chauffage	Poêle à bois	
	Renouvellement d'air	Ouverture de fenêtres	
Type d'isolation	Laine de bois		
Orientation façade	Sud		
Présence de bois	Revêtement intérieur, menuiserie		

Figure 3-10 : Fiche technique de la maison La Grave (G)

Le local N°1 (G1) est une chambre occupée par deux personnes. Il est situé au rez-de-chaussée au-dessus d'un rez-de-jardin non chauffé. Il est composé de murs de hauteur constante de 2,25m. Les murs Sud et Ouest donnent sur l'extérieur. Au Nord et à l'Est il y a des cloisons mitoyennes avec d'autres locaux intérieurs.



Figure 3-11 : plan représentant les trois pièces étudiées (G1, G2, G3)

		Orientation	Surface [m ²]	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
						fenêtres	portes
G1		Nord (N)	7,87	pin	intérieur		1 : bois
		Sud (S)	7,87	pin	extérieur	1	
		Est (E)	6,07	pin	intérieur		
		Ouest (O)	6,07	pin	extérieur		
		Plancher (Pr)	9,45	mélèze	non chauffé		
		Plafond (Pd)	9,45	panneaux particules	intérieur		

Tableau 3-1 Description du local n°1 (G1)

Le local N°2 (G2) est aussi une chambre située dans les combles et occupée par deux personnes. Les murs Est et Ouest ont une hauteur variable en raison de la pente de la toiture (70%). Au Nord, le mur a une hauteur de 30 cm, enfin le mur sud a une hauteur normale de 2,55m. G2 appartient au comble, la couverture est composée d'un plafond bois, d'une isolation en ouate de cellulose, d'une lame d'air et de tuiles en aggloméré.

G2		Orientation	Surface [m ²]	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
						fenêtres	portes
		Nord (N)	1,05	pin	intérieur		
		Sud (S)	6,865	pin	extérieur	1	
		Est (E)	3,23	pin	intérieur		
		Ouest(O)	8,23	pin	extérieur		1 : bois
		Plancher (Pr)	14	mélèze	non chauffé		
Plafond (Pd)	19,915	pin	intérieur	1			

Tableau 3-2 : Description du local n°2 (G2)

En ce qui concerne le local N°3 (G3), il s'agit d'une salle d'eau, faisant partie des pièces communes de l'habitation. Elle est située au rez-de-chaussée, séparée de G1 par une cloison. Il existe un chauffage basse température (sèche serviette) dans G3.

G3		Orientation	Surface [m ²]	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
						fenêtres	portes
		Nord (N)	5	pin	intérieur		1 : bois
		Sud (S)	5	pin	extérieur	1	
		Est (E)	4,275	pin	intérieur		
		Ouest (O)	4,275	pin	extérieur		
		Plancher (Pr)	9,45	mélèze	non chauffé		
Plafond (Pd)	9,45	Panneaux de particules	intérieur				

Tableau 3-3 : Description du local n°3(G3)

Le plancher en G1 et G3 est un plancher chauffant revêtu de bois, le plancher haut est composé de panneaux de particules sur rondins de bois, isolation en fibre de bois. Le comble a aussi un plancher bois.

Les types de bois sont :

- le mélèze en revêtement de plancher et de mur. Sa masse volumique est de 600kg/m^3 .
- le pin, résineux abondant en France et dans les pays européens. Sa masse volumique est de 550kg/m^3 à 15% d'humidité.

Ils sont tous deux classés dans les bois mi-lourds, avec une conductivité thermique de 0,15 W/m.K et un facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau à sec de 50 et humide de 20. [Ngohe-Ekam, et al., 2006, Wang, et al., 2004].

3.3.2 Cas de la maison La Vilette (V)

Le deuxième ensemble de pièces étudiées se situe en France, dans l'extension d'une maison individuelle en ossature bois. Respectant la continuité de la toiture existante, cette extension vient surtout animer les façades Sud et Ouest de la maison. Débord de toit compris, l'extension s'implante au plus près de la distance réglementaire par rapport à la limite séparative (4,10 m au minimum) afin de pouvoir créer des ouvertures.

La maison est construite sur le principe du mur de béton avec une isolation intérieure, le chauffage est électrique. La couverture est en tuile romane.

La partie de la maison qui nous intéresse est l'extension. Elle se compose d'une véranda s'ouvrant sur le Sud complétée par un volume hexagonal en sailli à l'ouest, puis d'une chambre, d'un dressing, d'une salle de bains et d'une buanderie.

Cette extension est réalisée en ossature bois habillée d'un bardage en bois extérieur et intérieur (essence : mélèze naturel traité autoclave). La continuité avec la toiture existante est assurée avec le même type de tuile. Les nouveaux volets sont quant à eux soit coulissants, soit battants (en Z) de la même teinte que ceux de la maison existante.

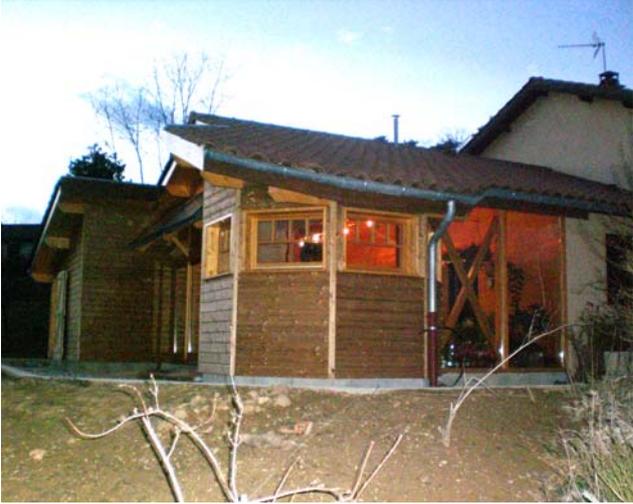
Nom : VILLETTE	Situation	Villette d'Anthon
	Coordonnées géographiques	latitude 45°2N, longitude 6°17E
	Usage	Habitation
	Adresse	52, rue des Pins 38280
	Année de construction	
	Année de rénovation	2005
	Surface [m ²]	
	Nombre de niveaux	2
	Nombre de pièces	7
	Structure extérieure	Béton+extension ossature bois
	Toiture	Tuiles romanes
	Type de chauffage	Poêle à bois
	Renouvellement d'air	Ouverture de fenêtres
Type d'isolation	Laine de bois	
Orientation façade	Sud	
Présence de bois	Revêtement intérieur, menuiserie	

Figure 3-12 : Fiche technique de la Maison La Villette (V)

Le local n°1 (V1) de cette maison est la véranda en communication au nord avec le séjour et la cuisine par une porte. Il s'agit d'un mur intérieur en aggloméré de béton et revêtu du côté véranda par un bardage en bois naturel. Le mur de séparation avec la chambre et la salle de bain a une ossature bois et est revêtu avec du mélèze naturel. Cette pièce contient une partie étendue sur un hexagone délimité à l'extérieur par un mur à ossature bois avec un bardage intérieur et extérieur en mélèze naturel. La façade sud est une paroi vitrée avec une structure



*Figure 3-14 : Partie de la façade vitrée sud, mur ouest et plafond de la véranda –
Partie hexagonale de la véranda (V1)*



Figure 3-15 : intérieur de la chambre : ouverture sur la véranda (à gauche) et partie sud-ouest (à droite)(V2)

Le local n°3 (V3) est la salle de bain. Les murs extérieurs ont une ossature bois avec revêtement intérieur en carrelage et extérieur en bardage de mélèze naturel. La cloison adjacente à la chambre est revêtue de carrelage. Seul le mur adjacent à la véranda est revêtu de bois. Le sol est en carrelage et le plafond en mélèze naturel.



Figure 3-16 : la salle de bain (V3)



Figure 3-17 : la buanderie (V4)

Nous avons effectué des mesures à l'intérieur de la buanderie V4 (figure 3-17) à la demande des propriétaires pour connaître l'évolution de l'humidité intérieure. C'est la continuité de la salle de bain V3 (figure 3-16) dans l'extension mais il n'y a pas de communication directe entre la salle de bain et la buanderie. La porte qui mène à la buanderie V4 est du côté du salon (voir figure 3-11). Les murs sont revêtus par un bardage en mélèze sauf celui adjacent à la salle de bain qui est lui, enduit de mortier et peint. Une autre porte en bois mène à l'extérieur. Le plancher et le plafond sont les mêmes que ceux des autres pièces de l'extension : plancher en carrelage et plafond en mélèze.

La figure 3-18 présente la part, en pourcentage, de la surface occupée par le bois en revêtement intérieur dans les 7 pièces étudiées. Le bois revêt une surface importante. Le pourcentage de bois varie de 50,87% des parois intérieures dans le local V4, à 81,88% dans le local G2. Nous avons la part du bois, la part des autres matériaux de revêtement et celle des ouvertures telles que les portes et les fenêtres.

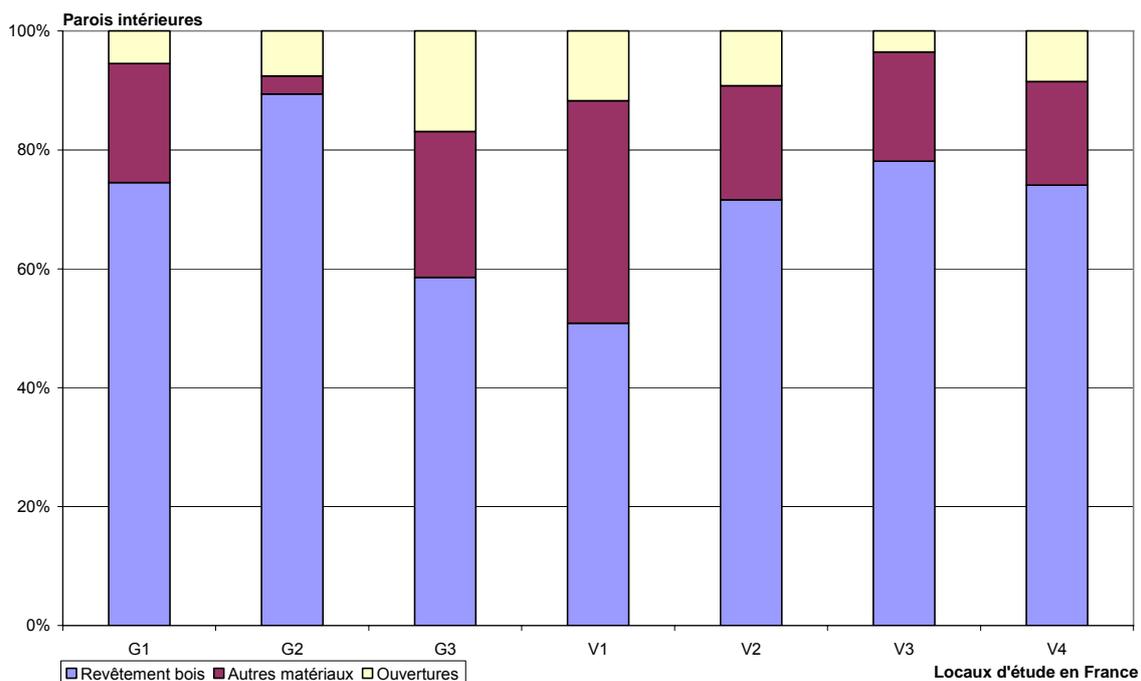


Figure 3-18 : Présence de revêtement en bois dans les études de cas en France

Le tableau 3-4 donne les valeurs de surfaces et de revêtements de parois intérieures. Nous avons le ratio de bois présent par rapport à la surface totale ainsi que la part en bois léger ou bois lourd par rapport à la surface en bois dans la pièce.

France	G1	G2	G3	V1	V2	V3	V4
Sol [m ²]	9,45	14,00	4,48	34,70	14,10	14,20	7,00
Parois[m ²]	46,71	53,29	20,86	168,19	73,45	77,19	40,13
Ouvertures[m ²]	2,55	4,02	3,53	19,68	6,76	2,72	3,40
Bois [m ²]	34,80	47,65	12,22	85,55	52,59	60,27	29,73
Ratio bois[%]	74,50	81,88	58,56	50,87	71,60	78,08	74,08
Autres [m ²]	9,36	1,62	5,12	62,96	14,10	14,20	7,00
ratio autres[%]	25,50	18,12	41,44	49,13	28,40	21,92	25,92
Occupants	2,00	2,00	0,00	4,00	1,00		
Niveau	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nbre Murs ext	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	2,00
Bois légers [%]	80,18	70,62	63,30	0,00	0,00	0,00	0,00
Bois lourd[%]	19,82	29,38	36,70	100,00	100,00	100,00	100,00

Tableau 3-4 : Caractéristiques des 7 études de cas françaises

La quantité importante de bois présente justifie notre choix sur ces locaux pour effectuer nos mesures in situ.

3.4 Etudes de cas à Madagascar

Le troisième ensemble de pièces étudiées se situe à Madagascar, dans une maison Malagasy (M) située à Ambatoroka, sur le versant Est de la colline d'Andohalo (La haute), appartenant à la ville d'Antananarivo. Le quartier s'appelle Tsiadana.

Nom : MALAGASY	Situation	Madagascar
	Coordonnées géographiques	latitude 18°55S, longitude 47°31E
	Usage	Habitation
	Adresse	VA26KA Tsiadana 101 Antananarivo
	Année de construction	2001
	Surface [m ²]	195
	Nombre de niveaux	3
	Nombre de pièces	16
	Structure extérieure	Maçonnerie de briques
	Toiture	Tuiles en terre cuite
	Renouvellement d'air	Ouverture de fenêtres
Orientation façade	Ouest	
Présence de bois	Revêtement intérieur, charpente, menuiserie	

Figure 3-19 fiche technique maison Malagasy (M)

La façade principale est orientée vers l'ouest : elle est caractérisée par une loggia au premier étage, un haut pignon à deux pentes accentuées, et au rez-de-chaussée, une toiture qui protège du soleil l'après-midi.

C'est une maison en brique sur trois niveaux dont un comble est aménagé, avec une toiture en tuiles. L'architecture extérieure s'est inspirée des formes d'architecture traditionnelle. Elle a été construite en 1997. Actuellement, les trois niveaux (appartements) sont occupés par trois familles différentes. Nous avons eu l'accord des habitants du rez-de-chaussée et du comble aménagé pour effectuer nos mesures.

Les locaux sont choisis de façon à obtenir un échantillon représentatif des pièces d'habitation des Tananariviens.

La description des études de cas concerne la situation géographique du milieu, l'enveloppe extérieure, la composition des murs, les matériaux des revêtements intérieurs, et les menuiseries des ouvertures dans chaque local.



Figure 3-20 : plan du niveau 3 de la maison M (M1, M2, M3, M4)

Les trois premiers locaux sont sur le niveau comble aménagé (niveau 3) : M1, M2, M3. Le local n°1 (M1) est une chambre rectangulaire de 31,24 m² de surface, située sur le côté de la façade Nord. Le plafond et le plancher sont en bois ainsi que tous les meubles de la pièce. Le bois du plancher est de couleur sombre, c'est du palissandre (bois tropical dense) et est ciré régulièrement chaque mois. Pour le plafond, il s'agit de sapin huilé.

M1		Orientation	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
					fenêtres	portes
		Nord (N)	brique	extérieur	1	
		Sud (S)	Brique	intérieur		1
		Est (E)	Brique	intérieur		
		Ouest (O)		intérieur		
		Plancher (Pr)	palissandre	intérieur		
Plafond (Pd)	Bois : sapin	extérieur				

Tableau 3-5 Description du local n°1(M1)

Le local n°2 (M2) est un living utilisé comme salon avec un coin repas. Comme pour la chambre, le plancher est en palissandre ciré et le plafond est en sapin huilé. La pièce est rectangulaire de 43,33m² de surface. Ce local est situé à l'intersection des façades ouest nord et sud.

M2		Orientation	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
					fenêtres	portes
		Nord (N)	Brique	extérieur		
		Sud (S)	Brique	extérieur	1	
		Est (E)	Brique	intérieur		1
		Ouest (O)	Brique	extérieur	2	
		Plancher (Pr)	Bois : palissandre	intérieur		
Plafond (Pd)	Bois : sapin					

Tableau 3-6 Description du local n°2(M2)

Le local n°3 (M3) est la cuisine du comble aménagé. Elle fait 19,85 m² et est située sur la façade Est de la maison. Le plancher et le plafond sont en bois, identiques à M1 et M2.

	Orientation	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
				fenêtres	portes
M3	Nord (N)	Bois : sapin	intérieur		1
	Sud (S)	Brique	intérieur		1
	Est (E)	Brique	extérieur	1	
	Ouest (O)	Brique	intérieur		1
	Plancher (Pr)	Bois : palissandre	intérieur		
	Plafond (Pd)	Bois : sapin	extérieur		
					

Tableau 3-7 Description du local n°3(M3)

Les quatre autres locaux appartiennent au rez-de-chaussée (niveau 1) :

Le local n°4 (M4) est une chambre de 10,68m². Cette pièce est située au rez-de chaussée et donne sur l'extérieur sur le côté nord et Est. Le plancher et plafond sont en bois palissandre et les murs en brique comme la plupart des murs de la maison. M4 est représenté par la pièce nommé CH3 sur le plan de la figure 3-21.

Le local n°5 (M5) est un séjour composé d'un espace salon et d'un coin repas sur une surface de 61,10m². Le plancher est revêtu d'un parquet en bois tandis que les murs sont en brique enduit de plâtre ainsi que le plafond. Cette espace est sur la façade principale ouest et donne sur une terrasse (couverte par une toiture extérieure). L'autre côté de la pièce est sur la façade nord de la maison. Les deux côtés restants sont des murs intérieurs.

M4		Orientation	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
					fenêtres	portes
		Nord (N)	Brique	extérieur	1	1
		Sud (S)	Brique	intérieur		1
		Est (E)	Brique	extérieur	1	
		Ouest (O)	Brique	intérieur		
		Plancher (Pr)	Bois palissandre	intérieur		
Plafond (Pd)	Bois palissandre	extérieur				

Tableau 3-8 Description du local n°4(M4)



Figure 3-21 : niveau rez-de-chaussée (M4, M5, M6, M7)

M5		Orientation	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
					fenêtres	portes
		Nord (N)	Brique	extérieur	3	1
		Sud (S)	Brique	intérieur	1 ext	
		Est (E)	brique	intérieur		1
		Ouest (O)	brique	extérieur	1	1
		Plancher (Pr)	Bois : palissandre	sol		
Plafond (Pd)	plâtre	intérieur				

Tableau 3-9 : Description du local n°5(M5)

Le local n°6 est une chambre sur la façade ouest sans la couverture de la terrasse. Sa surface est de 14,72 m². Le plancher et le plafond sont en palissandre : celui du plancher est ciré et le plafond est en bois naturel.

M6		Orientation	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
					fenêtres	portes
		Nord (N)	Brique	intérieur		
		Sud (S)	Brique	extérieur	1	
		Est (E)	Brique	intérieur		1
		Ouest (O)	brique	extérieur	1	
		Plancher (Pr)	Bois : Palissandre	sol		
Plafond (Pd)	Bois : Palissandre	intérieur				

Tableau 3-10 : Description du local n°6(M6)

M7		Orientation	Matériaux revêtement traitement	Milieu adjacent	Nombres d'ouvertures	
					fenêtres	portes
		Nord (N)	brique	intérieur		1
		Sud (S)	Brique	intérieur		1
		Est (E)	Brique	extérieur	1	
		Ouest (O)	Brique	intérieur		2
		Plancher (Pr)	Carrelage	sol		
Plafond (Pd)	Bois : palissandre	intérieur				

Tableau 3-11 : Description du local n°7(M7)

La figure 3-22 présente la part de surface revêtue en bois dans les locaux de la maison malgache.

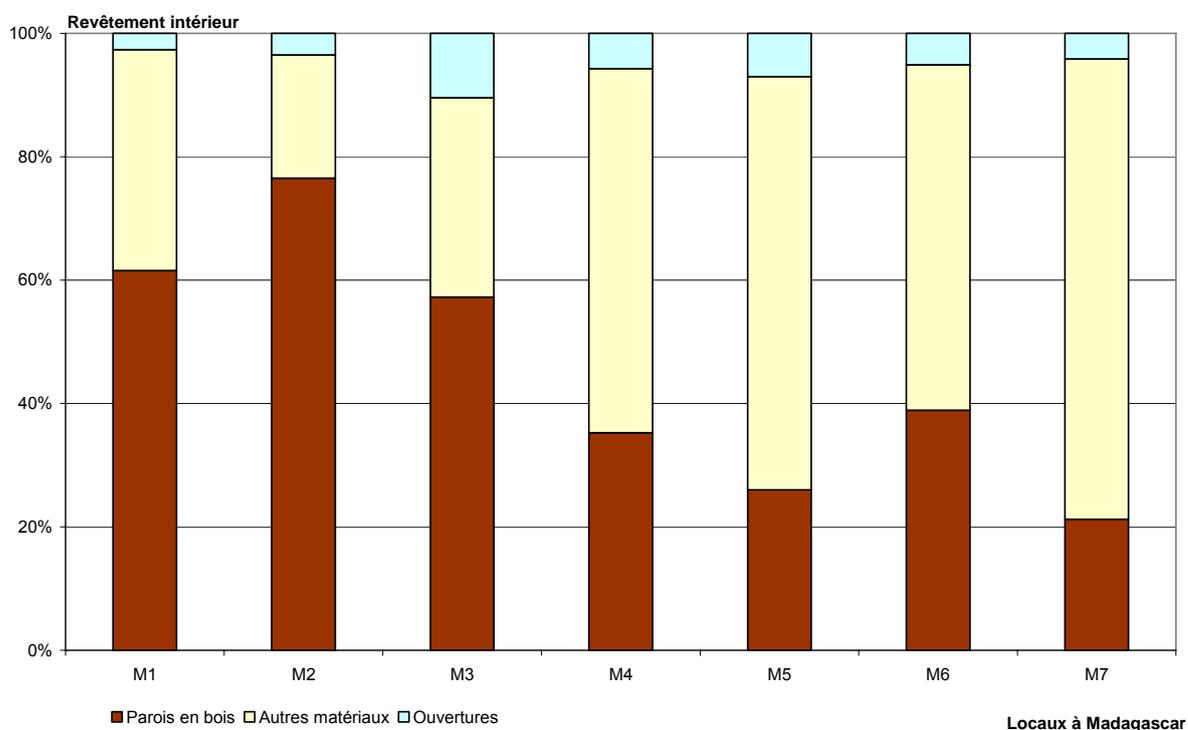


Figure 3-22 : Présence de revêtement en bois dans les locaux d'étude malgaches

Le tableau 3-12 fournit la valeur des surfaces et des revêtements de parois intérieures. Nous avons le ratio de bois présent par rapport à la surface totale ainsi que la part en bois léger ou bois lourd par rapport à la surface en bois dans un local.

MADAGASCAR	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Sol [m ²]	30,11	51,82	19,85	10,68	55,74	14,72	19,85
Parois[m ²]	118,14	163,43	83,71	60,59	214,35	75,64	93,39
Ouvertures[m ²]	3,10	5,70	8,71	3,46	15,08	3,86	3,86
Bois [m ²]	72,70	125,10	47,91	21,35	55,74	29,44	19,85
Ratio bois[%]	61,54	76,55	57,23	35,24	26,00	38,92	21,25
Autres [m ²]	42,34	32,63	27,09	35,78	143,53	42,34	69,69
ratio autres[%]	38,46	23,45	42,77	64,76	74,00	61,08	78,75
Occupants	3,00	3,00	3,00	1,00	3,00	2,00	3,00
Niveau	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nbre Murs ext	1,00	3,00	1,00	2,00	2,00	2,00	1,00
Bois légers [%]	58,58	58,58	58,58	0,00	0,00	0,00	0,00
Bois lourd[%]	41,42	41,42	41,42	100,00	100,00	100,00	100,00

Tableau 3-12 : Caractéristiques des 7 études de cas malgaches

Nous avons ainsi effectué des campagnes de mesures in situ dans 14 pièces d'habitation, 7 en France dans la région lyonnaise et 7 à Madagascar dans la région d'Antananarivo.

En France, les mesures ont été faite avec trois études de cas dans une maison dite La Grave (G1, G2 et G3), et avec quatre études de cas dans une maison dite La Vilette (V1, V2, V3, et V4).

A Madagascar, les mesures ont été faites dans 7 pièces situées dans une maison dite Malagasy (M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7).

3.5 Données recueillies lors des mesures in situ

3.5.1 Données issues des mesures en continu

Ne pouvant pas présenter toutes les données recueillies lors des campagnes de mesures in situ dans les 14 études de cas, nous avons choisi de présenter ici un extrait des données recueillies.

Pour la maison La Grave (G), nous constatons un retard de 2 heures environ pour le minimum de la température intérieure par rapport à l'extérieur pour chaque saison considérée. Nous

avons représenté dans la figure 3-23, deux jour-type pour observer ces retards. Il s'agit d'une réponse favorisant le confort de l'occupant parce que l'ambiance intérieure n'a pas le temps d'atteindre les extrémités pour se stabiliser autour d'une valeur de température. Cette réponse est fonction de l'enveloppe y compris le revêtement intérieur, du climat extérieur et des équipements de chauffage mis en marche (absence ou présence des occupants)

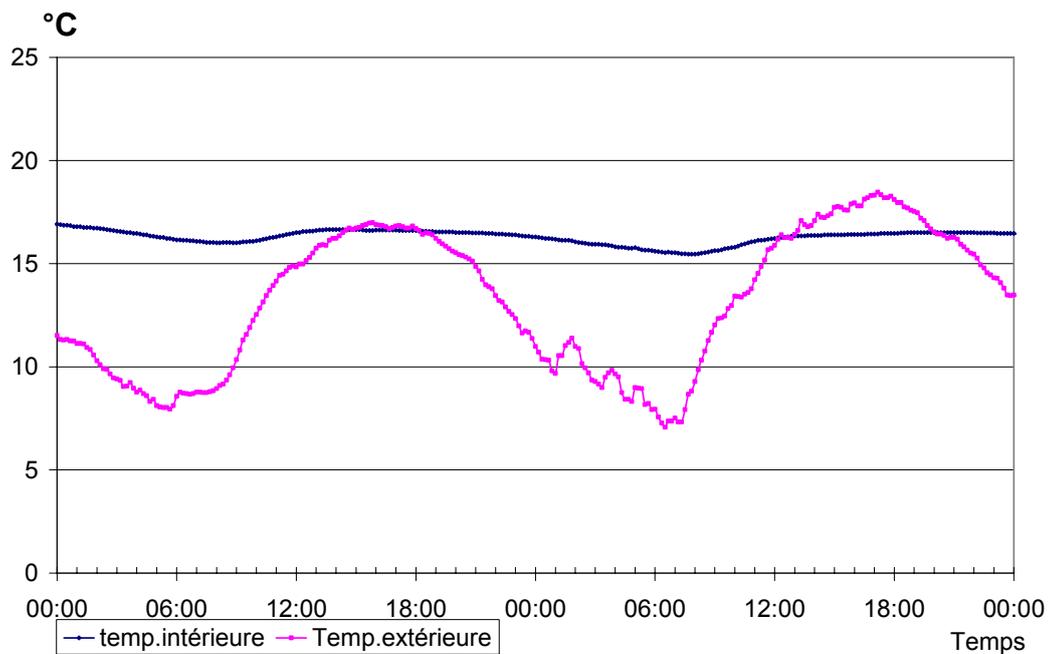


Figure 3-23 : Variations des températures extérieures et intérieures sur 2 jours
(G2 : 09/05/2007 au 11/05/2007)

Nous séparons les données en température du jour et de la nuit en précisant les températures minimum et maximum par jour et par nuit. Cela permet de constater que pendant les périodes d'occupation, les études de cas avec revêtement intérieur en bois ont une température moyenne stable. La différence entre la moyenne de la température diurne et la moyenne de la température nocturne est inférieure à 4°C. Dans la figure 3.24 et la figure 3.25 la période d'occupation s'étend du 08/05/2007 au 14/05/2007, puis du 24/05/2007 au 27/05/2007. Il y a alors une inoccupation des locaux entre ces deux périodes. La présence ou l'absence des occupants est relevée lorsque nous lançons les mesures. En effet, lorsque les locaux ne sont pas occupés, les équipements de chauffage, d'éclairage et les activités d'intérieur sont arrêtés.

Nous observons alors les fluctuations de températures et d'humidités dans l'ambiance et sur les parois.

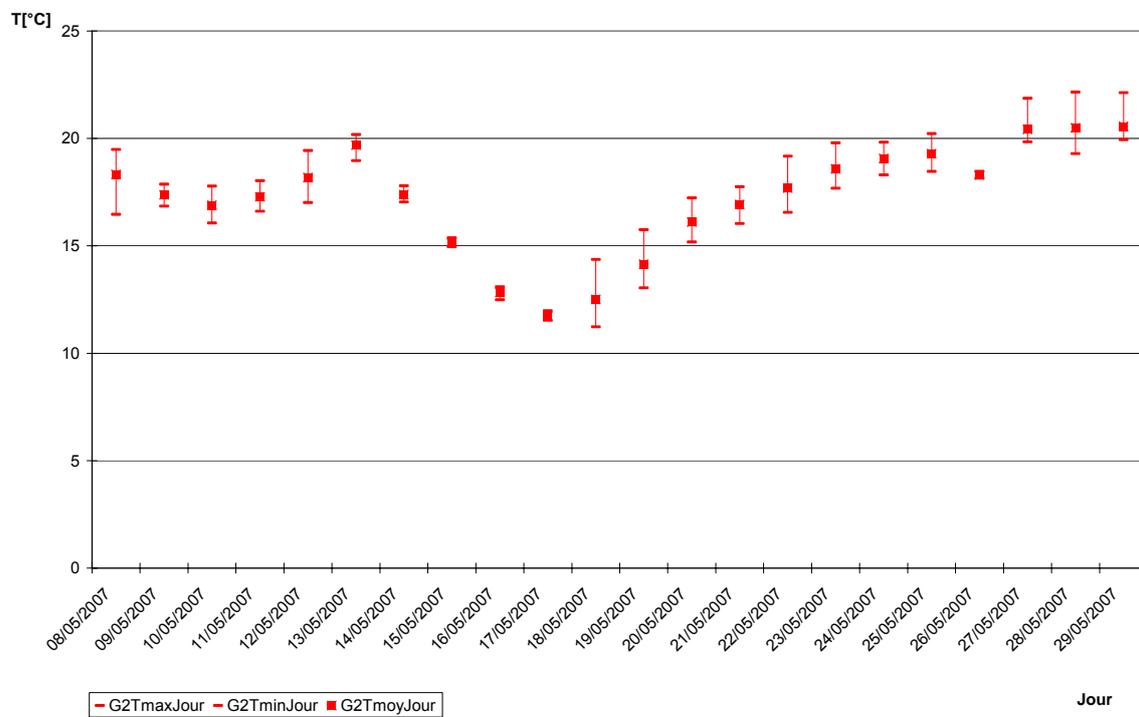


Figure 3-24 : Variation des températures diurnes au printemps (G2)

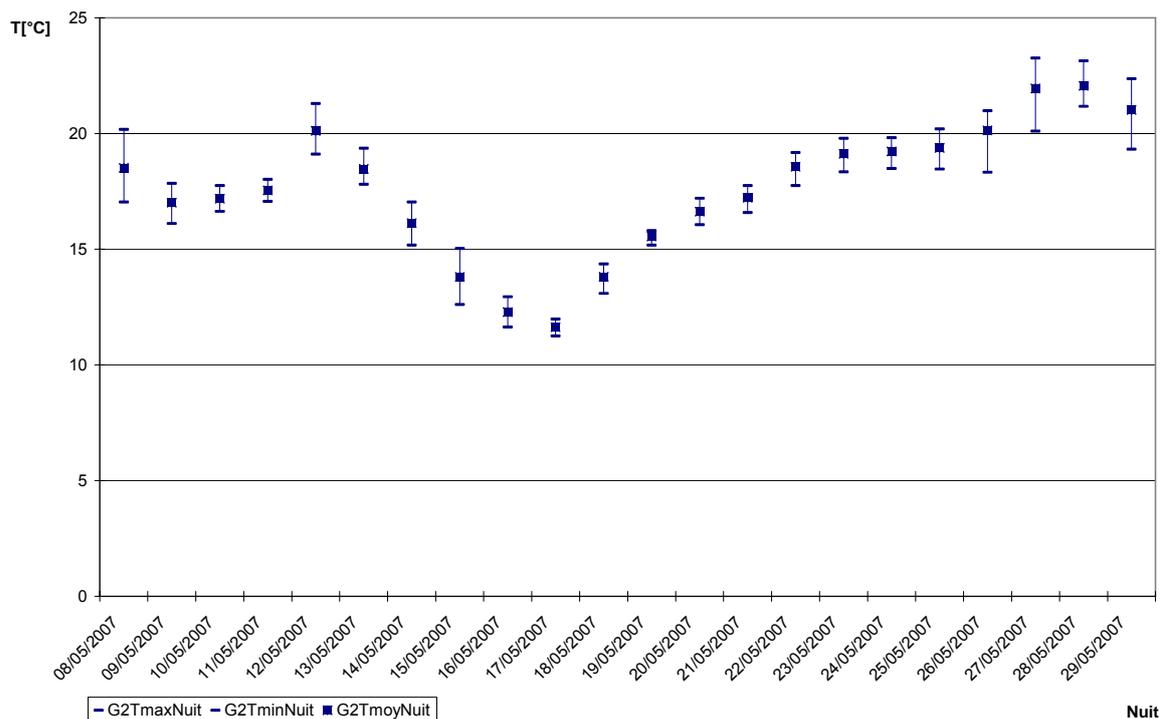


Figure 3-25 : Variations des températures nocturnes au printemps (G2)

La différence entre la température minimale et maximale de la journée à l'intérieur est aux alentours de 5°C alors que la température extérieure peut présenter 20°C de différence. Nous constatons que la moyenne de température est plus importante le jour par rapport à la nuit : il y a entre 1°C et 3°C de différence pour le printemps. Cette différence s'explique par le rafraîchissement de l'air extérieur pendant la nuit qui a une influence importante sur l'air intérieur.

Nous observons que l'allure de la variation de la température intérieure suit celle de la variation de la température extérieure. Néanmoins, que ce soit le jour ou la nuit, et pour toutes les périodes, les moyennes de la température varient autour d'une valeur stable par rapport à l'extérieur qui présente une grande fluctuation.

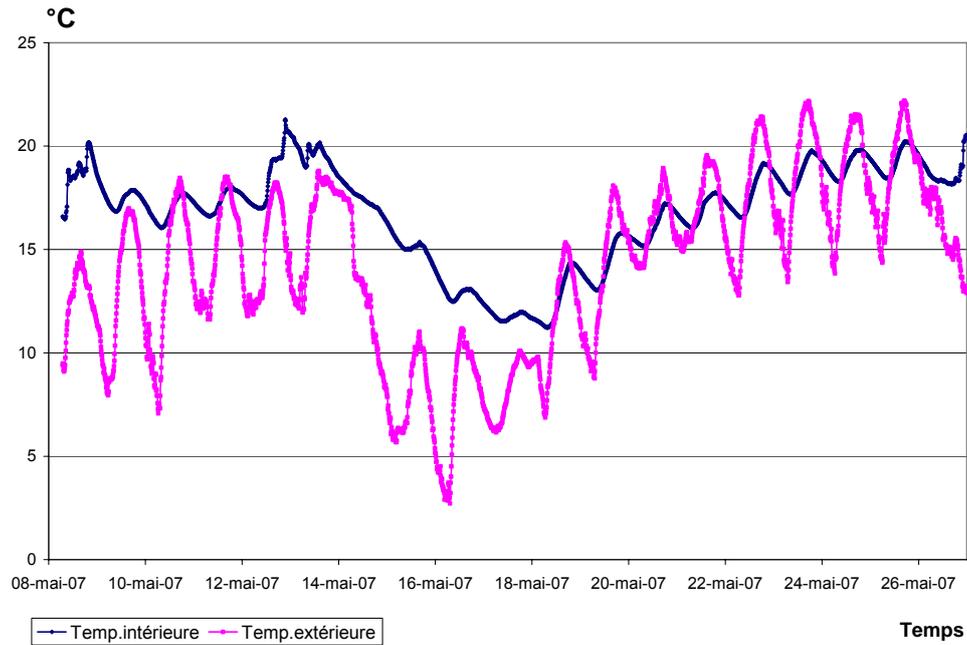


Figure 3-26 : Variation des températures intérieures et extérieures au printemps (G2)

Nous avons également différencié les données d'humidité relative du jour et de la nuit (figure 3-27 et 3-28). Nous observons que les moyennes d'humidité du jour et de la nuit sont très voisines pour l'humidité relative intérieure. Au printemps, l'humidité relative moyenne varie entre 37% et 50% que ce soit le jour ou la nuit. De plus, l'écart entre le minimum et maximum est inférieur à 10%.

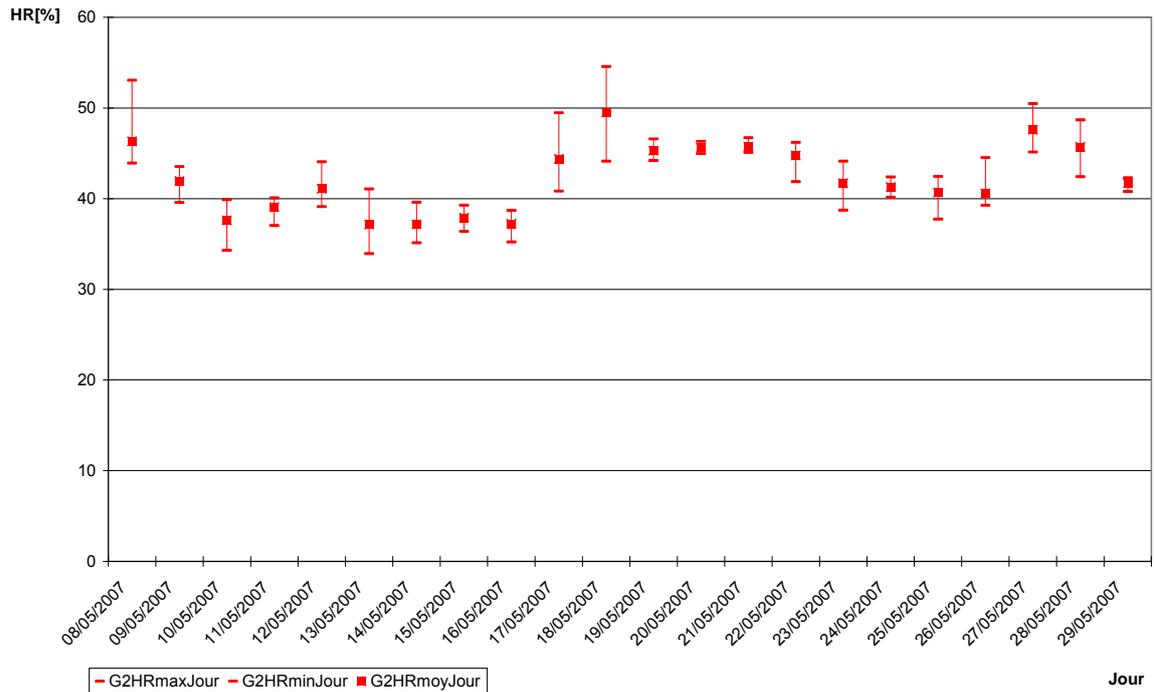


Figure 3-27 : Variation de l'humidité relative diurne au printemps (G2)

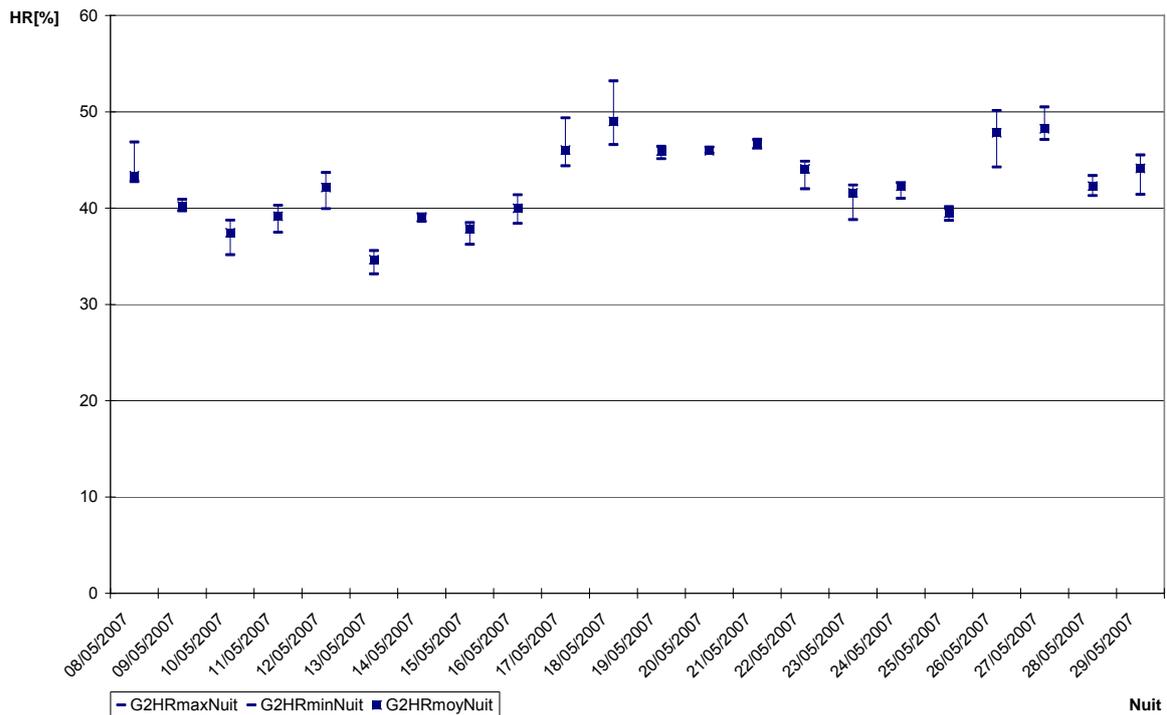


Figure 3-28 : Variation de l'humidité relative nocturne au printemps (G2)

La variation de l'humidité relative moyenne est faible entre les périodes d'occupation et d'absence d'occupation. C'est un point favorable au confort de l'occupant puisque malgré une

grande fluctuation d'humidité relative extérieure, elle est faible à l'intérieur et en fonction de la température de paroi, les risques de condensation dans les locaux sont faibles.

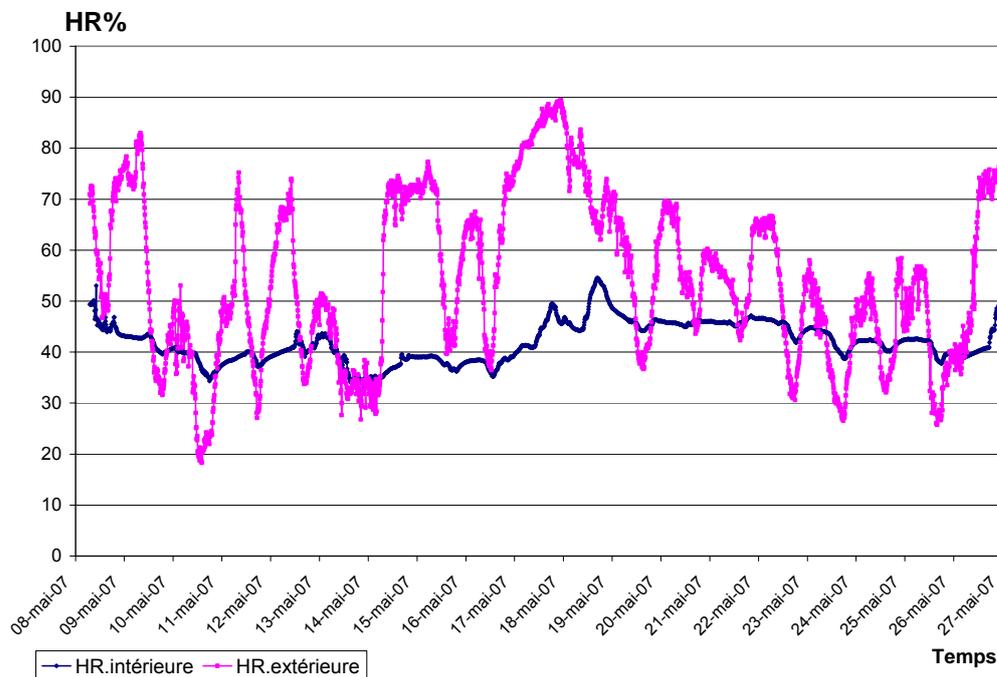


Figure 3-29 : Variation de l'humidité relative extérieure et intérieure au printemps (G2)

Nous avons présenté un cas de mesures continues dans la pièce G2 mais nous avons résumé le tableau 3-17, les moyennes de température et humidité relative mesurées dans chaque local d'une même maison pour différentes saisons.

3.5.2 Données issues des mesures ponctuelles

Lors des visites effectuées dans les locaux étudiés, nous avons systématiquement procédé à des mesures ponctuelles.

En effectuant des mesures ponctuelles de la température et de l'humidité par mètre carré de surface, nous avons pu représenter les courbes isothermes (figure 3-30) et mettre en évidence la répartition de l'humidité des parois. Nous avons constaté une homogénéité de la surface dans les locaux de la maison G, V et M : la différence entre la température maximale et minimale est inférieure à 0,8°C sur une même surface. Nous calculons également l'indice d'uniformité des surfaces défini dans le chapitre précédent (IUT : Equation 2-44)

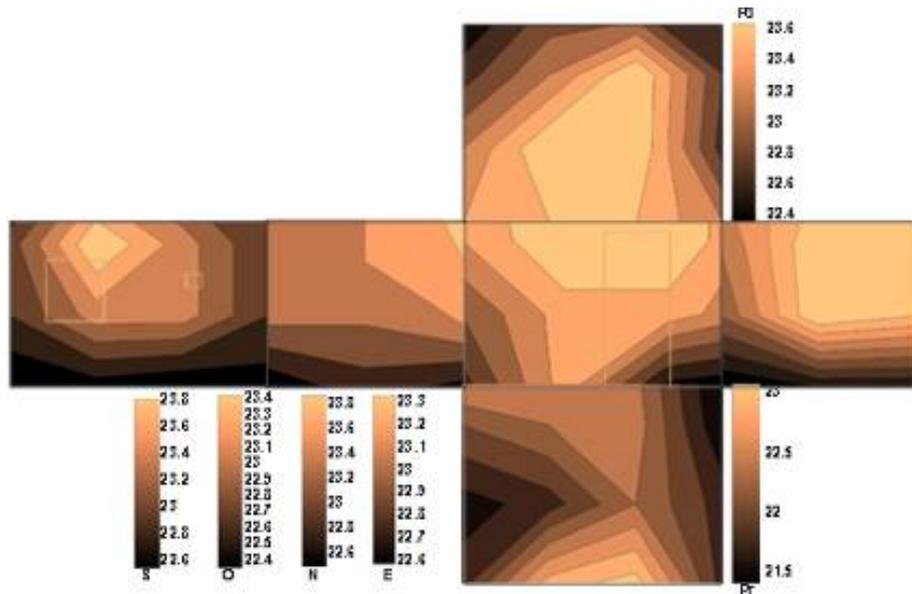


Figure 3-30 : Courbes isothermes du local N°1(G1) pour une température moyenne d'air de 24°C

Entre deux surfaces opposées, nous avons des différences de température inférieures à 1°C.

France	G1	G2	G3	V1	V2	V3	V4
Plancher	0,98	0,99	0,98	0,90	0,90	0,90	0,88
Plafond	0,98	0,95	0,93	0,98	0,92	0,92	0,95
Mur Nord	0,95	0,97	0,89	0,95	0,94	0,94	0,91
Mur Sud	0,95	0,97	0,89	0,64	0,94	0,94	0,91
Mur Est	0,95	0,97	0,89	0,95	0,94	0,94	0,91
Mur Ouest	0,95	0,97	0,89	0,95	0,94	0,94	0,91
Ratio bois[%]	74,50	81,88	58,56	50,87	71,60	78,08	74,08

Tableau 3-13 Indice d'uniformité en température sur les parois intérieures en France (printemps)

MADAGASCAR	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Plancher	0,96	0,98	1,00	0,89	0,87	0,89	0,65
Plafond	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Mur Nord	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,92
Mur Sud	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98
Mur Est	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,98
Mur Ouest	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,92
Ratio bois[%]	61,54	76,55	57,23	35,24	26,00	38,92	21,25

Tableau 3-14 : indice d'uniformité en température sur les parois intérieures à Madagascar (printemps)

En observant les mesures de température de surface et l'indice d'uniformité en température (tableaux 3-13 et 3-14) nous pouvons garder une température unique pour chacune des

orientations parce que toutes les surfaces présentent une température de plus ou moins 10% de la valeur moyenne.

Les mesures d'humidité des parois montrent aussi une répartition homogène entre les surfaces intérieures des locaux.

Les tableaux 3-15 et 3-16 donnent les valeurs des teneurs en eau des revêtements en bois des 14 études de cas. La valeur de la teneur en humidité du bois varie de 6 à 12% dans les pièces d'habitation avec une précision des mesures de 0,1%.

France	G1	G2	G3	V1	V2	V3	V4
Plancher	7,00	8,00	7,00				
Plafond		8,00		8,00	8,00	8,00	8,00
Mur Nord	9,00	8,00	8,00	7,00	8,00	8,00	8,00
Mur Sud	9,00	9,00	8,00		7,00	7,00	7,00
Mur Est	7,00	8,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Mur Ouest	8,00	8,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Ratio bois[%]	74,50	81,88	58,56	50,87	71,60	78,08	74,08

Tableau 3-15 : teneur en eau des revêtements en bois (G et V printemps)

MADAGASCAR	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Plancher	7,00	7,00	7,00	8,00	6,00	6,00	
Plafond	7,00	7,00	7,00	8,00			8,00
Mur Nord							
Mur Sud							
Mur Est							
Mur Ouest							
Ratio bois[%]	61,54	76,55	57,23	35,24	26,00	38,92	21,25

Tableau 3-16 : teneur en eau des revêtements en bois (M printemps)

Les données recueillies avec les mesures ponctuelles permettent de déterminer les caractéristiques des ambiances thermiques et du confort intérieur. Les valeurs de PMV et PPD sont calculées pour différentes saisons selon l'approche décrite dans le chapitre précédent. Nous pouvons ainsi mettre en évidence la répartition spatiale du PMV, du PPD, et de l'asymétrie de rayonnement.

Les figures 3-31 à 3-37 fournissent un exemple des représentations obtenues pour l'étude de cas G1 et pour différentes saisons.

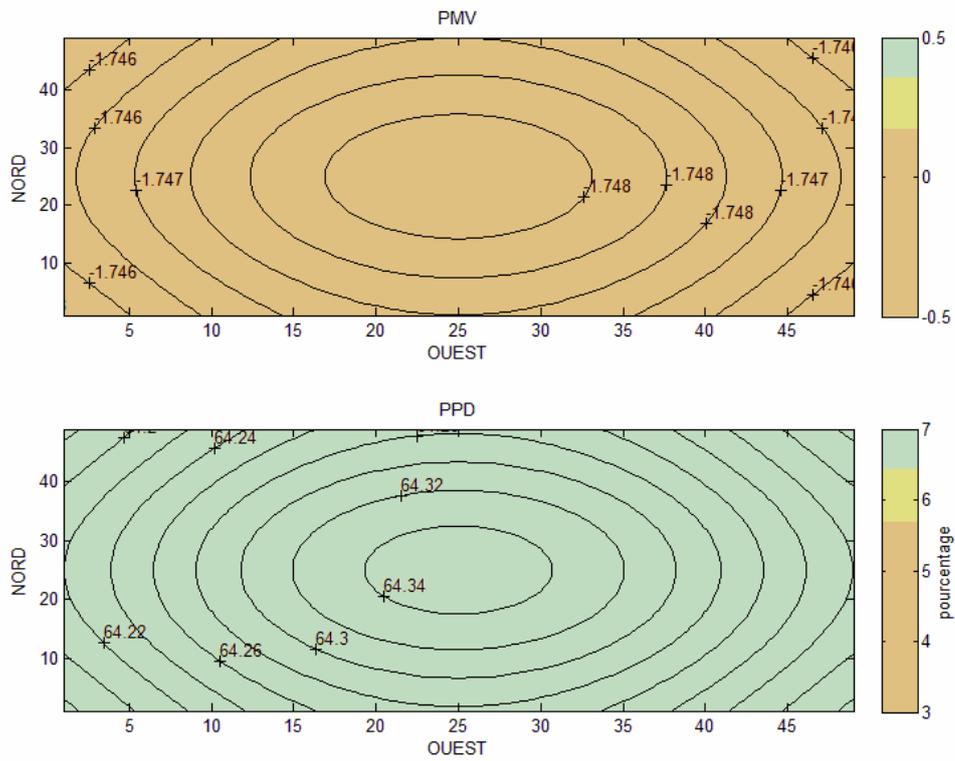


Figure 3-31 : PMV et PPD au printemps (G1) PMV moyen = -1.7 ; PPD = 64.3

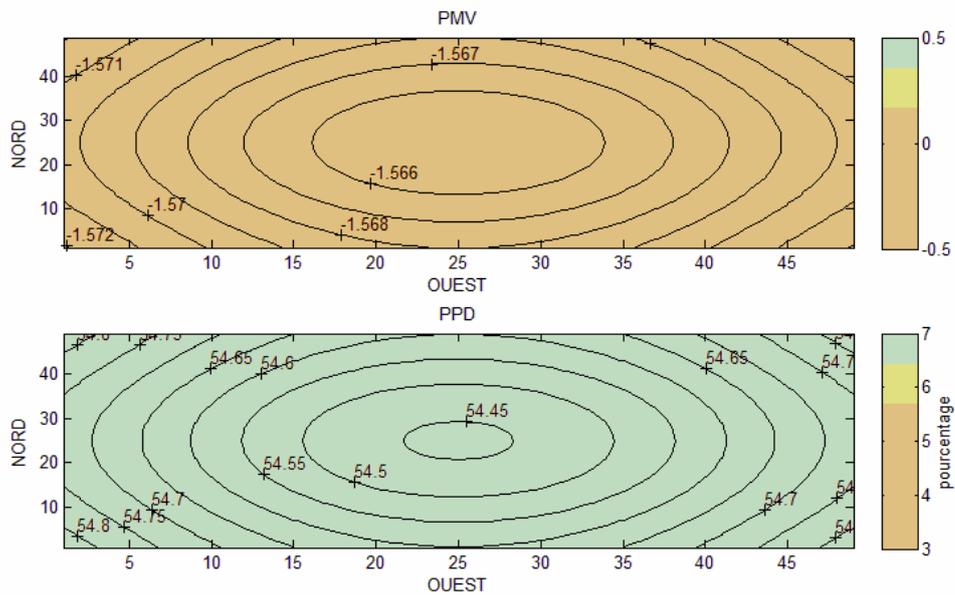


Figure 3-32 : PMV et PPD au printemps (G2) PMV moyen = -2.5, PPD = 93.6%

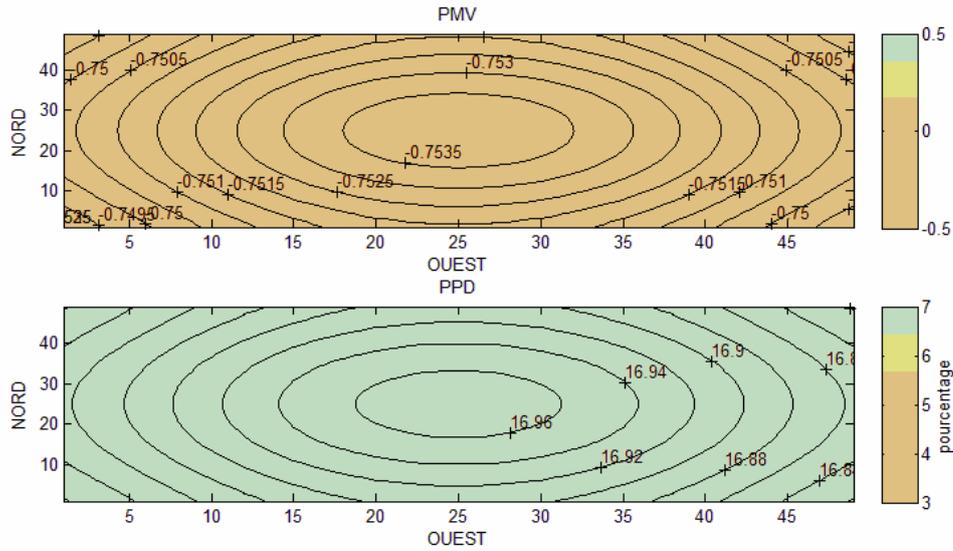


Figure 3-33 : PMV et PPD en été (G1) PMV moyen = -0.75 ; PPD = 16.9

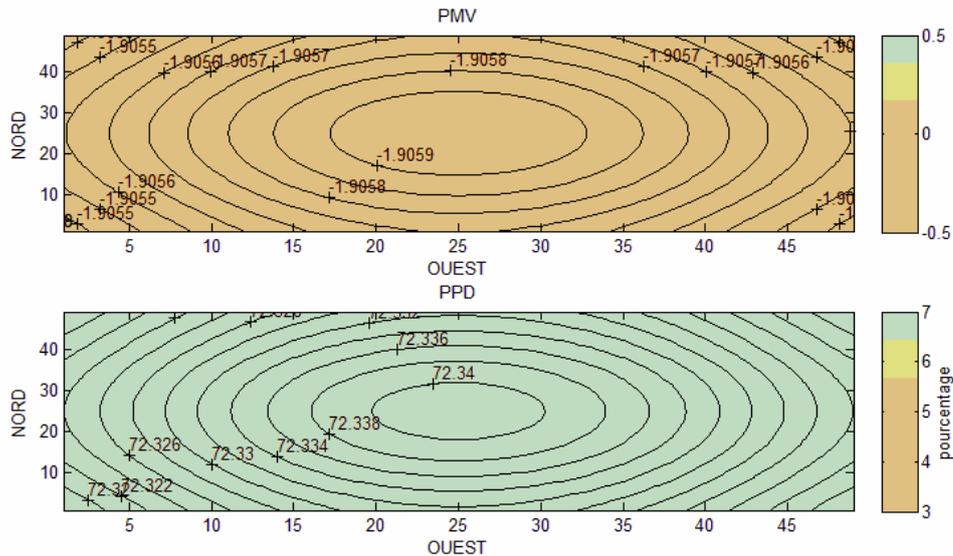


Figure 3-34 : PMV et PPD en hiver (G1) PMV moyen = -1.9, PPD = 72.3

Comme nous pouvons constater sur les figures précédentes, si l'on se réfère au seul calcul ponctuel du PMV et du PPD, la pièce G1 ne répond pas aux exigences de confort thermique des occupants pour chaque saison.

En ce qui concerne l'asymétrie du rayonnement thermique, les données recueillies de chaque pièce d'habitation et pour chaque saison peuvent être exploitées en utilisant le pourcentage d'insatisfaits (PIV) comme décrit dans le chapitre 2 (réf). Les asymétries de rayonnement thermique sont alors visualisées par des figures, comme celles de l'étude de cas G1 (figures 3-35)

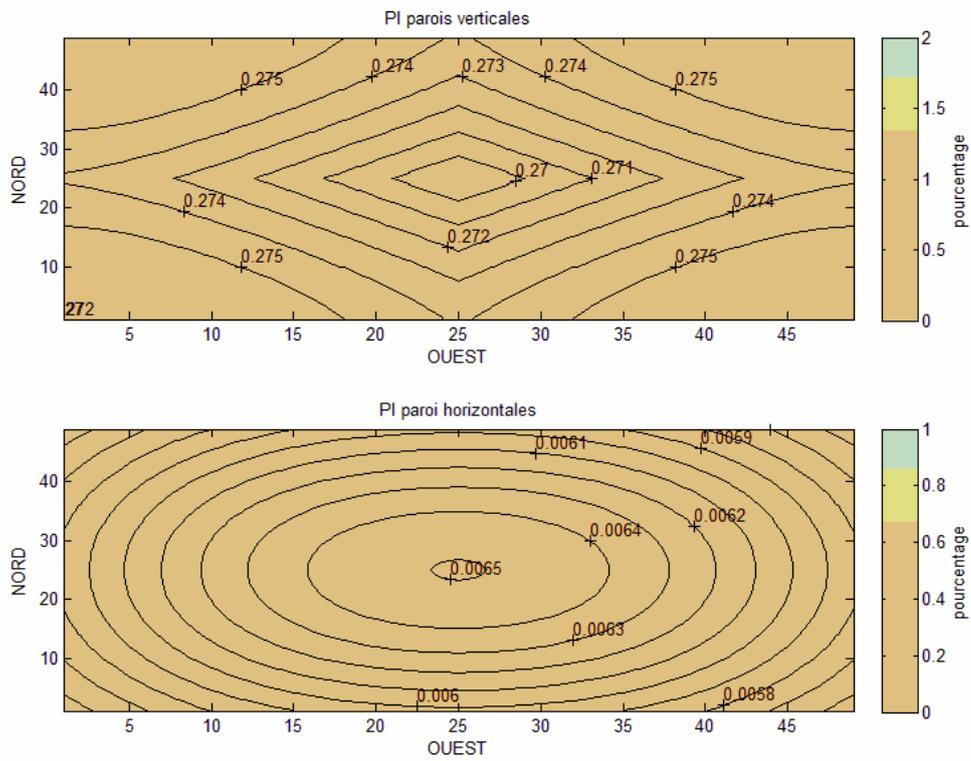


Figure 3-35 : PIV pour Glau printemps

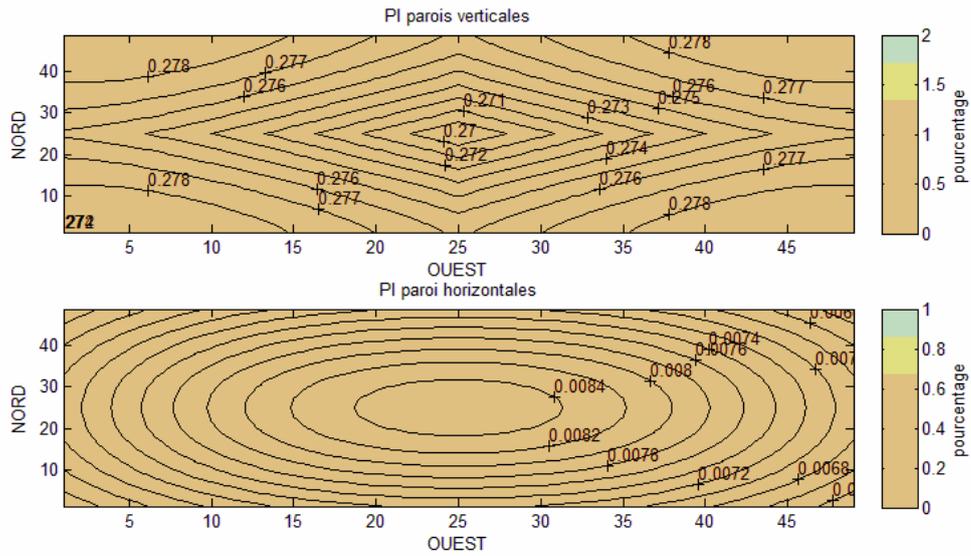


Figure 3-36 : PIV pour Glen été

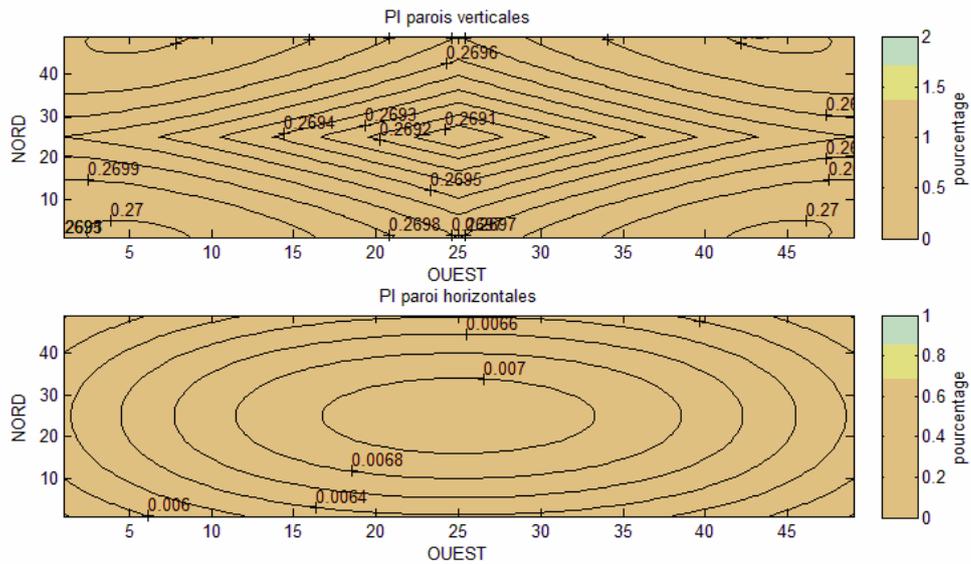


Figure 3-37 : PIV pour G1 en hiver

Le local G1 ne présente aucun gêne lié à l'asymétrie au rayonnement et nous avons un pourcentage d'insatisfaits voisin de 0 partout et pour toutes les saisons.

Ainsi, nous avons recueilli et traité les données pour les 14 études de cas. Nous avons ainsi plusieurs approches possibles pour analyser l'ensemble des données recueillies par les campagnes de mesures in situ, et notamment des représentations spatiales mettant en évidence l'hétérogénéité éventuelle des ambiances thermiques et du confort.

3.6 Analyse des données recueillies

Nous conservons dans un premier temps l'exemple de la maison La Grave (G1, G2, G3) pour présenter l'analyse des données, puis ensuite nous proposons une analyse de l'ensemble des études de cas.

Nous observons que pour chaque période de mesure dans les pièces d'habitation d'une même maison La Grave (figure 3-38), nous avons la même tendance de la température moyenne. Dans les locaux G1, G2 et G3, les températures sont plus importantes que la température extérieure. Une plus grande différence se fait sentir surtout en hiver puisqu'il y a l'apport de chaleur par le chauffage intérieur. La plus petite différence entre la température extérieure et intérieure se trouve au printemps pendant la période d'innoculation des locaux.

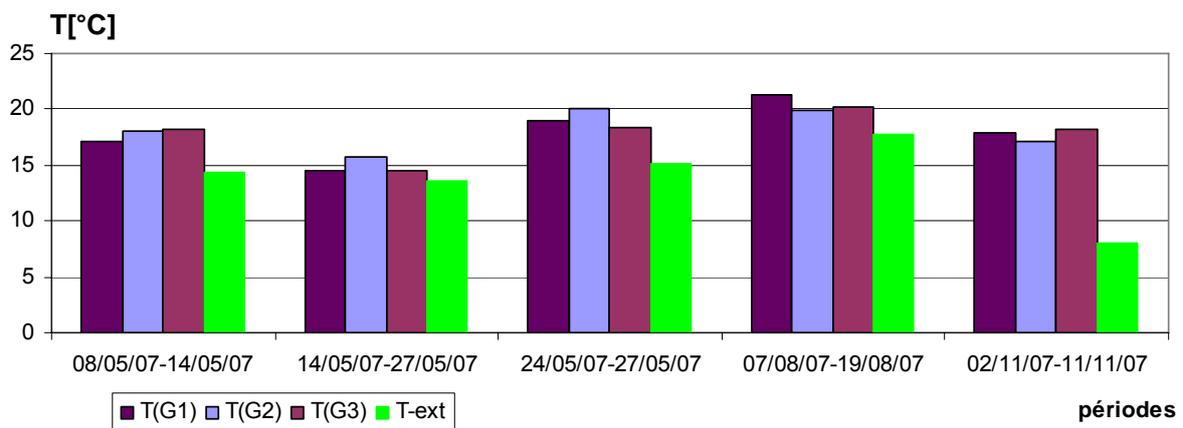


Figure 3-38 : comparaison de températures entre G1, G2 et G3

Concernant l'humidité relative intérieure, nous avons une même tendance dans les trois locaux G1, G2, G3 par rapport à l'extérieur. La différence de l'humidité relative moyenne est

plus grande en hiver et plus petite en printemps pour la deuxième occupation.

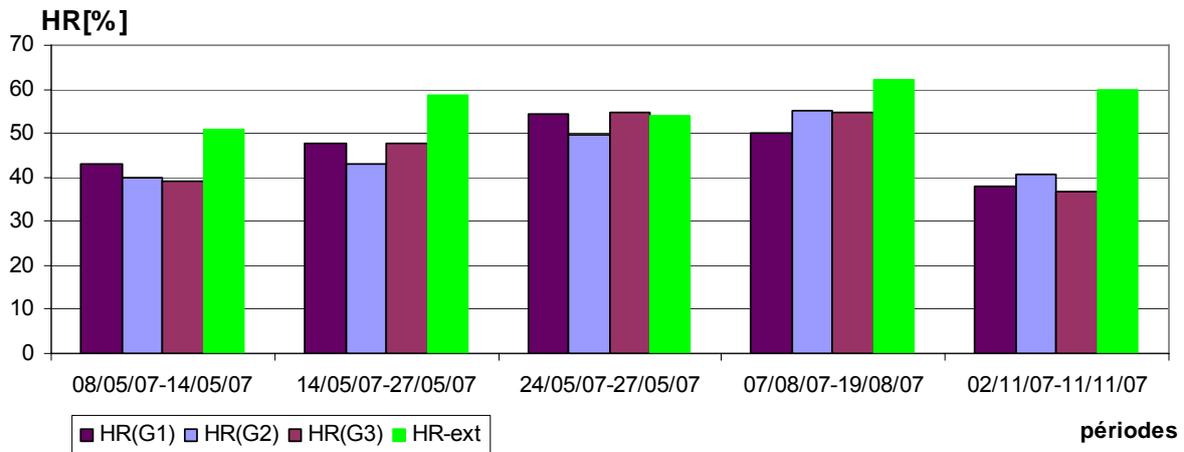


Figure 3-39 : Comparaison de HR entre trois locaux d'une même maison

La pièce G1 présente 74,50% de ratio de bois par rapport à la surface totale de parois intérieures. La pièce G2 présente 81,88% et G3, 58,56%. Les surfaces de parois totales sont de 46,71m² pour G1, 53,29m² pour G2 et 20,86 pour G3.

La pièce G2 a le plus fort ratio de bois. Le plancher, le plafond et les murs sont en bois. L'humidité relative est la plus faible sauf en été et en hiver. La température dans la pièce G2 est plus importante au printemps alors qu'elle est la plus faible en été et en hiver. On constate alors que dans les périodes de températures et humidités extrêmes (hiver et été), les variations d'ambiance dans la pièce G2 suivent moins les variations d'ambiance extérieure que les autres pièces.

G3 présente le plus faible ratio de bois, elle est de nature instable par rapport à l'extérieur : la température y est plus grande au printemps quand la maison est occupée et la plus faible en période d'inoccupation. En été, G3 a une température plus grande que G2 (ratio max) et pourtant inférieure à la température dans G1(74,5%). Et en hiver, on y trouve l'ambiance la plus chaude.

Pour l'humidité, G2 est la pièce la plus humide en été en hiver. G2 présente la plus faible HR au printemps, mais l'ambiance la plus humide en été et hiver. Le comportement de G1 semble

Pour G1, la température est plus forte en été et entre G2 et G3 en hiver. La température est plus faible au printemps sauf en période d'occupation où elle est entre G2 et G3. Dans le G1, le plancher et tous les murs sont en bois.

Nous avons comparé les moyennes de températures et d'humidités relatives des différents locaux de la Grave (G) sur différentes périodes de mesure dans le tableau 3-17.

		G1		G2		G3		Extérieur	
	Moyenne	T(°C)	HR(%)	T(°C)	HR(%)	T(°C)	HR(%)	T(°C)	HR(%)
08/05/07- 14/05/07	Jour	17,13	43,06	17,85	40,32	18,39	39,65	15,23	54,59
	Nuit	17,07	43,08	18,14	39,50	18,13	38,94	13,57	47,05
14/05/07- 27/05/07	Jour	14,52	47,25	15,62	42,82	14,39	47,64	14,52	54,60
	Nuit	14,63	47,99	15,87	43,42	14,60	47,76	12,69	62,66
24/05/07- 27/05/07	Jour	18,58	47,83	19,62	43,30	18,42	48,93	17,27	53,10
	Nuit	19,48	60,57	20,64	56,12	18,21	60,57	13,08	54,97
07/08/07- 19/08/07	Jour	21,09	49,37	19,87	54,28	20,25	54,35	18,58	60,05
	Nuit	21,50	50,56	20,07	55,86	20,24	55,18	17,016	64,17
02/11/07- 11/11/07	Jour	18,33	37,52	17,46	40,50	18,69	36,65	8,72	59,33
	Nuit	17,61	38,59	16,91	41,12	17,87	36,74	7,41	60,34

Tableau 3-17 Moyennes des températures et d'humidité relative pour G1, G2 et G3

Nous constatons que pour une même période, les températures moyennes des pièces de la même maison La Grave sont voisines. Nous n'avons pu tirer aucune tendance de variation de température ou humidité relative en fonction du ratio. Malgré la similitude des ambiances, on constate tout de même des comportements différents entre les pièces entre les différentes saisons.

Selon nos observations, dans le cas de pièce où toutes les surfaces intérieures sont en bois naturel, nous ne rencontrons aucune pathologie concernant l'humidité (condensation, moisissure, tâches sur les murs et les parois intérieures). Ceci s'explique par l'état de l'air intérieur des locaux où aucune situation ne présente une température de rosée supérieure à la température de paroi. En effet, la température de paroi (bois) est voisine de la température d'air. Etant donné les valeurs d'uniformité en température de chaque surface intérieure, nous avons des valeurs voisines de 1. Ce qui signifie qu'il y a peu ou pas de variation entre les

différents points d'une même surface. On prendra alors une valeur unique T_{paroi} pour représenter une même surface.

$$T_{\text{paroi}} = T_{\text{moyenne}} \pm (1-IUT) * 100 \quad [\text{Équation 3-1}]$$

Pour chaque surface, la température varie de 18°C en période non chauffée à 27°C lorsque les lieux sont chauffés. Nous en déduisons que les températures de surfaces ne descendent jamais en dessous des températures de rosée correspondant aux états de l'air.

Nous avons tracé dans le diagramme psychrométrique, les états de l'air que nous avons mesurés in situ (figure 3-40 à 3-42). La zone entourée en vert est la zone de confort d'hiver et celle qui est entouré en orange correspond au confort d'été.

Nous avons confondu les 14 locaux d'études de G, V et M pour le printemps (figure 3-40), et pour la saison d'été et hiver, les figures 3-41 et 3-42 représentent l'état de l'air dans les locaux de G (G1-G2 et G3). Les points de mesure constituent alors un nuage de points utilisé pour trouver la plage de température où il y aurait une condensation dans les locaux.

Ainsi pour la période de printemps (locaux en France et à Madagascar), la zone de condensation est de 0°C à 11°C. La température de parois ne doit donc pas se situer dans cette plage pour éviter toute condensation.

Pour l'été, les parois des locaux ne devraient pas se situer entre 6 et 12,3°C, et pour l'hiver, la plage de condensation se situe entre 7°C et 12,7°C. Nous avons constaté un problème de condensation pour le local G2 dont la fonction est une salle d'eau (figure 3-42)

Diagramme psychrométrique

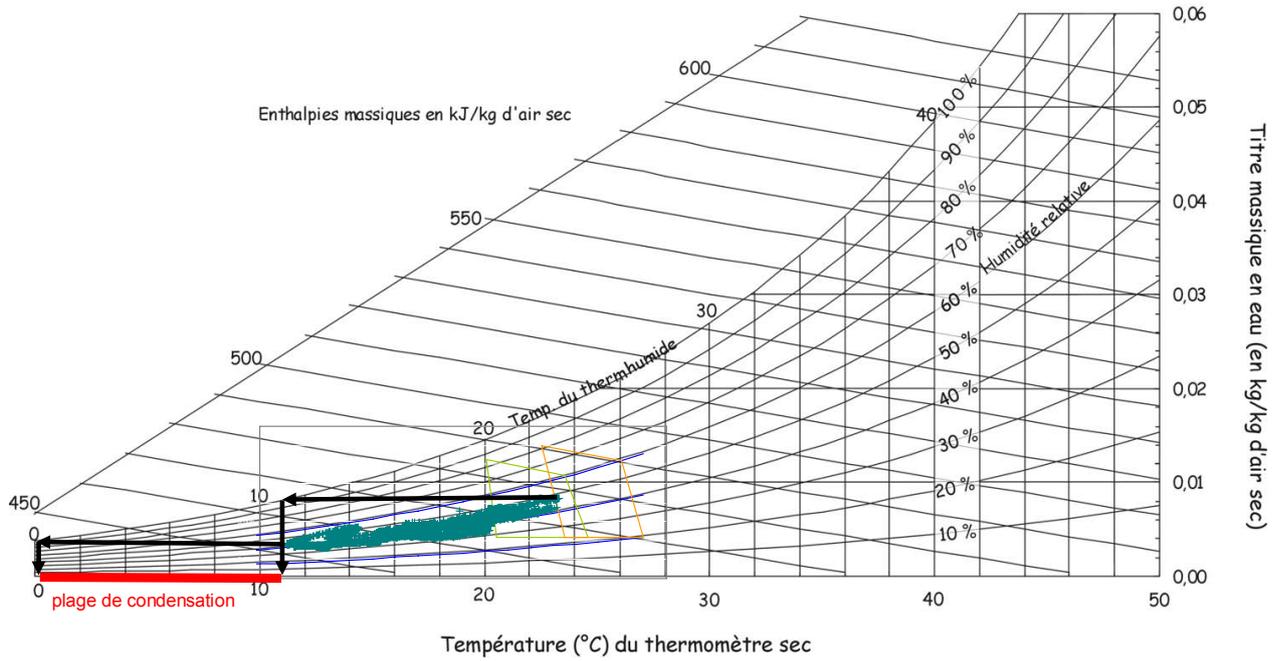


Figure 3-40: détermination de la zone de point de rosée (printemps dans G, V et M)

Diagramme psychrométrique

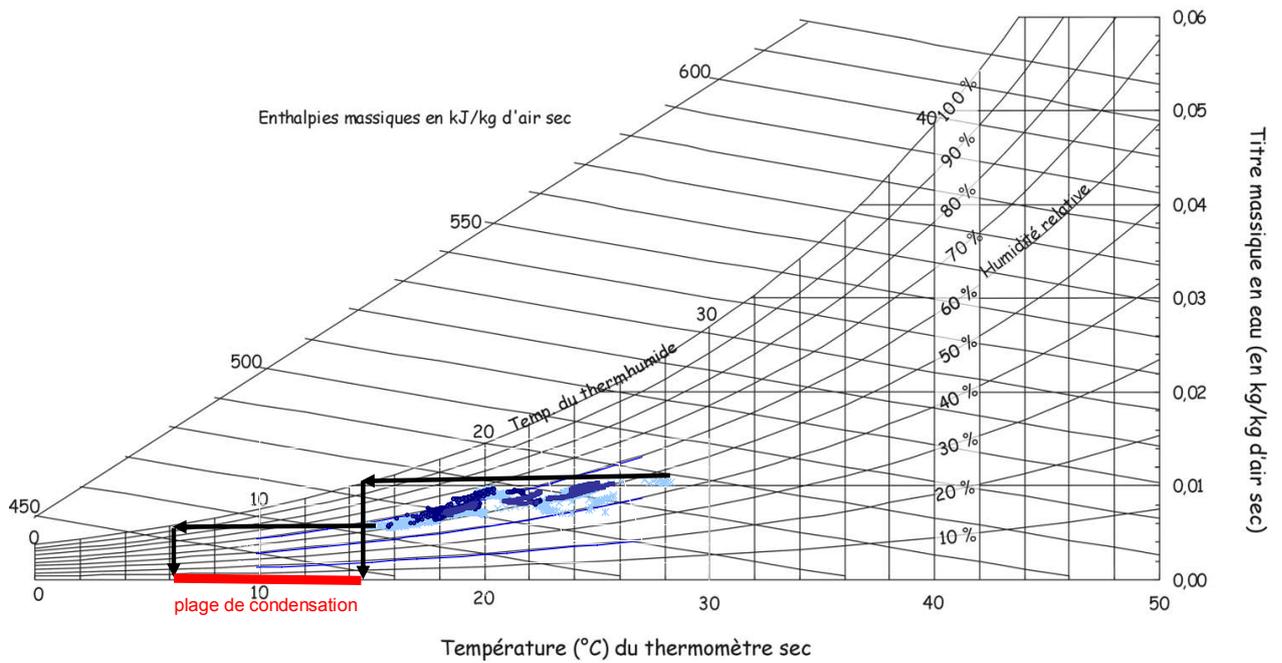


Figure 3-41: détermination de la zone de point de rosée (été dans G)

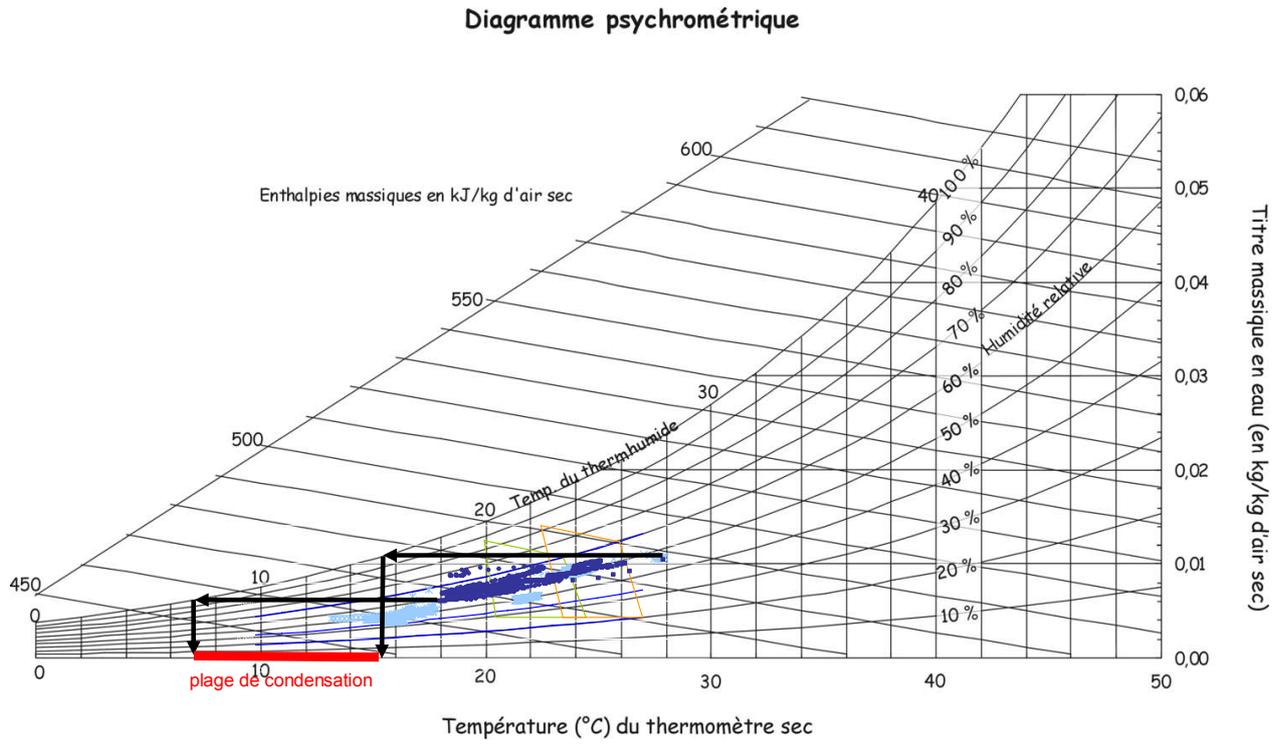


Figure 3-42: détermination de la zone de point de rosée (hiver dans G)

Les différentes configurations de revêtement intérieur en bois que nous avons rencontré dans les 14 études de cas in situ sont rappelées dans le tableau 3-18.

<i>Scenario</i>	<i>Plancher</i>	<i>Plafond</i>	<i>Mur1</i>	<i>Mur2</i>	<i>Mur3</i>	<i>Mur4</i>	<i>RATIO%</i>
<i>G1</i>	✓		✓	✓	✓	✓	74.50
<i>G2</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	81.88
<i>G3</i>	✓		✓	✓	✓		58.56
<i>V1</i>		✓	✓	✓	✓		50.87
<i>V2</i>		✓	✓	✓	✓	✓	71.60
<i>V3</i>		✓	✓	✓	✓	✓	78.08
<i>V4</i>		✓	✓	✓	✓		74.08
<i>M1</i>	✓	✓					61.54
<i>M2</i>	✓	✓					76.55
<i>M3</i>	✓	✓					57.23
<i>M4</i>	✓	✓					35.24
<i>M5</i>	✓						26
<i>M6</i>	✓	✓					38.92
<i>M7</i>		✓					21.25

Tableau 3-18 : Scenario de revêtement intérieur en bois dans les locaux d'étude in situ

Une pièce est composée de 6 orientations (parois) dans notre étude. Il s'agit de plancher, plafond et les 4 murs (nord, sud, est et ouest). Même s'il y a des géométries différentes d'un parallélépipède et qui présentent des décrochements dans les pièces ou des orientations inclinées ou en biais, nous les avons intégrés dans les 6 orientations standards (tableau 3-2). Nous y avons coché les parois qui sont revêtues en bois.

Ainsi on peut définir deux critères de présence de bois dans une pièce :

- Le ratio de bois (en %) est le rapport en pourcentage de la surface en m² des revêtements intérieurs en bois par la surface totale des parois

- La position et le nombre de parois en bois = nombre d'orientations des parois revêtue en bois variant de 0 à 6 (1 plancher + 1 plafond + 4 Murs verticaux).

Le premier critère prend en compte la surface réelle et le second considère la position/orientation des parois dans un local. La figure ci-dessous représente l'évolution de ces deux critères pour les 14 études de cas.

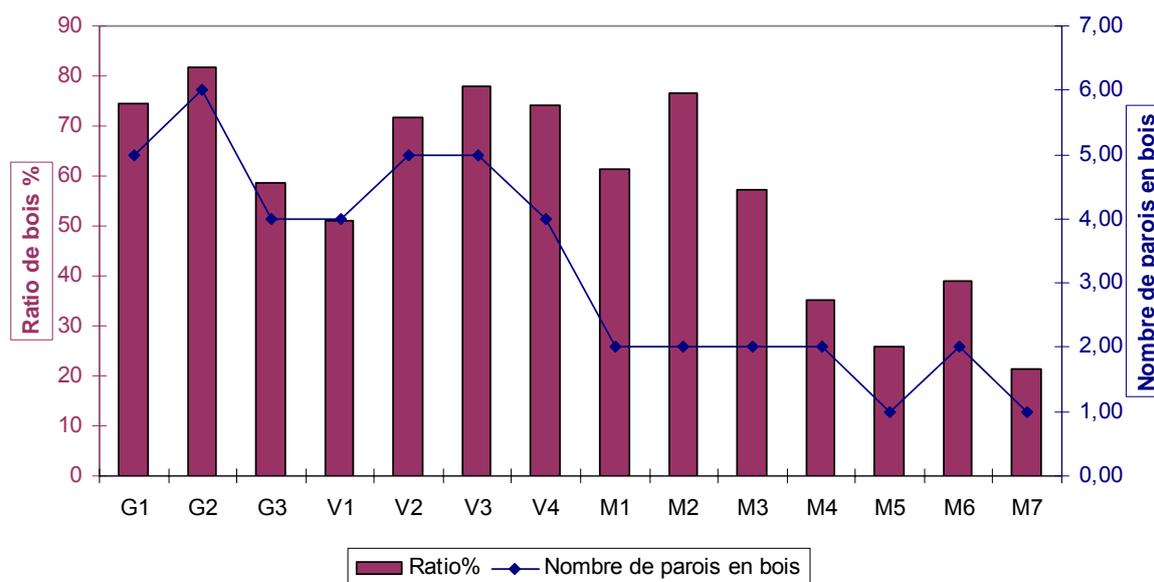


Figure 3-43 : Evolution des deux critères de présence de bois dans un local

Logiquement, les deux critères devraient varier suivant une même tendance. C'est-à-dire quand le nombre de parois revêtues en bois augmente, le ratio de bois dans la pièce augmente aussi, et lorsque le nombre de parois en bois diminue, le ratio diminue aussi. Cette tendance est vérifiée dans le cas de pièces identiques en géométrie et pour les pièces parallélépipédiques. Mais dans notre étude, chacune des pièces étudiées a une géométrie différente. Il se trouve que même pour un même nombre de parois en bois, le ratio n'est pas le même. Voyons le cas de M1, M2, M3 et M4 et M6 où nous avons deux parois chacune en bois et pourtant les ratios de bois présents sont complètement différents. On constate aussi que l'on peut avoir un ratio de bois plus grand dans des pièces présentant moins de parois en bois. Exemple M2 présente un ratio de 76,55% alors que seulement 2 parois (le plancher et le plafond) sont en bois, et dans V3 le ratio est de 78,08% alors que seul le plancher n'est pas en bois et les 5 autres parois sont revêtues de bois. Ces deux critères de présence de bois sont

alors indépendants entre eux. Ils serviront pour analyser l'impact du bois dans chaque pièce étudiée.

Nous pouvons étudier l'évolution de l'ambiance lorsqu'on passe d'une pièce à l'autre dans une même maison et pour une même saison. Ici, nous avons les résultats des calculs pour G1, G2 et G3. La figure 3-14 nous donne le calcul obtenu dans G1 en PMV et PPD. On a trouvé que le PMV moyen est de -0,75 avec une variation de $\pm 0,002$. Nous avons une tendance de PMV plus grande vers le milieu de la pièce. Les quatre coins de la pièce sont là où les votes de confort sont les plus faibles (à tendance confortable PMV se rapprochant de 0) et là où les pourcentages d'insatisfaits sont les moins importants (PPD=16,87) et au milieu, l'ambiance ressentie est plus chaude et moins satisfaisant (PPD = 16,96). Chaque courbe de niveau de PVM représente un écart de 0,0005. On constate jusqu'à 8 courbes de niveaux de PMV de l'intérieur jusqu'aux quatre coins (différence de 0,0004 sur la surface). Nous pouvons en conclure que la pièce présente un confort homogène.

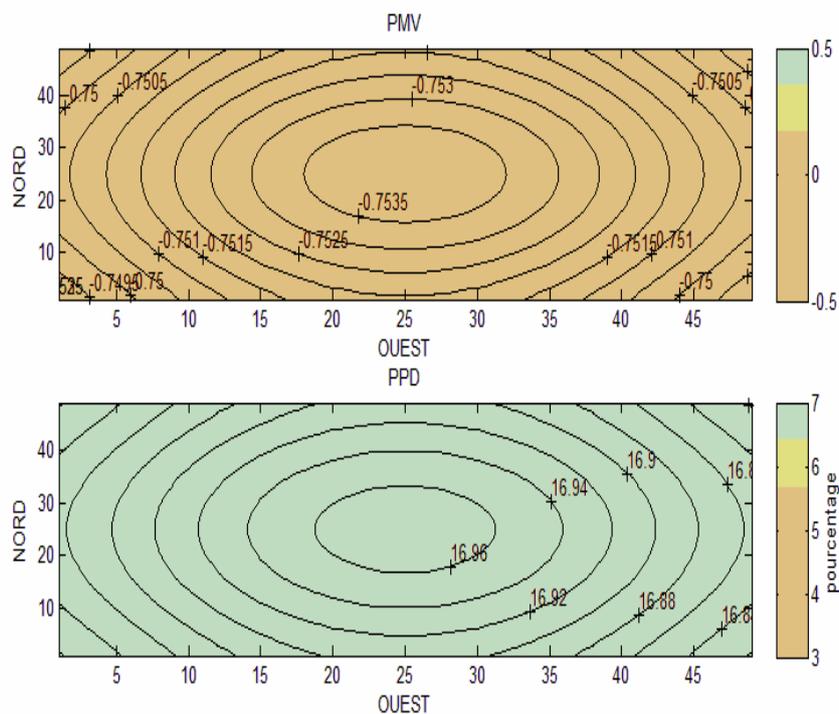


Figure 3-44 : G1 été : PMV moyen = -0.75 et PPD = 16.9

Pour G2, le PMV moyen est de -0,96 avec une variation de $\pm 0,002$. Les courbes de niveaux présentes dans les graphiques sont peu nombreuses (7) et concentriques de l'intérieur de la

pièce aux bords ; mais le PMV est uniforme sur la surface avec s 0,002 d'écart. Les coins sont là où on retrouve des PVM proche de 0 (PMV=-0,962, PPD = 24,54%) alors que celui du milieu est de PMV=-0,9645 et PPD=24,66%.

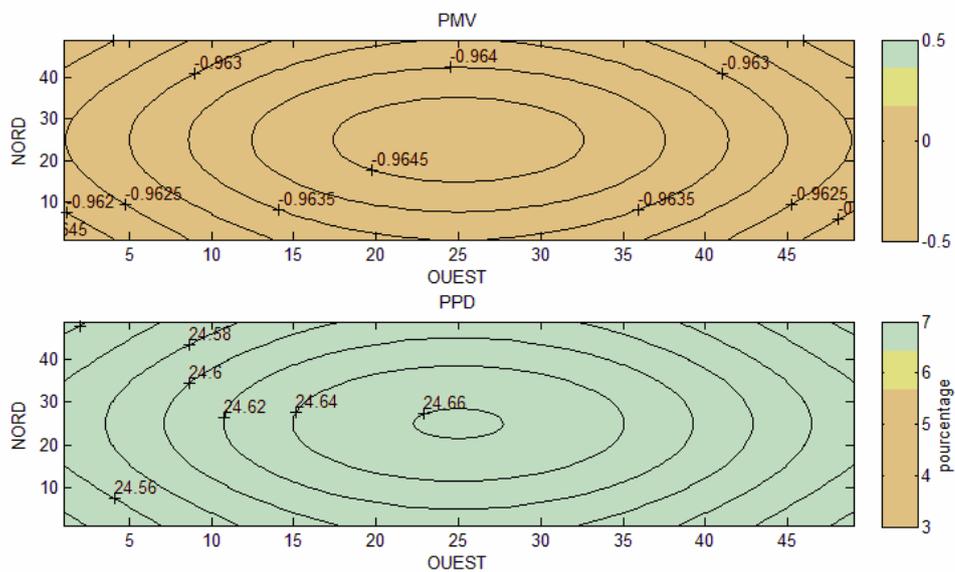


Figure 3-45 : G2 été $PMV_{moyen} = -0.96$ et $PPD = 24.6$

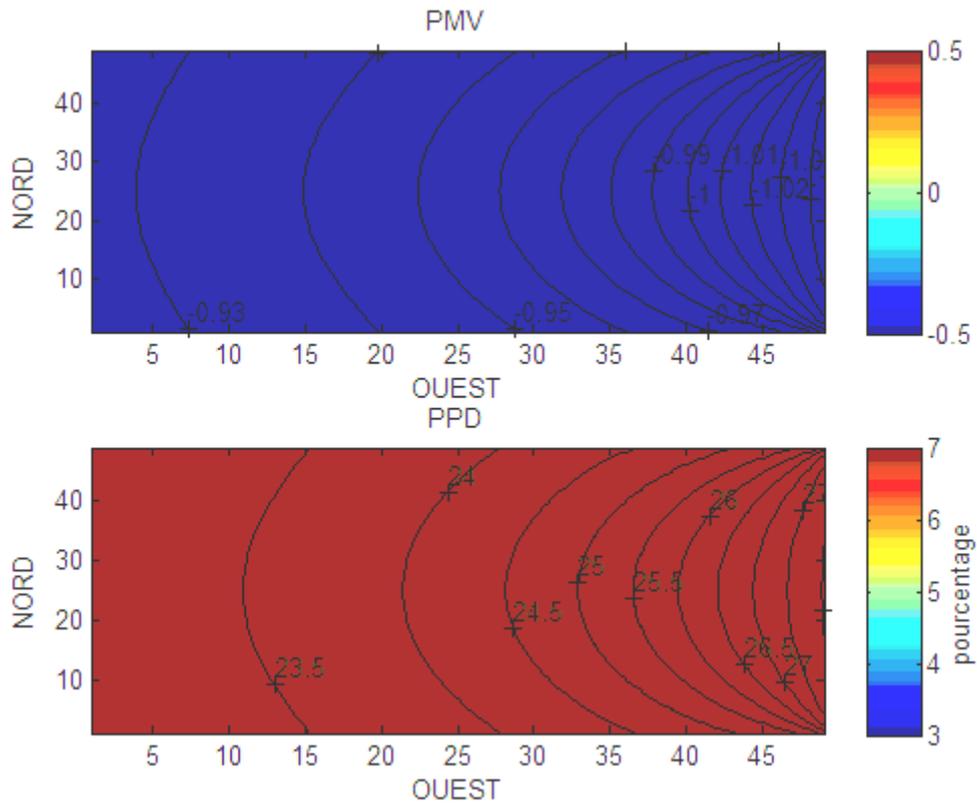


Figure 3-46 : G3 été PMV moyen = -0.9 et PPD = 24.5

Ainsi dans un même bâtiment, nous avons différentes ambiances dans les locaux G1, G2 et G3.

	Local	PMV moyen	PPD (%)
été	G1	-0.75	16.9
	G2	-0.96	24.6
	G3	-0.9	24.5
hiver	G1	-1.9	72.3
	G2	-2.03	78.2
	G3	-1.89	71,5
printemps	G1	-1.7	64.3
	G2	-1.56	54.5
	G3	-1.57	55.5
Printemps2	G1	-2.5	93.6
	G2	-2.29	88.0
	G3	-2.56	94.6

Tableau 3-19 : Comparaison du PMV et PPD pour les pièces G1, G2 et G3

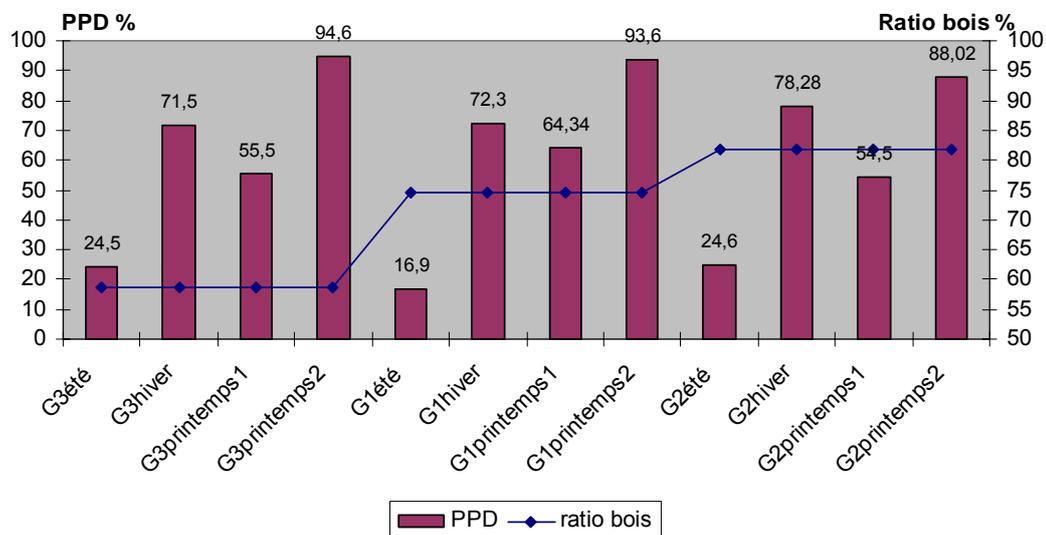


Figure 3-47 : Evolution du PPD avec le ratio de bois (G1, G2, G3) pour différentes saisons

Dans la figure 3-47, l'évolution du PPD dans les locaux laisse penser que plus le ratio de bois est grand, plus le PPD augmente pendant l'été et l'hiver. On en déduit que pour ces deux saisons, le bois détériore l'ambiance dans un local.

Par contre, cette affirmation n'est pas vérifiée au printemps (figure 3-47) parce que la pièce V2 présente le PPD le plus faible alors qu'il a le ratio de bois le plus important. Et pour la période d'inoccupation de printemps, c'est même le phénomène inverse que l'on retrouve : plus on a une grande quantité de surface en bois intérieur, plus le PPD s'améliore (plus faible).

Après avoir effectué le calcul du PMV et PPD des pièces de la maison La Villette (V1, V2, V3 et V4), nous avons dressé le graphique (figure 3-48) qui va être comparé avec celui de la maison La Grave (G1, G2 et G3).

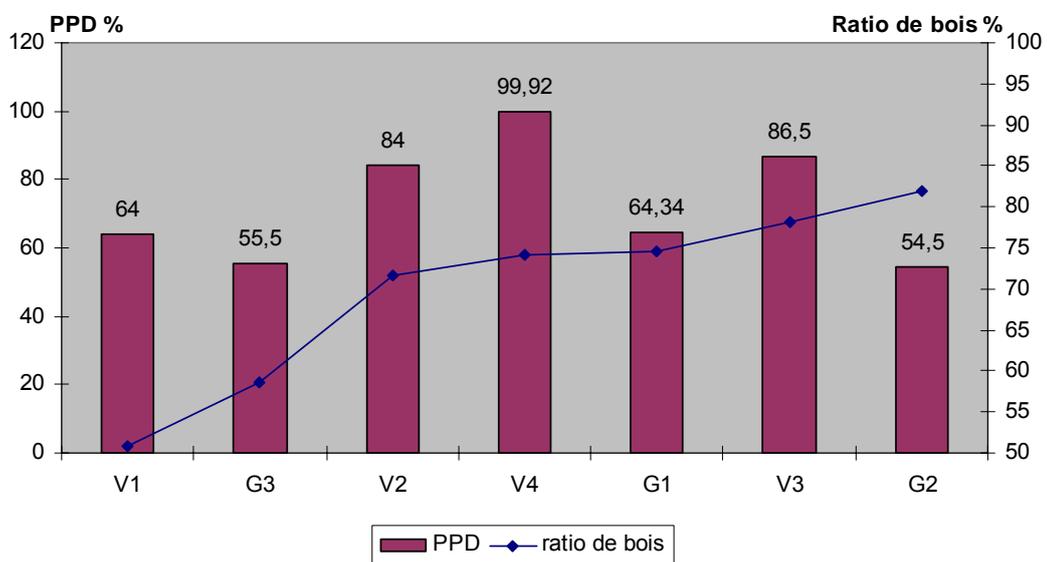


Figure 3-48 : Evolution du PPD avec le ratio de bois dans les locaux de 2 maisons (G et V) sur une saison printemps

Dans la maison la Villette, on constate que plus le ratio en bois augmente, plus l'ambiance se détériore entre V1, V2 et V3. La pièce V4 présente un PPD très médiocre alors qu'il y a moins de bois que la pièce V3.

Dans G2 ce constat est confirmé pour G3 et G1 c.-à-d. plus le ratio est grand, plus le PPD est grand donc moins l'ambiance est bonne. Mais G2 présente une ambiance meilleure avec un ratio plus important.

En comparant les deux maisons (G et V), nous constatons que les locaux se comportent différemment. Dans le graphique 3.48 nous avons classé les ratios de bois par ordre croissant. La présence de bois augmente le nombre d'insatisfaits dans chaque maison mais avec une

allure différente sauf le local G2 où le PPD est meilleurs et V4 où PPD est le plus médiocre avec pourtant un ratio entre ceux des autres.

3.7 Conclusion

Pour étudier les relations entre le revêtement en bois et l'ambiance thermique et le confort, nous avons réalisés des campagnes de mesures sur 14 études de cas.

En France, 2 maisons nous ont permis d'étudier, pendant plusieurs saisons, 7 pièces d'habitation avec des configurations de revêtement bois différentes. A Madagascar, une maison a été le support de l'étude de 4 pièces d'habitation pendant le printemps 2008.

Des données ont été recueillies in situ par des mesures en continu et ponctuelles pour caractériser l'impact thermique du bois sur les ambiances et sur le confort (en utilisant les indicateurs PMV, PPD, PIV).

Les 14 locaux d'études en France et à Madagascar présente une uniformité de température de surface en bois, cela nous a permis de considérer une température unique pour chaque paroi. Les différents ratios de bois n'ont pu différencier l'asymétrie de rayonnement dans les pièces puisqu'aucun des 14 locaux ne présente de pourcentage d'insatisfaits supérieur à 10%. De plus, les configurations de revêtement en bois de chaque local ne peuvent être comparées entre elles puisque ni les géométries ni les revêtements ne sont identiques. Cette étude comparative entre les configurations de revêtement en bois fera l'objet de l'expérimentation en laboratoire que nous allons développer dans le chapitre 4.

Nous avons constaté d'après l'analyse des mesures que le pourcentage d'insatisfaits augmente lorsque le ratio de bois augmente dans 12 locaux sur 14. Au printemps, le local V4 présente un pourcentage d'insatisfaits encore plus grand alors que le ratio est faible. Et nous avons aussi G2 où le ratio est important et le PPD est faible. Il peut alors y avoir des cas où la présence de bois seule, ne peut expliquer le PPD.

Etant donné que nous avons des résultats différents concernant l'impact du bois sur le confort thermique général et que nous n'avons pu comparer différentes configuration de revêtement

en bois dans les études in situ, nous avons effectué des mesures en laboratoire en modifiant les revêtements en bois d'un local.

Chapitre 4 : Expérimentation en laboratoire et simulation

Les études de cas en France et à Madagascar témoignent du comportement thermique particulier lié à la présence de revêtements en bois : hétérogénéité du confort thermique et variation de la perception des occupants, asymétrie du rayonnement thermique, mesures des ambiances en dehors des valeurs prédites par les normes.

Les mesures in situ n'ont pas permis d'évaluer la différence entre une ambiance intérieure avec bois et une ambiance sans bois. Des travaux de rénovation des revêtements intérieurs des habitations étudiées n'étaient pas possibles. Nous avons donc choisi de réaliser plusieurs expériences en laboratoire en transformant un local. Différentes configurations de revêtements en bois ont été mises en place. Les mesures ont ainsi été faites pour caractériser l'influence du bois sur l'ambiance thermique et le confort des occupants.

Afin de compléter l'expérimentation en laboratoire, nous avons construit des modèles de simulation à l'aide du logiciel TRNSYS. D'autres configurations de revêtements en bois ont pu ainsi être étudiées en considérant également des environnements climatiques variés.

4.1 Présentation des mesures en laboratoire

4.1.1 Description de la cellule

Les mesures in situ ont permis de répertorier les différents scénarios qui pourraient être intéressants pour étudier l'impact thermique d'un revêtement en bois. Nous avons choisi la cellule expérimentale qui se situe au Laboratoire des Sciences de l'Habitat à l'ENTPE, à Vaulx-en-Velin près de Lyon. Cette cellule, baptisée cellule HYBCELL, a déjà servi pour différents projets de recherche menés par l'équipe thermique du LASH. Dans son état initial, la cellule présente une baie vitrée verticale dont la surface représente 57%, soit 7.9m² de surface sur 13,867m² de mur en façade. La surface en aluminium représente 4,52m² et le support en béton est de 1,37m² (figure 4-1).



Figure 4-1 : façade extérieure de la cellule Hybcell

La façade est orientée nord-est (l'angle entre la normale à la façade et l'est est de 20°). De juin à août, la façade est ensoleillée jusqu'à 12h00. Les masques solaires sont précisés avec le diagramme solaire et la photo fish-eye (Figure 4-3)

Les autres murs sont intérieurs et adjacents au laboratoire B2 et B3. Le volume intérieur de la cellule est de 47,43 m³. La composition des parois est la suivante :

- Parois verticales :
 - façade extérieure (Nord-Est) : double vitrage à cadre et support en aluminium
 - Mur Nord : béton de 15 cm d'épaisseur, intérieur adjacent au laboratoire B2
 - Murs Ouest et Sud : cloisons composées de deux plaques minces en acier de 6 cm de distance et remplie par une isolation en laine de roche de 6 cm. Le mur Sud comporte une porte vitrée avec un cadre métallique de 120mm*210 mm (niveau du sol du laboratoire).

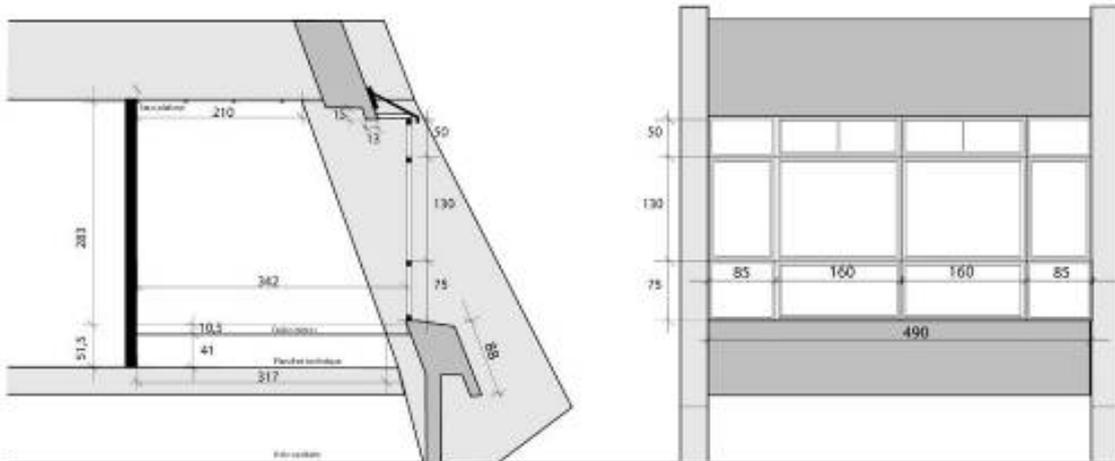


Figure 4-2 : coupe transversale et façade nord-est de la cellule

- Plancher : des dalles en aggloméré de béton de 10 cm d'épaisseur sont posées sur une épaisseur de panneaux de 4 cm formant un plancher technique de 48 cm de hauteur par rapport au sol du laboratoire B.
- Plafond : faux plafond de 15 mm d'épaisseur à une hauteur de 2,83m du plancher et suspendu à 1m en dessous de la dalle du 1^{er} étage en béton.

Les caractéristiques de la cellule sont précisées dans le tableau 4-1.

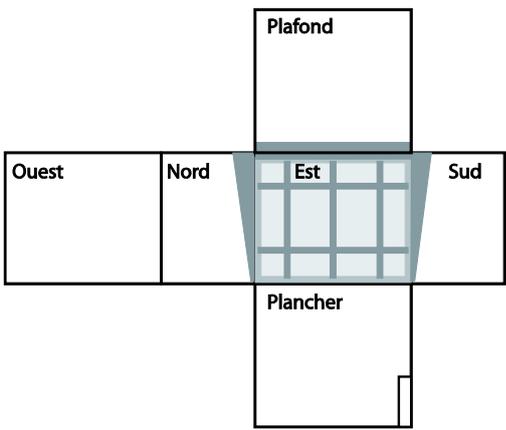
		Parois	Surface paroi(m ²)	Matériaux revêtement traitement	Couleur
		Ouest	13,867	métal	crème
Nord	9,679	béton	blanc		
Est	13,867	Vitrage /alu / béton	transparent/gris		
Sud	9,679	Métal / porte vitrée	crème		
Plancher	16,758	béton	beige		
Plafond	16,758	Faux-plafond / béton	blanc		

Tableau 4-1 Caractéristiques de la cellule à l'état initial

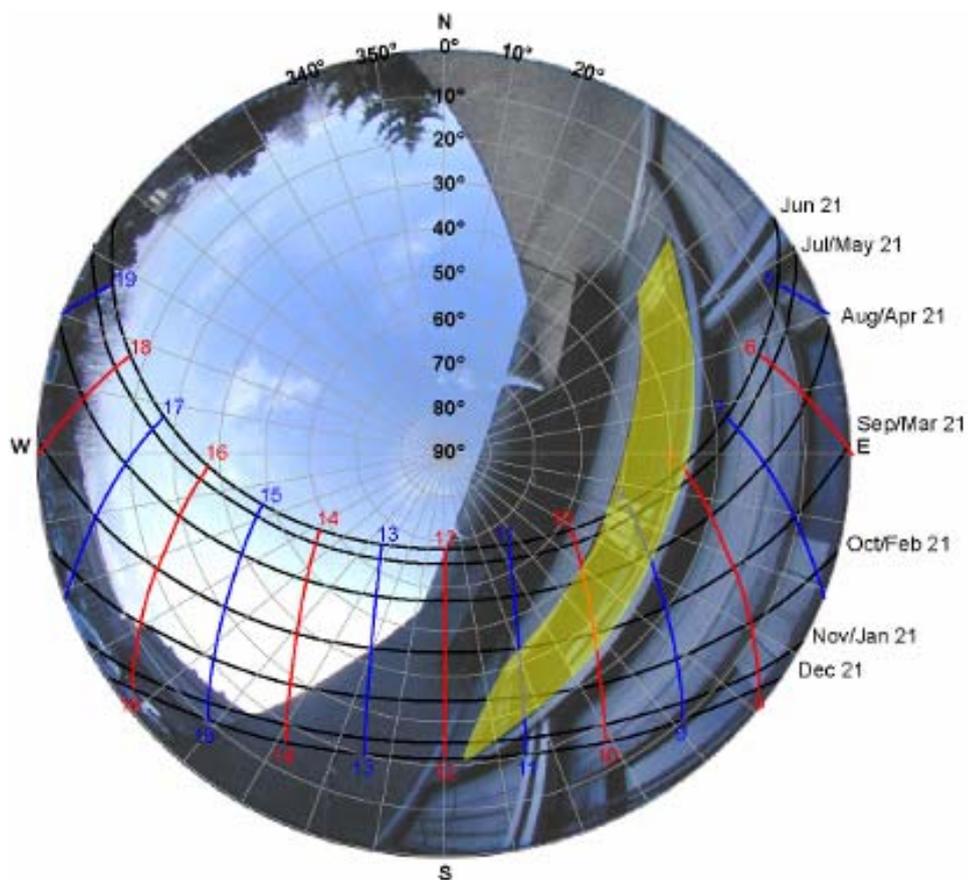


Figure 4-3 : diagramme solaire

4.1.2 Présentation de 6 configurations de revêtements en bois

Durant quatre semaines (mois de Mai 2008), nous avons transformé la cellule Hybcell pour mettre en place six configurations de revêtement en bois (tableau 4-2).

Configurations	Description des revêtements dans la cellule
Scénario 1	Murs, plancher et plafond en bois
Scénario 2	Seul le plancher est en bois
Scénario 3	Mur nord en bois
Scénario 4	Mur sud en bois
Scénario 4	Etat initial de la cellule – sans bois
Scénario 5	Plafond en bois
Scénario 6	Seul le mur ouest est en bois

Tableau 4-2 : Liste des aménagements effectués dans la cellule

Ces 6 configurations ont été définies en tenant compte des configurations rencontrées lors des mesures in situ réalisées en France et à Madagascar (voir chapitre 3). En effet,

- Tous les murs ainsi que le plancher et le plafond sont recouverts de bois : cas G1
- Tous les murs ainsi que le plancher et le plafond sont recouverts de bois à l'exception du mur Ouest et du mur Est où se situe la fenêtre : cas V2, G2, G3
- Les murs restent à l'état initial de la cellule Hybcell : ce cas sert de référence pour l'évaluation des modifications d'ambiance
- Seul le mur Ouest est recouvert de bois : cas V1
- Seul le plafond est recouvert de bois : cas M1, M2, M3, M4, M6, M7
- Seul le plancher est recouvert de bois : cas M5.

La cellule a été équipée de montants permettant d'installer les panneaux en bois de 50cm*50 cm sur les murs comme le montre la figure 4-4. L'épaisseur des revêtements en bois est de 2 cm, épaisseur conseillée par les professionnels de la construction.

En raison de contraintes techniques, nous n'avons pu disposer que d'un mois pour effectuer l'ensemble des mesures dans la cellule. Nous avons commencé par la configuration tout en

bois parce que la mise en place a été effectuée par les menuisiers. Ils ont installé les montants et les attaches de chaque panneau.

Pour le plafond, les anciens panneaux de fibres de roche ont été remplacés par des panneaux en bois de mêmes dimensions.



Figure 4-4 : Montage des revêtements en bois des murs de la cellule

Nous avons vérifié que les supports métalliques étaient assez résistants pour tout le plafond en bois. Compte tenu de cette contrainte structurelle, nous avons travaillé sur une essence de bois léger (sapin avec une masse volumique de $467,97\text{kg/m}^3$).

En ce qui concerne le plancher, les revêtements en bois reposent sur les blocs de béton qui sont en place dans la cellule initialement. Pour relier les panneaux entre eux, nous utilisons des languettes en bois qui remplissent les rainures sur les quatre cotés des panneaux

- Scenario N°1 : les murs, plancher et plafond sont en bois

Le tableau suivant présente les dimensions des revêtements en bois. Elles permettent d'obtenir les ratios que nous présentons plus tard dans l'analyse des mesures en laboratoire. C'est un des paramètres qui nous permet d'évaluer la présence de revêtement bois dans les locaux

		Plafond				
Ouest	Nord	Est	Sud			
		Plancher				
Parois	Longueur	Largeur	Epaisseur			
	(m)	(m)	(mm)			
Ouest	4,90	2,83	20			
Nord	3,42	2,83	20			
Est						
Sud	3,42	2,83	20			
Plancher	4,90	3,42	20			
Plafond	4,90	3,42	20			

Tableau 4-3 : Description du scenario 1



Figure 4-5 : scénario 1 - tout en bois

Sur la figure 4-5, nous avons une photo de la cellule lorsque tous les murs sont revêtus en bois. On procède alors par la mise en place des appareils de mesures selon le protocole présenté dans le paragraphe suivant.

- Scenario N°2 : murs nord et sud, plafond et plancher sont en bois

		Plafond					
Ouest	Nord	Est	Sud	Parois	Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (mm)
				Ouest			
				Nord	3,42	1,50	20
				Est			
				Sud	3,42	1,50	20
				Plancher	4,90	3,42	20
				Plafond	4,90	3,42	20

Tableau 4-4 : scenario 2 – murs N/S, plafond et plancher en bois



Figure 4-6 : Cellule avec le mur nord en bois

Après avoir démonté le mur ouest en bois de la configuration précédente, nous obtenons le scénario 2 qui est le revêtement du plancher, plafond et murs nord et sud en bois. On récupère les données des mesures du scénario 1 et on relance pour le scénario 2. Ce scénario 2 a été suivi de 2 autres (scénario 3 et 4) dont seul le mur nord est en bois, puis seul le mur sud est en bois. Ces 2 scénarios représentent les mêmes dimensions de surfaces en bois.

Parois	Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (mm)
Ouest			
Nord	3,42	1,50	20
Est			
Sud			
Plancher			
Plafond			

Tableau 4-5 : scenario 3 – murs Nord en bois

Parois	Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (mm)
Ouest			
Nord			
Est			
Sud	3,42	1,50	20
Plancher			
Plafond			

Tableau 4-6 : scenario 4 – murs Sud en bois

Scenario n°5: seul le plancher est en bois

Après avoir démonté les murs en bois de la configuration précédente, nous obtenons le scénario 5 (figure 4-7) qui est le revêtement du plancher en bois. On récupère les données des mesures et on relance comme précédemment.

		Plafond		Parois	Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (mm)
Ouest	Nord	Est	Sud	Ouest			
				Nord			
				Est			
				Sud			
		Plancher		Plancher	4,90	3,42	20
				Plafond			

Tableau 4-7 : scenario 5 – plancher en bois



Figure 4-7 : plancher en bois

- Scenario N°6 : Etat initial de la cellule Hybcell

Dans ce scénario, nous retrouvons l'état initial de la cellule. La photo de la figure 4-8 a été prise avant le montage des murs mais pendant les mesures, il reste les montants en bois qui supportent les panneaux de revêtement installés avant l'expérimentation.



Figure 4-8 : Etat initial de la cellule Hybcell

Comme le tableau 4-8 indique, il n'y a aucune surface en bois.

				Plafond		Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
				Parois				
Ouest	Nord	Est	Sud					
				Plancher				

Tableau 4-8 : Description du scenario 4(état initial de la cellule)

- Scenario N°7 : plafond en bois

Pour le scénario 7, nous avons remonté le plafond en bois dont les dimensions sont dans le tableau 4-7.

		Plafond		Parois	Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (mm)
Ouest	Nord	Est	Sud	Ouest			
		Plancher		Nord			
				Est			
				Sud	3,42	2,83	20
				Plancher			
				Plafond	4,90	3,42	20

Tableau 4-9 : scenario 7- plafond en bois

Le reste des parois sont à leur état dans le scénario 3.



Figure 4-9 : plafond en bois

- Scénario N°8 : mur ouest en bois

Parois	Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (mm)
Ouest	4,90	2,83	20
Nord			
Est			
Sud			
Plancher			
Plafond			

Tableau 4-10 : scénario 8 - mur ouest en bois

4.1.3 Présentation du protocole de mesures

L'analyse des résultats des mesures in situ dans les habitations en France et à Madagascar nous permet de déterminer les paramètres à considérer pour conduire l'expérimentation en laboratoire. Les paramètres à mesurer sont les suivants :

- température d'air et température des surfaces intérieures
- humidité relative de l'air et humidité de surface à l'intérieur
- température et humidité relative extérieures
- quantité de CO₂ et COV intérieur
- vitesse d'air intérieur
- émission de chaleur sur les surfaces intérieures par rayonnement
- température opérative
- température moyenne radiante

Pour cela, nous utilisons les matériels suivants :

- 1 humidificateur d'air à émission continue connue déclenché à 8h jusqu'à 16h
- 1 chauffage d'appoint avec régulateur de température d'air déclenché à 8h
- 1 caméra infrarouge : prise de photos à 9h, à 14h et à 17h30
- Station VIVO de Dantec : enregistreurs programmés pour 1heure de pas de temps,
- 1 capteur de température de surface Raytech
- 1 capteur d'humidité des revêtements en bois (TESTO)

- enregistreurs Hobo (humidité relative et température)
- 1 enregistreur Telaire 1001 relié à 1 Hobo U12-012 (pas de temps 1h) : la variation de CO₂ contenu dans la cellule pendant la période de mesure, température et humidité intérieure.

Les points de mesures sont les mêmes que pour le protocole expérimental des mesures in situ dans le chapitre 3 (figure 3-2). Nous avons effectué des mesures de températures de surface sur 6 points de chaque orientation.

Tous les instruments de mesures sont placés sur une table au milieu de la pièce pour être les plus éloignés des sources hygrothermiques : source froide (façade vitrée), source chaude (chauffage) et source d'humidité (humidificateur). Ces différentes sources sont disposées selon la norme ISO 7726 qui indique les instruments et procédures de mesures des grandeurs physiques.

Nous programmons les enregistreurs la veille de chaque série de mesures. Les mesures débutent à 9 h du matin.

A l'aide d'un programmeur d'énergie, nous faisons fonctionner l'humidificateur à 6h du matin pendant 6 heures et il est arrêté à midi (obtention d'un maximum d'humidité intérieure). Les mesures permettent d'observer la réponse de l'ambiance et des parois de la cellule pendant la journée et la nuit suivante.

Le système de chauffage régulé est mis en marche pour que l'on puisse toujours maintenir une température ambiante de 25°C. Comme il s'agit d'une saison assez chaude (mai 2008), maintenir à une température plus basse était difficile.

La cellule est inaccessible pendant les mesures (porte fermées). On assure un renouvellement d'air de 0,1m³/h par une petite ouverture de l'extérieur et l'évacuation s'effectue par l'extracteur d'air situé au plafond.

La caméra infrarouge permet de détecter les variations du comportement thermique des parois intérieures de la cellule à différents moments de la journée (9h, 14h et 18h). Les images obtenues représentent la réponse en termes d'émission de chaleur par les matériaux des parois sur l'ambiance.

4.2 Résultats et analyse des mesures

4.2.1 Evaluation du confort thermique

Nous avons créé à l'aide de MATLAB un outil de calcul permettant d'évaluer et de visualiser l'influence thermique du bois dans le local selon les modèles développés par l'AFNOR et ASHRAE. Cet outil permet de caractériser le confort thermique ressenti par l'utilisateur (annexe F).

L'influence thermique d'une paroi en bois diminuant avec la distance, il est intéressant de connaître la zone d'impact de l'ajout d'une finition en bois. Nous prenons l'exemple de l'ajout d'une finition bois sur une paroi (mur Sud qui a la plus petite surface parmi les 4 murs). D'après les résultats de calcul, nous déterminons la zone d'influence comme étant la zone où le PPD varie de plus de 1%. Sur la figure 4-10, la partie rouge représente la zone d'influence ainsi définie, la partie bleue correspond à la zone de la cellule qui ne se trouve pas sous l'influence de cette finition ($\Delta \text{PPD} < 1\%$).

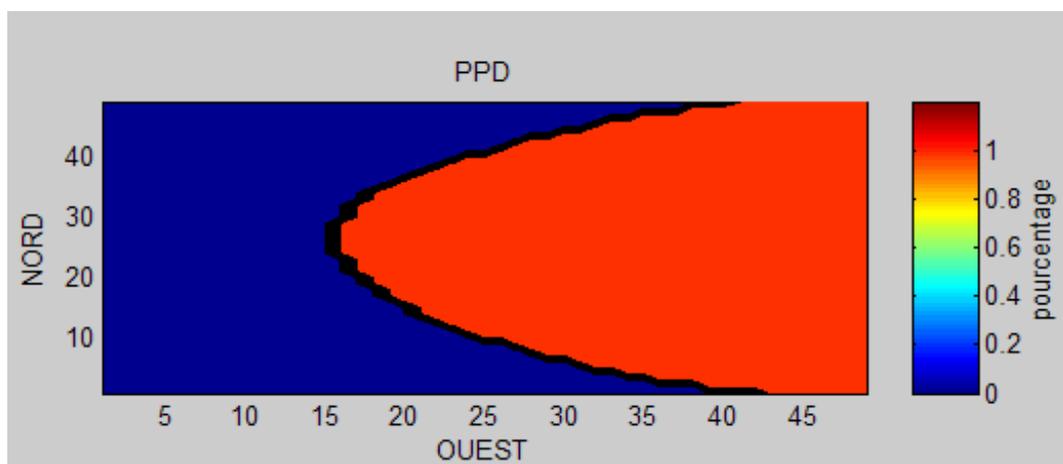


Figure 4-10 : Zone d'influence du mur Sud en bois

Nous pouvons donc noter qu'au moins 49% de la surface de la cellule Hybcell est influencé par l'ajout d'une finition en bois sur le mur sud (zone coloré en rouge sur la figure 4-10). Le mur sud est la plus petite surface des 6 orientations de parois intérieures. 49% est alors le pourcentage minimum influencée par l'ajout d'un revêtement en bois. Dans le graphique, cette influence minimum correspond à une augmentation de 1% du PPD. Il y a donc au moins 1% d'insatisfaits procurés.

Nous considérons que seuls les matériaux de finition changent, dans la mesure où toute chose est supposée égale par ailleurs.

Du point de vue du rayonnement thermique, l'influence du bois ne se limite pas ici à sa différence d'émissivité avec les autres matériaux. En effet les résultats dans la cellule montrent une différence de température de surface en fonction du matériau de finition pour une même ambiance intérieure. De plus le mur Est, composé essentiellement de verre et d'aluminium, matériaux dont la conductivité thermique est très élevée et en contact direct avec l'extérieur, a une température de surface inférieure aux autres parois

Dans le cadre de notre étude, seuls les rayonnements diffus sont pris en compte : c'est-à-dire que nous avons ignoré les tâches solaires ponctuelles pendant la journée. Par contre, nous utiliserons des valeurs de températures de surfaces qui tiennent déjà compte des apports de chaleur global (par rayonnement direct et par l'échange avec l'air intérieur et transmis par l'enveloppe de la cellule) puisque la caméra infrarouge nous indique la température réfléchie sur chaque surface. Nous avons alors relevé les températures moyennes correspondant à une paroi (une orientation). Dans ce qui suit, nous présentons des résultats correspondant à une situation d'ambiance parmi celles que nous avons pu répétées pour les différents scénarios de configurations de revêtement en bois.

La température d'air : $T_{air} : 23^{\circ}\text{C}$,

L'humidité relative de l'air : $HR : 50\%$,

La température au plafond $T_{plafond} = 26^{\circ}\text{C}$, la température du plafond ne varie pas quelque soit le matériau de finition.

La température moyenne du mur Est reste à $T_{mur\ Est} = 16^{\circ}\text{C}$ puisqu'il n'y a aucune modification de revêtement.

L'analyse des résultats obtenus à l'aide des deux modèles (ASHRAE et ISO7726) pour les huit configurations montre un écart de 2% des valeurs du PPD. Afin de conserver la référence aux normes, le modèle ISO 7726 sera utilisé dans la partie de cette étude ayant pour objectif le calcul du PMV/PPD moyen dans le local. Nous notons également que le temps de calcul entre les deux approches est différent. En effet, le modèle ASHRAE permet certes d'avoir

accès à plus d'informations, mais le temps de calcul est de 20 secondes contre 2 secondes pour le modèle ISO.

- La configuration sans bois

Les valeurs correspondant à la configuration sans bois serviront de références comparatives par rapport aux autres scénarios de revêtements en bois. Nous obtenons un PMV moyen de -0.1 et un PPD moyen : 5.3% correspondant aux personnes insatisfaites.

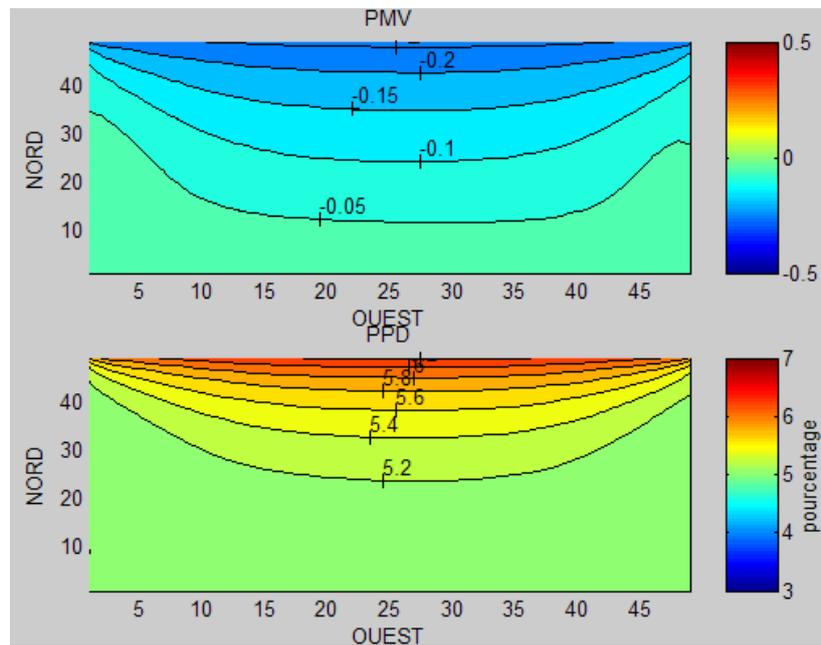


Figure 4-11 : PMV et PPD pour la configuration sans bois

Nous constatons qu'aux abords du mur Est nous avons les PMV les plus négatifs (paroi froide) et où il y a le plus d'insatisfaits (couleur rouge dans l'échelle de couleur).

- La configuration tout bois

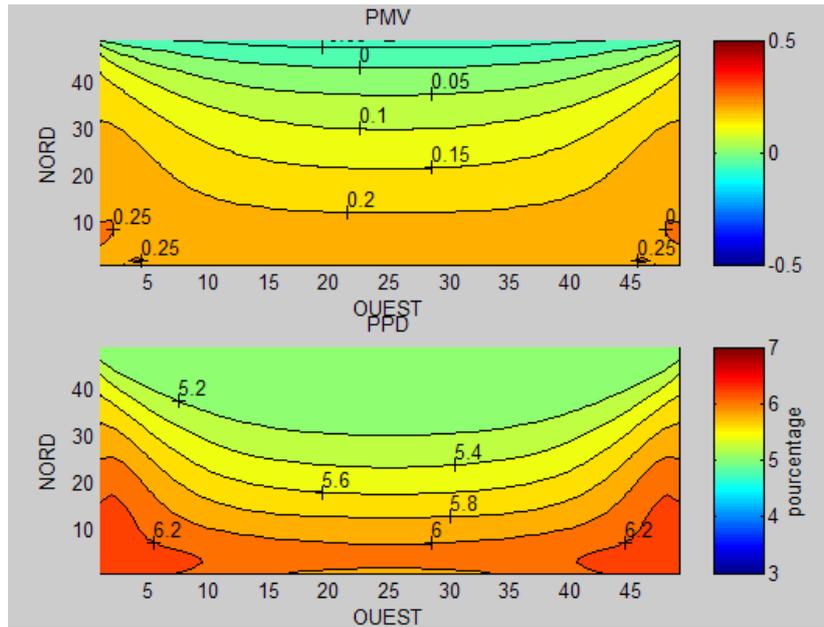


Figure 4-12 : PMV et PPD pour une finition tout bois

PMV moyen de 0.15 PPD moyen de 5.6% de personnes insatisfaites

On observe une augmentation de 5,6% du PPD par rapport à la configuration sans bois. De plus la zone d'inconfort qui se situait auparavant près de la fenêtre se trouve être maintenant près des angles entre les murs Ouest, Nord et Sud. Le PMV est positif ce qui exprime le fait que les occupants se situent dans une ambiance qu'ils jugeraient plus chaude que dans la configuration sans bois.

- La configuration plafond bois

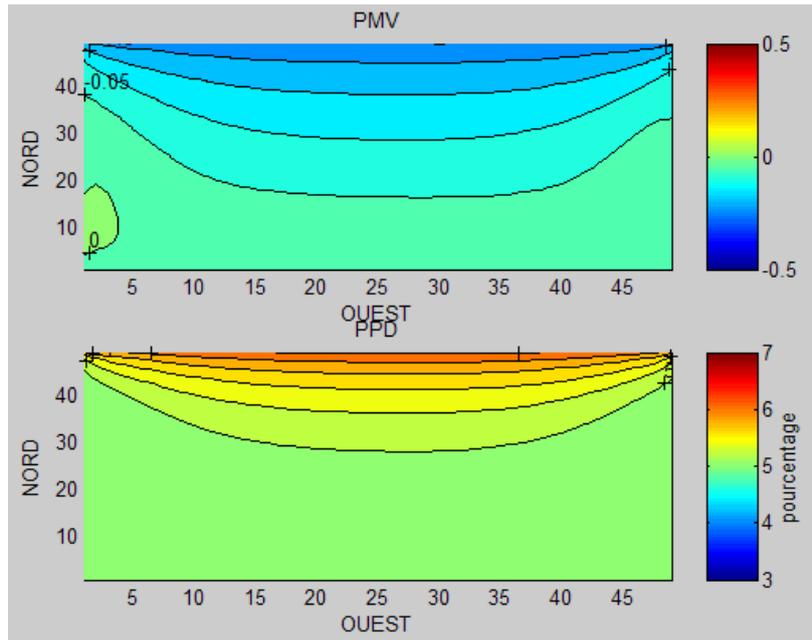


Figure 4-13 PMV et PPD pour un plafond bois

PMV moyen de -0,08 PPD moyen de 5.22% de personnes insatisfaites

Le PMV négatif indique que l'ambiance est très légèrement fraîche. Le nombre de personnes insatisfaites a diminué de 1,5 %. On remarque l'apparition d'une zone de thermo-neutralité à l'angle des murs Nord et Ouest. Cette diminution du PPD est due à l'augmentation de l'émissivité du plafond. Ceci a pour conséquence une augmentation des échanges radiatifs entre le plafond « chaud » et l'individu. Or l'ambiance étant jugée légèrement fraîche, l'augmentation de l'apport calorifique du rayonnement vers l'occupant diminue sa sensation de fraîcheur.

- La configuration plancher bois

Cette configuration semble être la plus intéressante. En effet elle permet de diminuer de 3,8% le PPD et dégage une large zone de neutralité thermique. Ceci est principalement dû à la diminution de la conductivité thermique du sol par l'ajout de bois sur le béton.

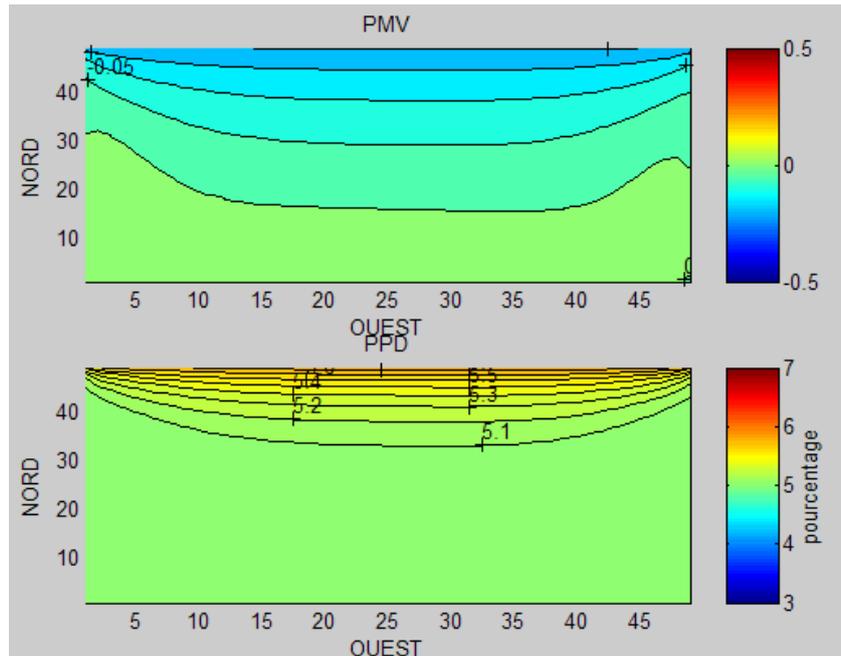


Figure 4-14 : PMV et PPD pour un plancher bois

PMV moyen de -0,04 et PPD moyen de 5,11% de personnes insatisfaites

On observe alors une augmentation de la température de surface du sol de 2°C. Seule la présence de la fenêtre et donc de la faible température de la paroi provoque encore une légère sensation de fraîcheur à son abord, il s'agit de la zone représenté en rouge orangé sur la figure 4-14. La couleur verte représente la zone où le PPD est autour de 5,1% d'insatisfaits.

- La configuration mur bois

Pour la configuration d'un mur recouvert d'une finition bois nous avons effectué trois évaluations, une pour chaque mur dont il est possible de changer la finition (les murs Nord, Sud et Ouest). Les résultats sont représentés par les figures 4-15, 4-16 et 4-17.

Il y a ici deux cas bien différents, la substitution de la finition d'origine par le bois pour les murs Nord et Sud et le cas du mur Ouest.

Les murs Nord et Sud permettent respectivement une augmentation de 2,3% et 2,6% du PPD par rapport à la configuration d'origine. La différence entre les deux parois provient du fait que les matériaux de finition n'étaient pas les mêmes à l'origine sur la paroi Nord et sur la paroi Sud (comme explicité dans le paragraphe 4.1.1 sur la description de la cellule). La modification des propriétés de la paroi n'est donc pas la même puisque pour le mur Nord

seule la température de surface varie, alors que pour le mur Sud l'émissivité de la paroi augmente aussi passant de 0,9 à 0,95.

La configuration où l'un des murs Nord ou Sud est en bois permet tout de même d'améliorer le confort à l'intérieur du bâtiment. De plus l'ajout, dans la cellule Hybcell, de bois sur la paroi Sud est plus intéressant que sur la paroi Nord. Ceci permet en effet de créer deux zones de thermo-neutralité comme on peut le remarquer sur la figure 4-15, l'une plus importante en terme de surface aux abords de la paroi Sud une autre plus petite aux abords de la paroi Nord.

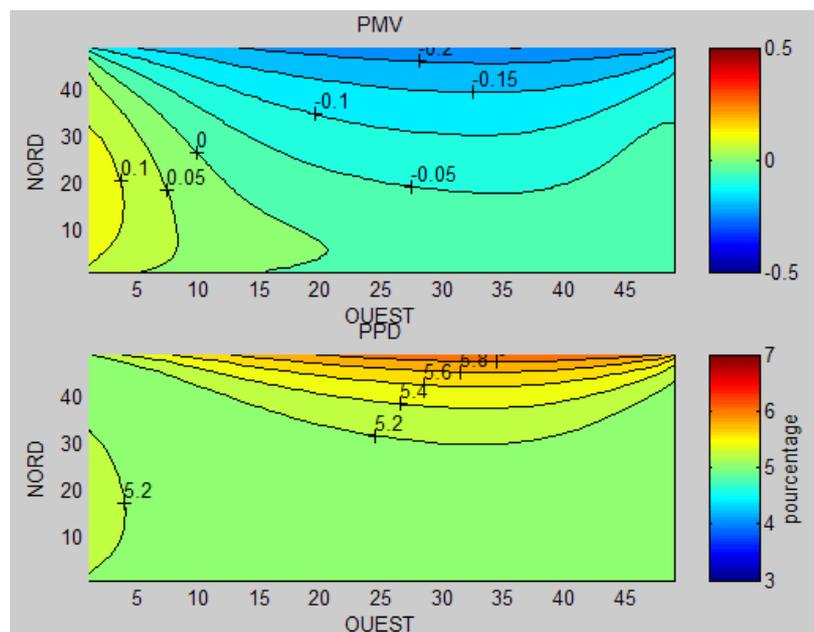


Figure 4-15 : PMV et PPD pour le mur nord en bois

Le PMV moyen correspondant à un mur nord en bois est de -0,05 et PPD moyen de 5.18% de personnes insatisfaites.

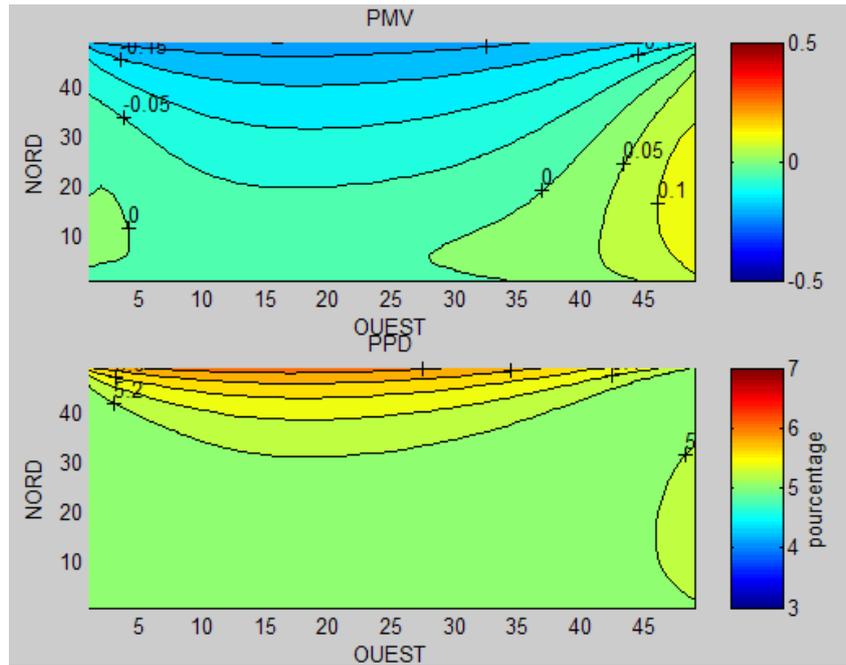


Figure 4-16 : PMV et PPD pour le mur sud en bois

Le PMV moyen correspondant à un mur sud en bois est de -0,04 et le PPD moyen est de 5.16% de personnes insatisfaites. La zone colorée en vert sur l'image du bas la figure 4-16 est proche cette moyenne de PPD, la valeur du PMV tend vers le négatif (bleu) au fur et à mesure que l'on s'approche de la fenêtre et de même pour le PPD, là où la gamme de couleur tend vers le rouge, le PPD augmente c'est-à-dire qu'il y a plus d'insatisfaits aux abords de la fenêtre.

L'ajout de bois sur la paroi Ouest permet d'améliorer le confort puisque le PPD diminue de 2,3% c'est-à-dire PPD de 5,3% d'insatisfaits (valeur initiale) à 5,18% d'insatisfait : figure 4-17. Cependant cette configuration implique le risque d'une augmentation du nombre de personnes insatisfaites du fait de l'asymétrie de rayonnement. En effet cette configuration a pour conséquence de mettre une paroi froide en face d'une paroi chaude.

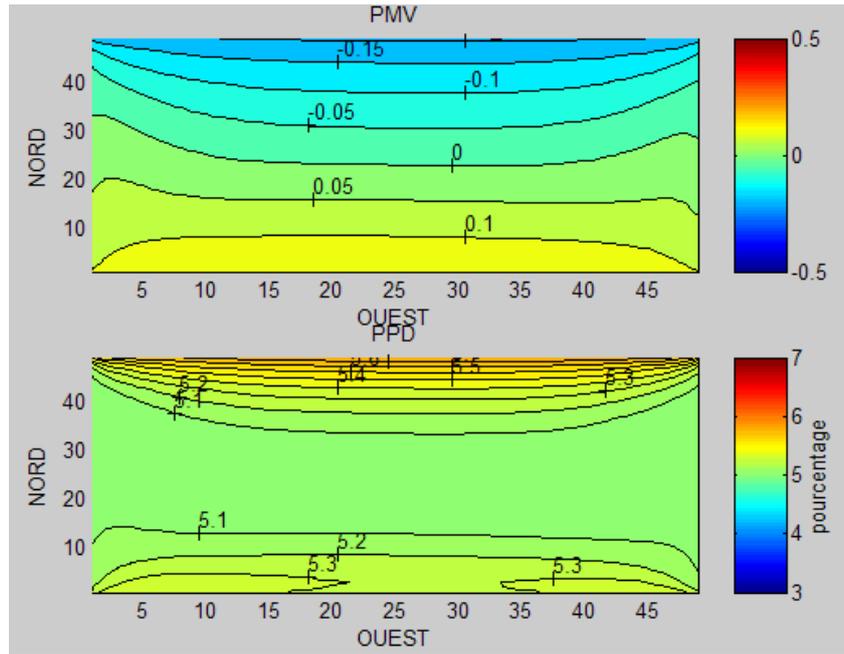


Figure 4-17 : PMV et PPD pour le mur ouest en bois

Dans cette configuration de mur ouest en bois, nous avons un PMV moyen de -0,05 et un PPD moyen de 5.18% de personnes insatisfaites

Ces résultats permettent d'évaluer l'influence de la finition bois sur le confort intérieur de la cellule. Ils montrent qu'il est possible d'améliorer ce confort en optant pour la bonne configuration. Parmi les 7 scénarios étudiés ci-dessus, et dans le cadre des hypothèses effectuées, le plancher bois est la configuration la plus performante.

Cependant une évaluation avec les mêmes hypothèses, mais en augmentant la température de consigne de 4°C, montre que le plancher bois est alors un aménagement défavorable en terme de confort thermique. Le PPD augmente alors de 7% par rapport à l'état initial. Il est donc nécessaire de faire de nouvelles évaluations à chaque fois que l'on cherchera à optimiser la configuration des finitions intérieures.

4.2.2 Evaluation de l'inconfort dû à l'asymétrie de rayonnement

Une évaluation du confort thermique global faite à partir du PMV (ou PPD) ne rend pas compte de ces inconforts locaux ressentis par l'occupant, puisqu'il est calculé à partir d'une température moyenne de rayonnement. L'évaluation de l'influence des revêtements en bois

doit donc être complétée.(voir la présentation de l'outil dans le chapitre 2, paragraphe 2.4.2 et dans l'annexe D qui explique son utilisation).

- L'état initial

Nous avons calculé alors initialement le PIV correspondant à la cellule sans aucun revêtement intérieur en bois. Nous obtenons un PIV moyen de 0,66% d'insatisfaction à l'asymétrie du rayonnement.

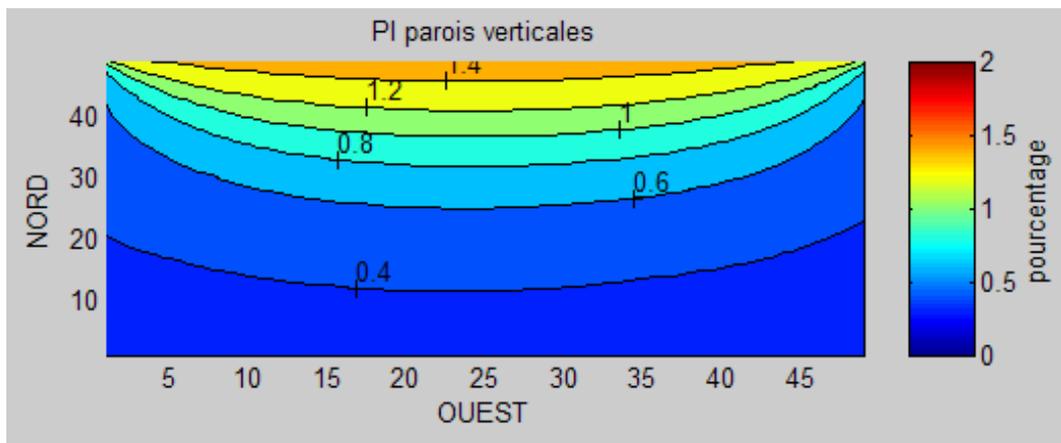


Figure 4-18 : PIV pour la configuration sans bois

PIV: 0,66 %

La valeur moyenne de 0,66% obtenue sert de référence pour caractériser l'influence de la finition bois dans la cellule Hybcell

La paroi Est, correspondant à la fenêtre plus froide que les autres parois, est responsable d'une importante asymétrie de rayonnement et par conséquent c'est à ses abords que l'inconfort est maximal.

- La configuration tout bois

La simulation effectuée pour un revêtement en bois sur tous les murs, le plancher et le plafond donne les un PIV moyen de 0,98%.

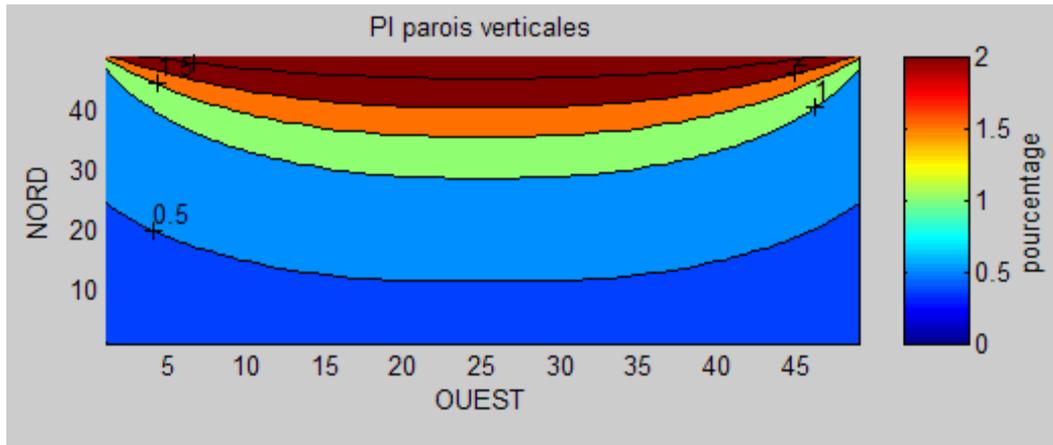


Figure 4-19 : PIV pour la configuration tout bois

La configuration tout bois en ajoutant des parois chaudes de forte émissivité amplifie la sensation d'inconfort due à l'asymétrie entre les parois verticales. Nous pouvons donc observer une augmentation de 0,66% à 0,98% d'insatisfaits (qui correspond à une augmentation autour de 50% de la valeur de référence). Sur la figure 4-19, la zone proche des murs colorée en bleu correspond à une zone confortable et la situation se dégrade lorsqu'on s'approche de la fenêtre.

- Les configurations plafond et plancher bois

Les évaluations effectuées pour les configurations plancher bois et plafond bois montrent qu'il n'y a aucune influence de ces aménagements sur les asymétries de rayonnement provenant des parois verticales.

Comme pour le confort thermique global nous pouvons distinguer deux résultats. L'ajout de bois sur les parois Nord et Sud a un impact similaire avec une augmentation de près de 10% du pourcentage d'insatisfait initial. Ceci est dû à l'ajout d'une paroi chaude avec une émissivité importante. La zone d'inconfort se situe à l'angle entre la façade Est et la paroi en bois.

- La configuration mur bois

De même que pour le confort global nous avons effectué trois scénarios, un pour chaque mur dont il est possible de changer la finition (les murs Nord, Sud et Ouest). Les résultats des simulations sont représentés dans les figures 4-20, 4-21 et 4,22)

Nous pouvons distinguer deux résultats. L'ajout de bois sur les parois Nord et Sud a quasiment le même impact avec une augmentation relative de près de 10% du pourcentage d'insatisfaits et un impact nul sur l'asymétrie de rayonnement des faces horizontales. Ceci est dû à l'ajout d'une paroi en bois, plus chaude et avec une émissivité importante de 0,90

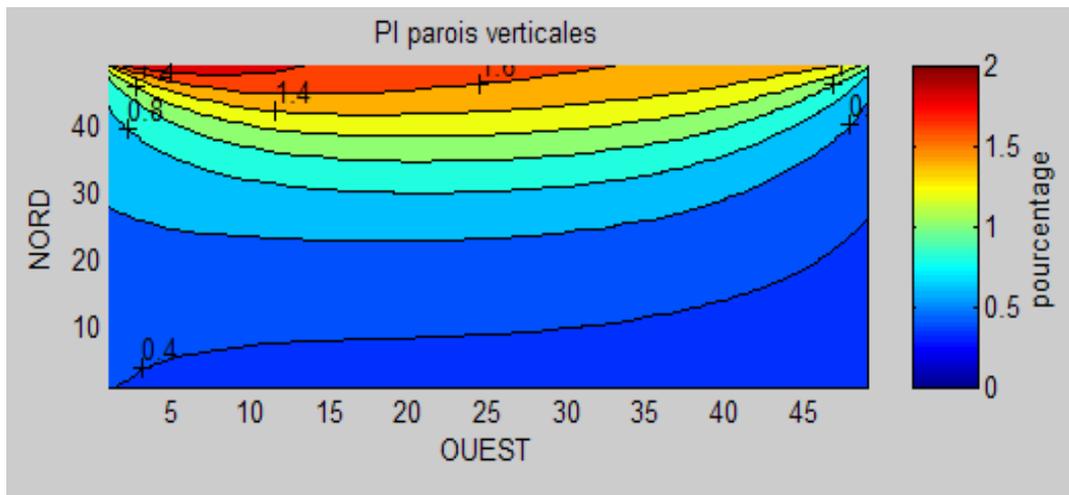


Figure 4-20 : PIV pour un mur nord en bois / PIV=0,73 %

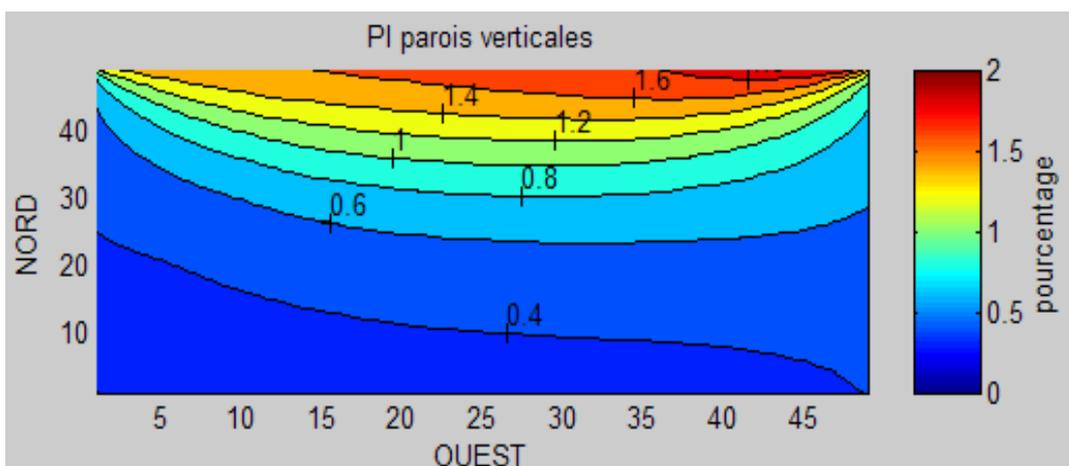


Figure 4-21 : PIV pour un mur Sud en bois / PIV=: 0,72 %

L'ajout d'une finition bois sur le mur Ouest est plus intéressant. En effet bien que cette finition diminue le nombre d'insatisfaits dans le PPD du confort global, elle induit une augmentation importante du nombre d'insatisfaits de l'asymétrie de rayonnement. En effet la paroi en bois chaude est face à la fenêtre froide et créer ainsi la gêne la plus importante observée entre les différentes configurations avec 42% d'insatisfaits supplémentaires (PIV passe de 0,66% à l'état initial de la cellule à 0,94%)

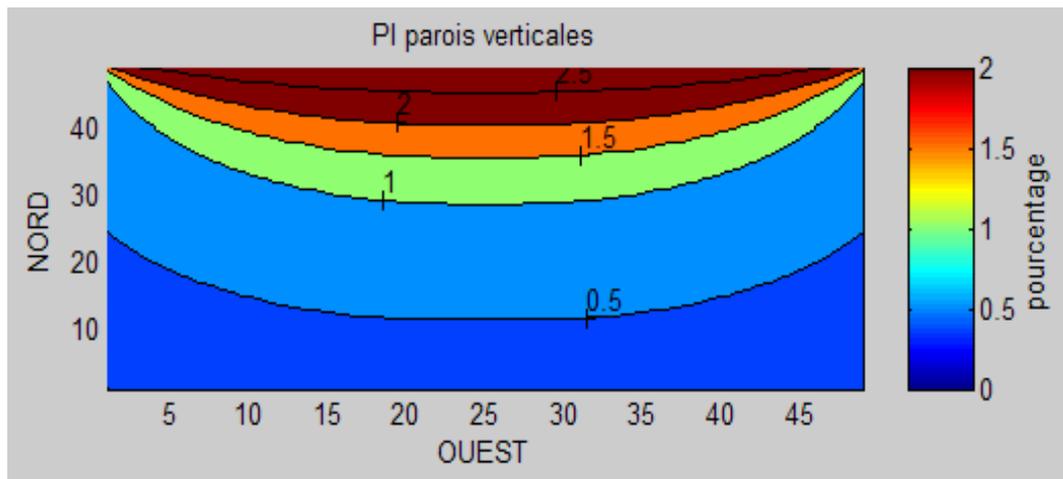


Figure 4-22 PIV pour un mur Ouest en bois / PIV= 0,94 %

A l'exception du plancher et du plafond, l'ajout de bois sur les parois a un impact négatif (le bois aux murs augmente le PIV sur le confort pendant une saison chaude comme celle observée lors du printemps 2008. La paroi Ouest est celle dont l'impact est le plus important gênant.

Le tableau 4-11 résume les résultats obtenus des sept modifications d'ambiance par le revêtement en bois. Les valeurs sont exprimées en pourcentage relatif par rapport aux valeurs initiales calculées pour la cellule Hybcell en configuration sans bois.

Configuration	PPD	PIV
Tout bois	+5,6%	+50%
Plancher bois	-3,8%	0
Plafond bois	-1,5%	0
Mur Nord bois	-2,3%	+10%
Mur Sud bois	-2,6%	+10%
Mur Ouest bois	-2,3%	+42%

Tableau 4-11 : Tableau récapitulatif des valeurs de PPD et PIV

Par exemple l'écart relatif du PPD entre la configuration initiale et la configuration mur Nord en bois est de 2,3%. Le signe – indique une diminution du PPD, le signe + une augmentation. Il en est de même pour le PIV. Les couleurs vertes dans le tableau 4-9 indiquent une amélioration du confort par rapport à la situation initiale. La configuration plancher bois est donc optimale et permet d'améliorer le confort thermique à l'intérieur de la cellule.

4.2.3 Analyse des 6 configurations avec le ratio de bois

Si l'on utilise le ratio de bois présent dans les scénarios de revêtement, nous obtenons les résultats donnés dans le tableau 4-12.

Configuration	Ratio bois %	Nombre de parois bois
Tout bois	82.84	5
Plancher bois	20.88	1
Plafond bois	20.88	1
Mur Nord bois	9.89	1
Mur Sud bois	11.97	1
Mur Ouest bois	17.15	1

Tableau 4-12 : Ratio de bois dans les scénarios de revêtement

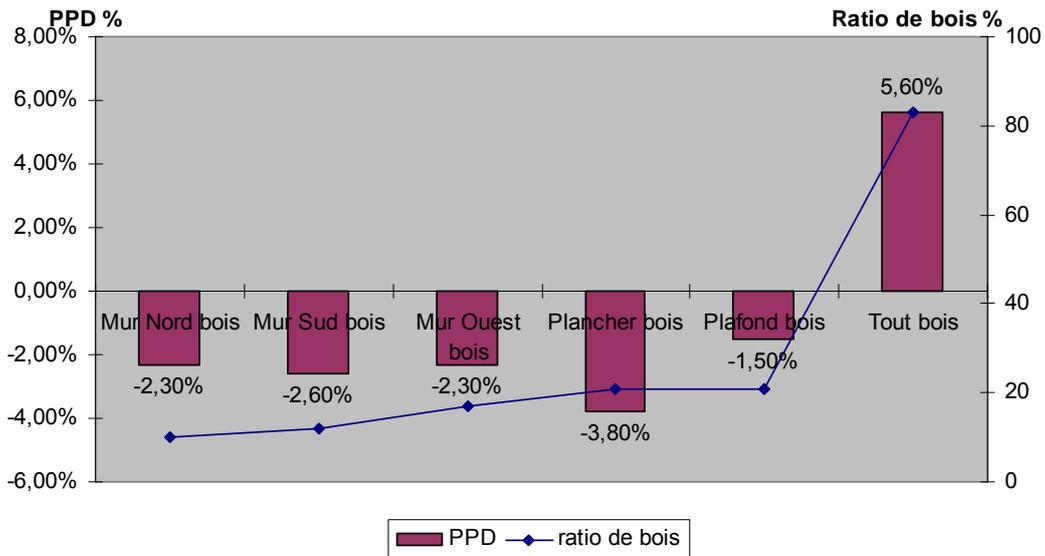


Figure 4-23 : Evolution du PPD avec le ratio de bois

D'après cette figure 4-23, nous avons tracé dans l'ordre croissant le ratio de bois. Nous constatons que le ratio de bois augmente le PPD c'est-à-dire que plus on ajoute une surface de bois dans la cellule, plus il y a d'insatisfaits au confort général. Nous avons représenté les différences en PPD par rapport à l'état initial de la cellule Hybcell (au lieu de la valeur réelle de PPD). Les valeurs de PPD en laboratoire correspondent à des ambiances intérieures courantes et non extrêmes comme ce que l'on retrouvait in situ. La situation courante de la cellule pendant la période de mesure a une température moyenne d'air de 23°C et une HR 50%. Si l'on compare entre eux les résultats des revêtements bois au sud, ouest, plafond et tout bois, l'augmentation du ratio de bois détériore le confort global dans la cellule et cela confirme les remarques que nous avons rencontrées dans 12 cas in situ. Mais par contre, par rapport à l'état initial de la cellule, seul le scénario tout bois détériore véritablement l'ambiance.

Le cas de plancher en bois ne répond pas à la tendance des autres scénarios puisque d'après la figure 4-23, le ratio augmente mais le pourcentage d'insatisfaits PPD diminue de -3,8% par rapport à la valeur initiale sans bois. Le cas de plancher a alors le meilleurs PPD.

4.3 Modélisation et simulation de revêtements en bois

4.3.1 Modélisation à l'aide de TRNSYS

Ne pouvant utiliser la cellule Hybcell pendant plusieurs saisons, avec des scénarios de configuration variés et des conditions climatiques maîtrisées, nous avons construit des modèles du local avec le logiciel TRNSYS16. Il s'agit d'un logiciel dédié à l'étude du comportement thermique du bâtiment et un solveur de systèmes d'équations capable de réaliser des simulations dynamiques. Il est basé sur une approche modulaire et permet de créer de nouveaux modèles et d'y intégrer en plus ceux de la bibliothèque. La bibliothèque contient quelques 50 familles de composants permettant de simuler, en régime transitoire, les bâtiments (mono- ou multizonal), les systèmes de chauffage et de climatisation. Comme nous avons exploité nos mesures en utilisant Excel et Matlab, la version TRNSYS16 permet d'appeler ces programmes et les coupler avec les autres types via un nouveau composant 'type 155'.

TRNSYS permet de modéliser le comportement thermique d'un bâtiment à travers le type 56 inclus dans la bibliothèque. Le type 56 requiert en entrée la description physique du bâtiment ainsi que les gains internes et les débits d'échange d'air et détermine en sortie un grand nombre de variables dont les températures d'air et opérative, l'humidité relative, les quantités de chaleur sensibles et latentes. TRNSYS16 propose un outil spécial 'TRNBLD' qui permet de faciliter la saisie d'un bâtiment afin de créer les fichiers d'entrée nécessaires pour le type 56. Le type 56 est utilisé avec un pas de temps d'une heure. Les descriptions du modèle physique du type 56 ainsi que les caractéristiques des modèles sont disponibles dans le manuel de TRNSYS16.

Comme pour les mesures in situ et en laboratoire, nous avons utilisé le diagramme psychrométrique. TRNSYS dispose du type 33d (dans la figure 4-24, c'est l'étape étude psychrométrique) pour effectuer les calculs directement. Ainsi, en entrée, nous donnons deux paramètres de l'état de l'air intérieur généré par le type 56 (dans notre cas : humidité relative et température d'air) et il donne en sortie la température de rosée, enthalpie, humidité spécifique. Nous comparons ensuite cette température avec les températures de parois pour déterminer la pathologie de condensation qui pourrait apparaître à l'intérieur.

En ce qui concerne la part de stockage en humidité par le bois, nous avons défini dans l'interface TRNBUID les propriétés hygroscopique du bois utilisé. L'état de l'air intérieur est alors paramétré par l'ajout d'un revêtement en bois sur une ou plusieurs parois, on doit fournir l'épaisseur, l'essence (ou à défaut on fournit la masse volumique et la conductivité thermique), la surface, position (orientation).

Nous avons choisi de mettre en avant la part de rayonnement qui entre en jeu dans les échanges thermique entre le bois et l'ambiance afin d'utiliser le stockage de chaleur et son émissivité. Ainsi, les simulations nous informent s'il y a modification d'ambiance lorsqu'on introduit une surface de revêtement en bois. La prise en compte des données d'entrée est dans l'interface TRBUILD ou on décrit la cellule avec des données sur l'enveloppe dans la figure 4-24. La température moyenne radiante est donnée en sortie des simulations et s'affiche avec les températures des 6 parois intérieures, l'évolution de l'humidité relative et la température d'air intérieur. L'enchaînement des calculs est représenté dans la figure 4-24.

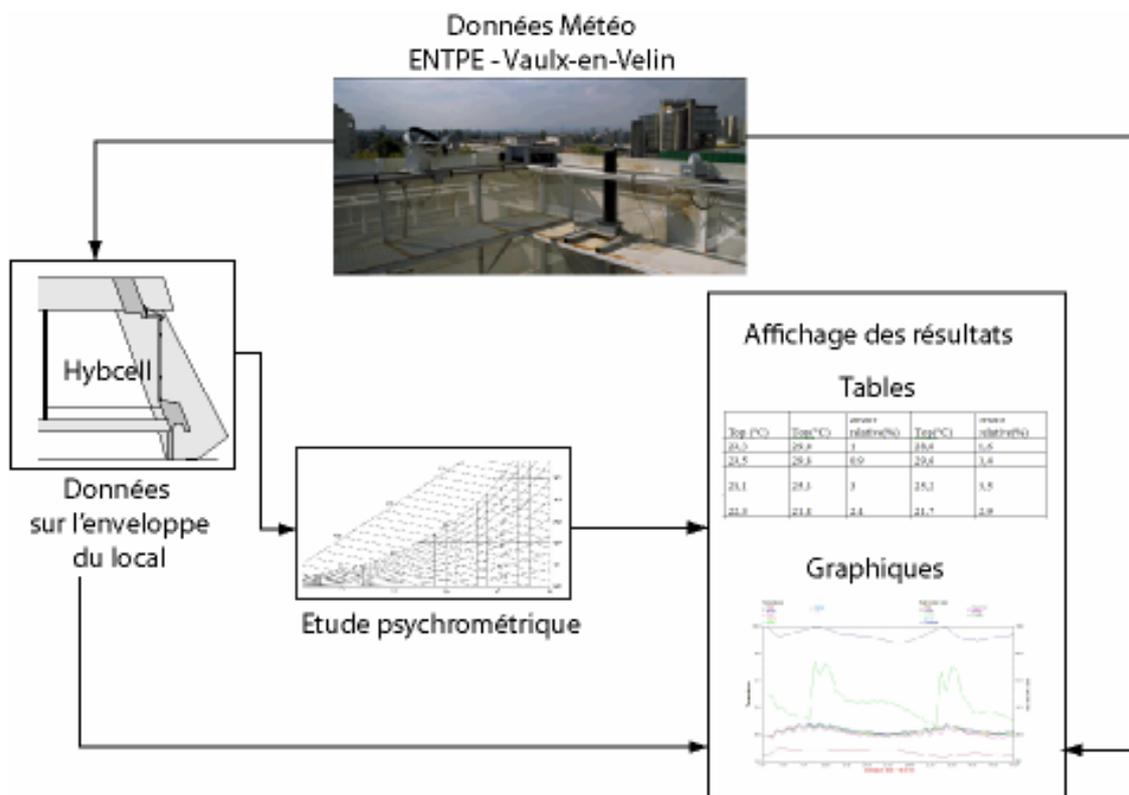


Figure 4-24 : représentation des enchainements de calcul

Pour vérifier si le modèle de cellule défini dans TRNBUILD correspond aux comportements réels, nous avons comparé les températures et humidité relative mesurées pendant l'expérimentation en laboratoire (mai 2008) et celles que nous obtenons lorsqu'on utilise les données météo correspondant à cette période.

Nous avons effectué un étalonnage du modèle en faisant entrer des données climatiques réellement mesurées sur le site du Laboratoire. Aussi, nous avons simulé la température trouvée dans le local pour les scénarios. Ici, le scénario représenté est le cas de tout en bois.

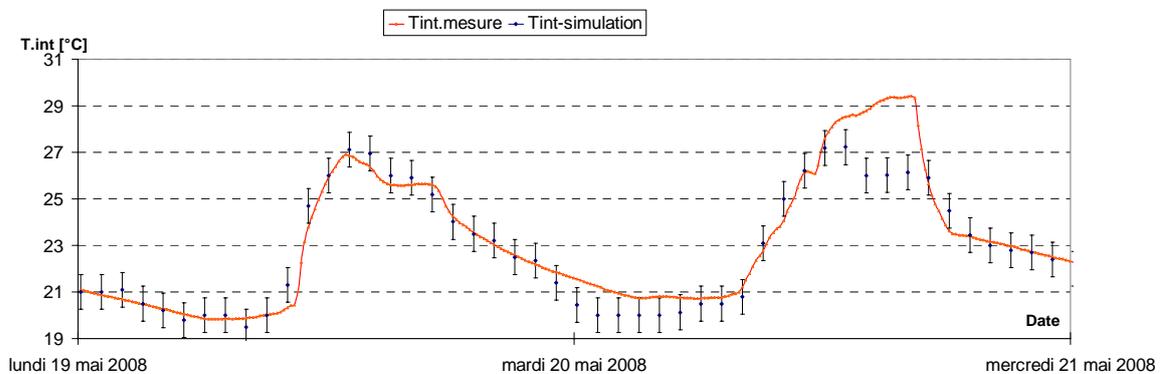


Figure 4-25 : prise en compte des différences entre mesures et simulations

Après comparaison, nous avons constaté quelques anomalies que le modèle n'a pas prises en compte, comme par exemple un pic de température survenue dans la cellule pour certains jours (2^e jour du scénario tout bois). Néanmoins, nous avons une bonne tendance des valeurs (figure 4-25). Nous avons tracé les résidus (différence entre les valeurs simulées et les mesures), ensuite, nous avons calculé l'écart-type de ces différences et qui équivaut à 0,745. Cette valeur est assez faible pour dire que les valeurs des écarts tournent autour de la moyenne des écarts entre les mesures et les simulations (écart moyen=0,5°C).

De plus, compte tenu de la précision des mesures de température in situ ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) nous avons constaté que les points simulés entrent dans le faisceau de températures mesurées sauf aux extrêmes qui sont dus à des phénomènes ponctuels en laboratoire (figure 4-26).

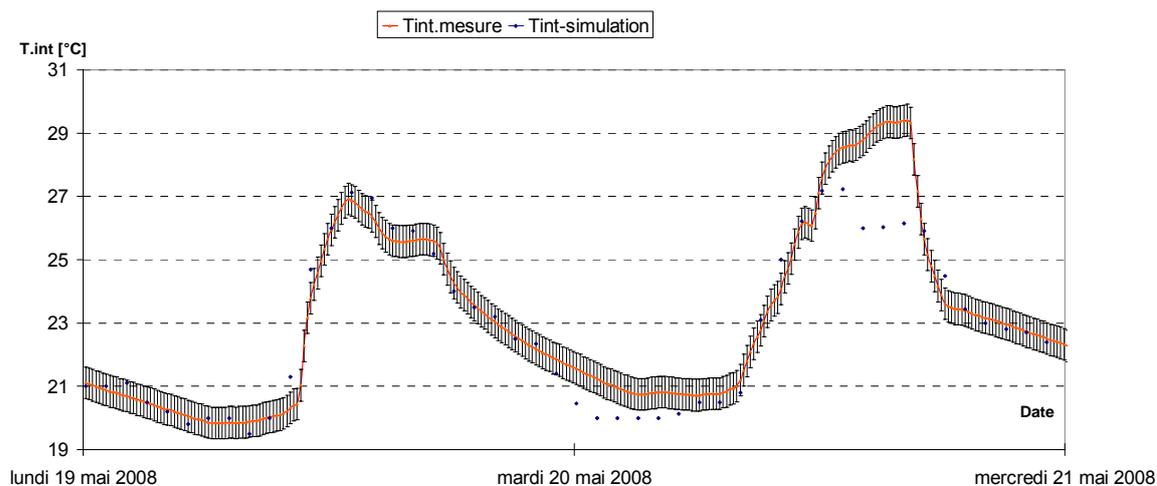


Figure 4-26 : prise en compte de la précision des mesures sur les simulations

Aussi, grâce à cet étalonnage des différents scénarios, nous pouvons continuer les comparaisons entre différents scénarios pour les mêmes données météo. Cependant, étant données que les mesures sur un scénario ne durent que 2 jours au maximum au laboratoire, les résultats obtenus correspondent alors à des phénomènes assez courts, et ne tiennent pas compte du comportement dynamique d'une ambiance sur plusieurs jours, voir plusieurs mois.

4.3.2 Etude de 8 modèles de simulation de revêtements intérieurs

Modèles	Description du modèle
Scénario 1	Murs, plancher et plafond en bois
Scénario 2	Seul le plancher est en bois
Scénario 3	Mur nord et sud, plafond et plancher en bois
Scénario 4	Etat initial de la cellule – sans bois
Scénario 5	Plafond en bois
Scénario 6	Seul le mur ouest est en bois
Scénario 7	Plafond et plancher en bois
Scénario 8	Mur ouest, plancher et plafond en bois

Tableau 4-13 : liste des 8 modèles construits avec TRNSYS

Nous avons effectué la modélisation de la cellule Hybcell décrite précédemment. Nous avons choisi des périodes de simulation d'une période en hiver, une autre au printemps et une en été et enfin en automne.

Nous avons effectué des comparaisons des températures et humidités entre les différents scénarios. Nous avons effectué 30 jours de simulation avec un pas de temps horaire. Pendant les simulations, l'humidification est lancée tous les jours entre 8 h et 12 h pour observer la réponse de l'ambiance avec les scénarios de bois. Ce sont des consignes que nous avons rencontrées dans les mesures en laboratoire. De même, le chauffage est lancé entre 8h et 16h pour avoir une température de 20°C.

L'épaisseur de bois sur les murs est de 2cm. Il s'agit de sapin que l'on définit dans la bibliothèque de TRNBUILD.

On a défini un renouvellement d'air par infiltration de 0,6 vol/h pour retrouver les valeurs que nous avons in situ et dans les mesures en laboratoire.

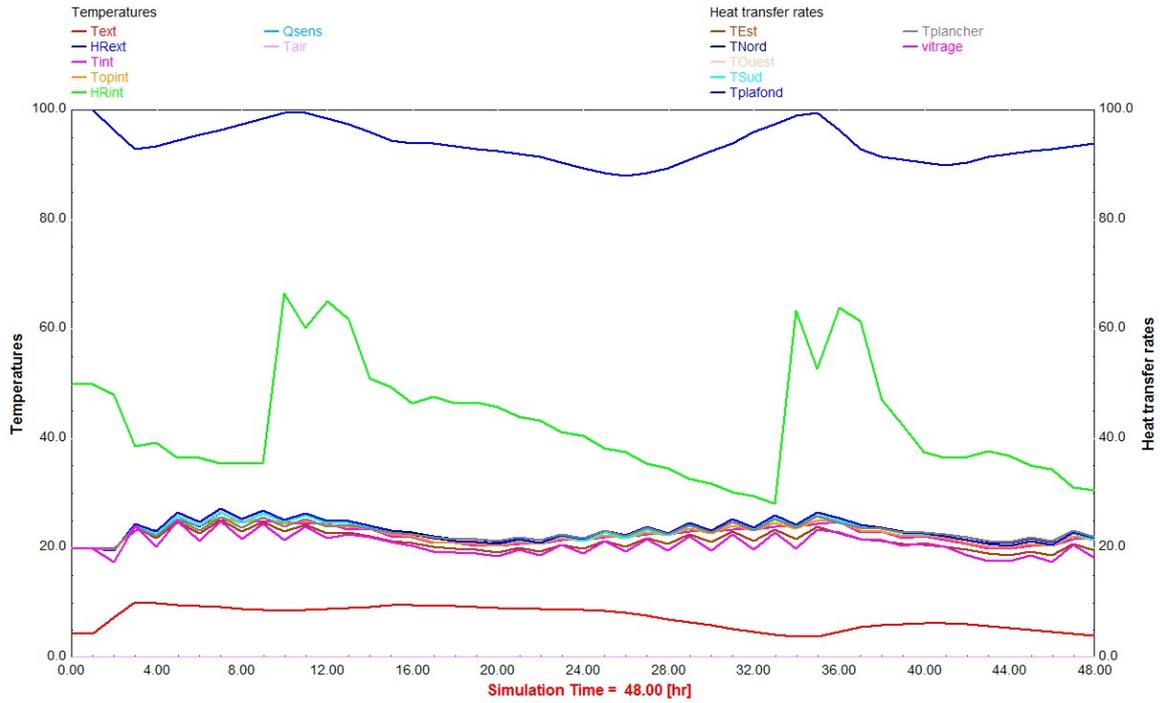


Figure 4-27 : scenario de revêtement en bois des murs nord et sud

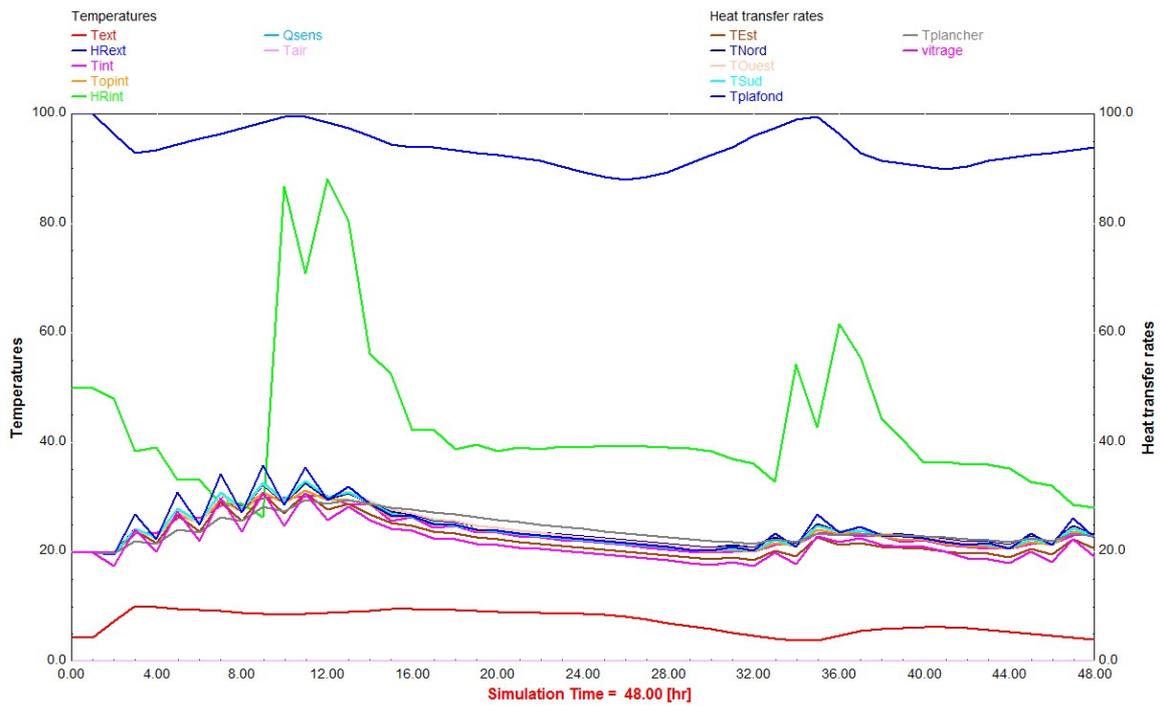


Figure 4-28 : scenario de revêtement en bois du mur ouest

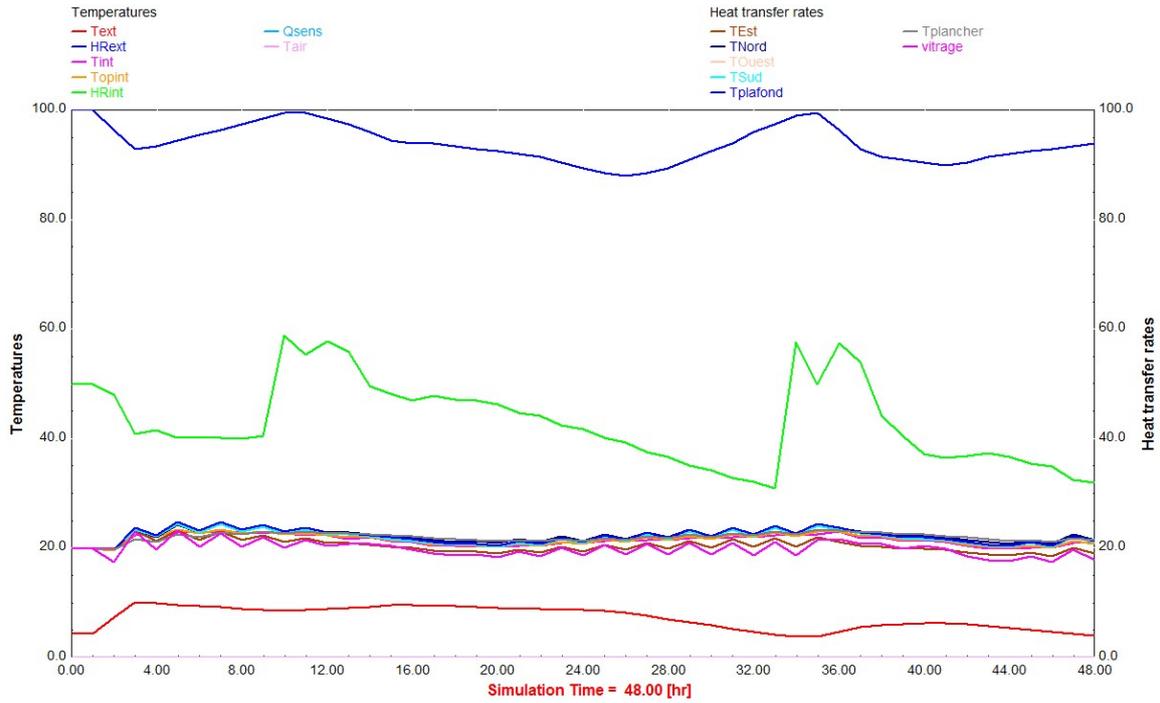


Figure 4-29 : scenario de revêtement en bois du plafond

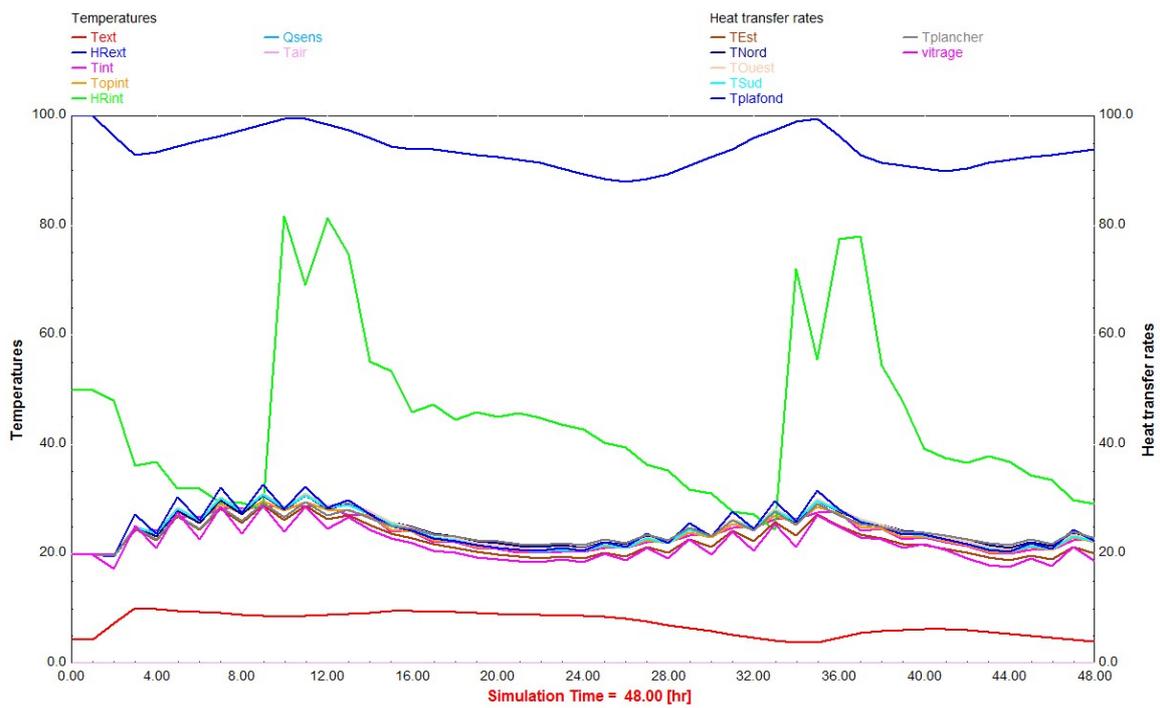


Figure 4-30 : scenario de revêtement en bois du plancher

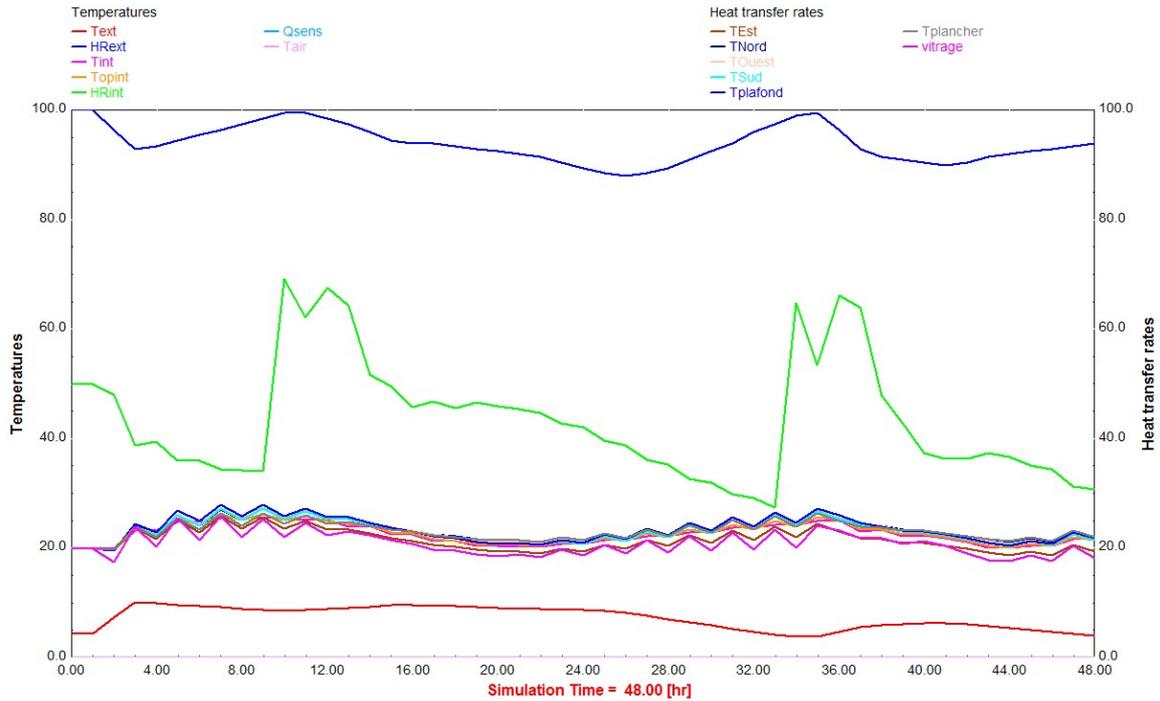


Figure 4-31 : scénario de revêtement en bois des murs nord, ouest et sud

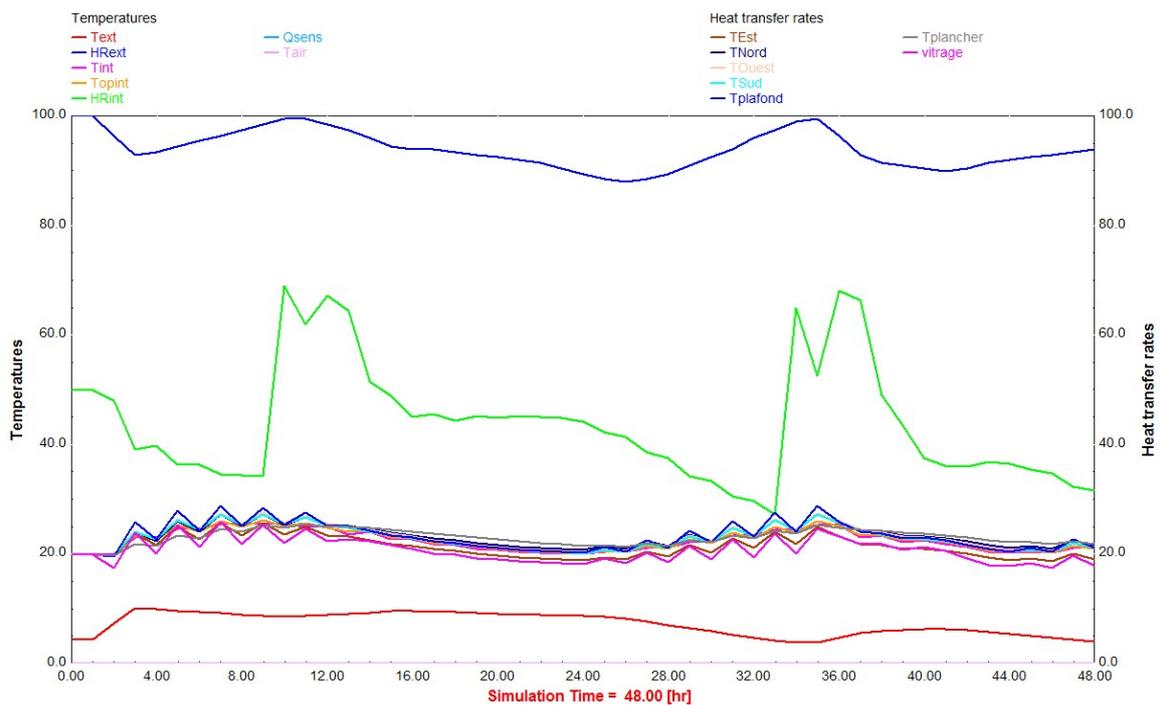


Figure 4-32 : scénario de revêtement initial de la cellule (sans bois)

D'après les résultats de simulation de la figure (4-27 à 4-32), nous avons des températures de parois qui sont supérieures à la température d'air intérieur. La température de rosée de chaque état de l'air intérieur (en continue) n'est jamais en dessous des températures de parois. La

présence de condensation est alors écartée. Ce résultat confirme ce qui a été constaté lors des mesures in situ, et dans la cellule Hybcell.

Lorsque le chauffage est en marche, de 8h à 16h, la température intérieure augmente rapidement jusqu'à un maximum d'environ 28°C, puis pendant la nuit, la température diminue progressivement et sans descendre sous 19°C pour une température extérieure variant de 5 à 10°C.

Observons maintenant les différents scénarios de bois. Nous avons tracé dans un même graphique, l'évolution de température intérieure des 7 scénarios ainsi que la température extérieure (figure 4-33).

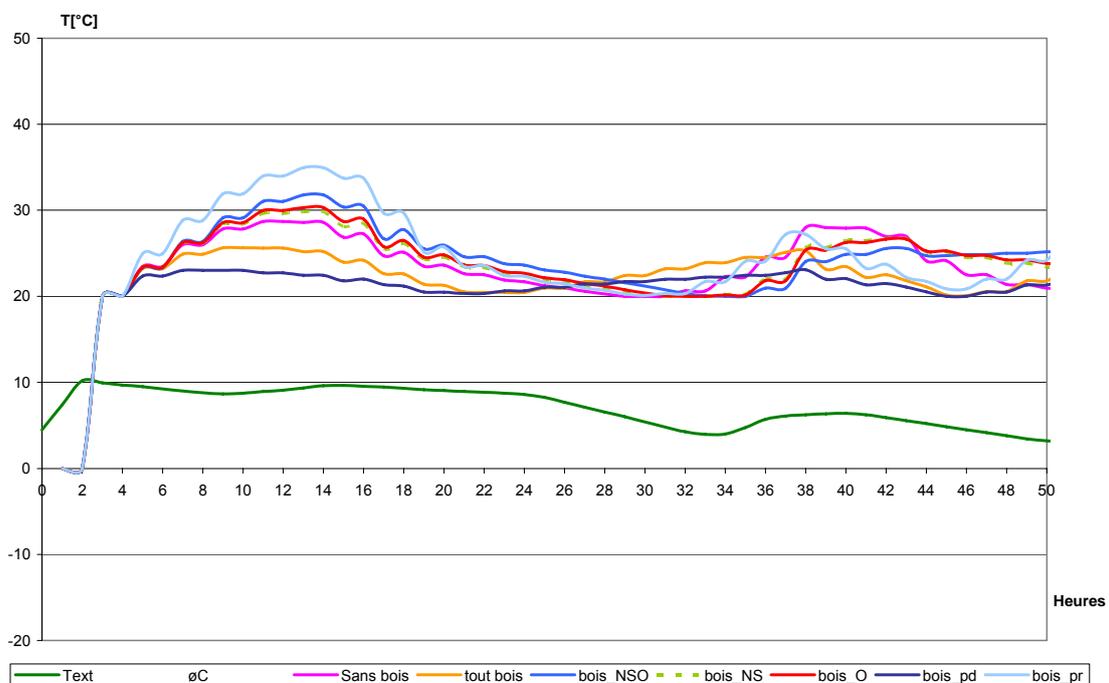


Figure 4-33 : Comparaison des températures dans différents scénarios

Sur la figure 4-33 :

Text : température extérieure,

sans bois : configuration initiale du local sans bois,

tout bois : configuration du local avec toutes les parois en bois,

bois NSO : revêtement bois sur les murs Nord,

Sud et Ouest, bois NS : revêtement bois sur les murs Nord et Sud,

bois O : revêtement bois sur mur Ouest,

bois Pd : revêtement bois au plafond,

bois Pr : revêtement bois au plancher.

Le bois en plancher présente une température maximum (35°C) supérieure aux autres scénarios et une température minimum de même ordre de grandeur que celle des autres (22°C) (figure 4-33)

Les températures correspondant à la configuration de murs en bois nord-sud et murs en bois ouest ont les mêmes valeurs.

Lorsqu'on met le bois au plafond, nous avons une faible variation de température. Nous avons le même constat pour le cas de tout en bois. Par contre, les températures minimum sont en avance de 8h par rapport aux autres alors que la température maximum vient au même moment que les autres scénarios. D'ailleurs, ces derniers présentent un minimum de température lorsque la température extérieure atteint le minimum.

Lorsqu'il n'y a aucun bois à l'intérieur, le minimum de température est le plus faible parmi les 7 scénarios. La configuration sans bois présente une température inférieure aux maximums des températures des murs en bois (toutes configurations de murs en bois confondues). On peut dire que les murs en bois peuvent alors augmenter la température intérieure. Nous avons représenté l'augmentation ou la réduction en écart de température par rapport à l'état de la cellule sans bois.

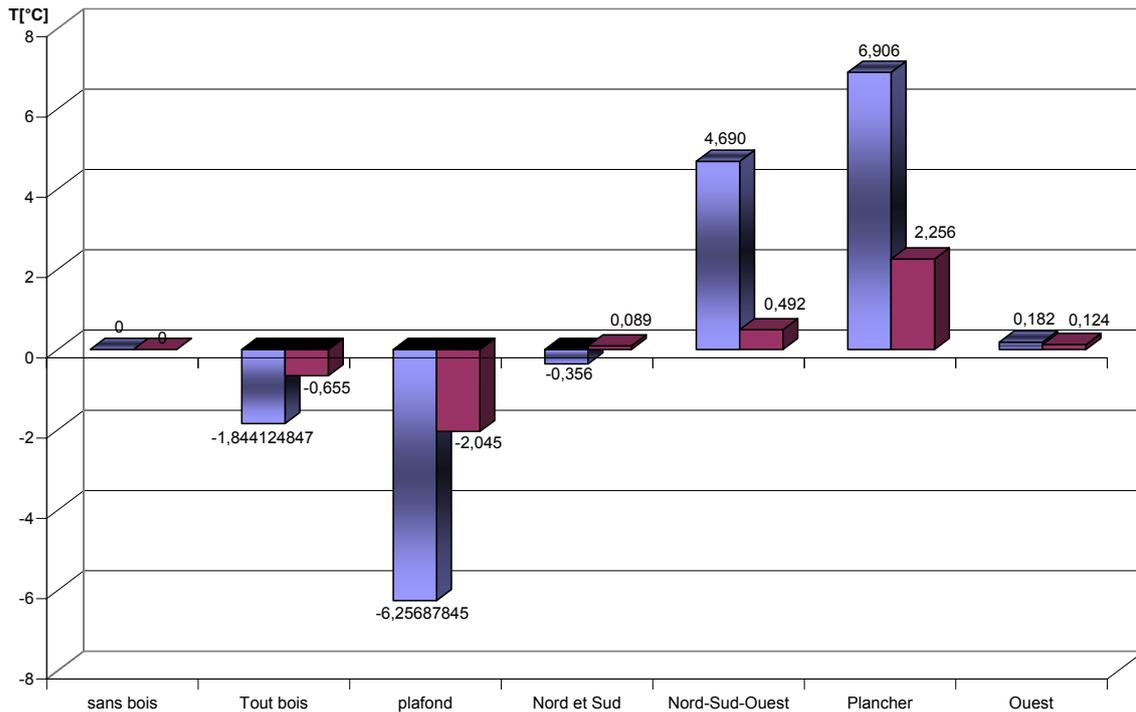


Figure 4-34 : Influence du bois sur la température

Les valeurs représentées par les histogrammes en bleu sont les maximums de températures et en rose, nous avons les écarts de la moyenne de température pour chaque scénario. La comparaison est effectuée par rapport au scénario sans bois d'où les valeurs 0 pour ce scénario (figure 4-34).

Avec l'étude des fluctuations de température, l'étude de la variation de l'humidité relative permet de caractériser l'influence du bois sur l'ambiance thermique.

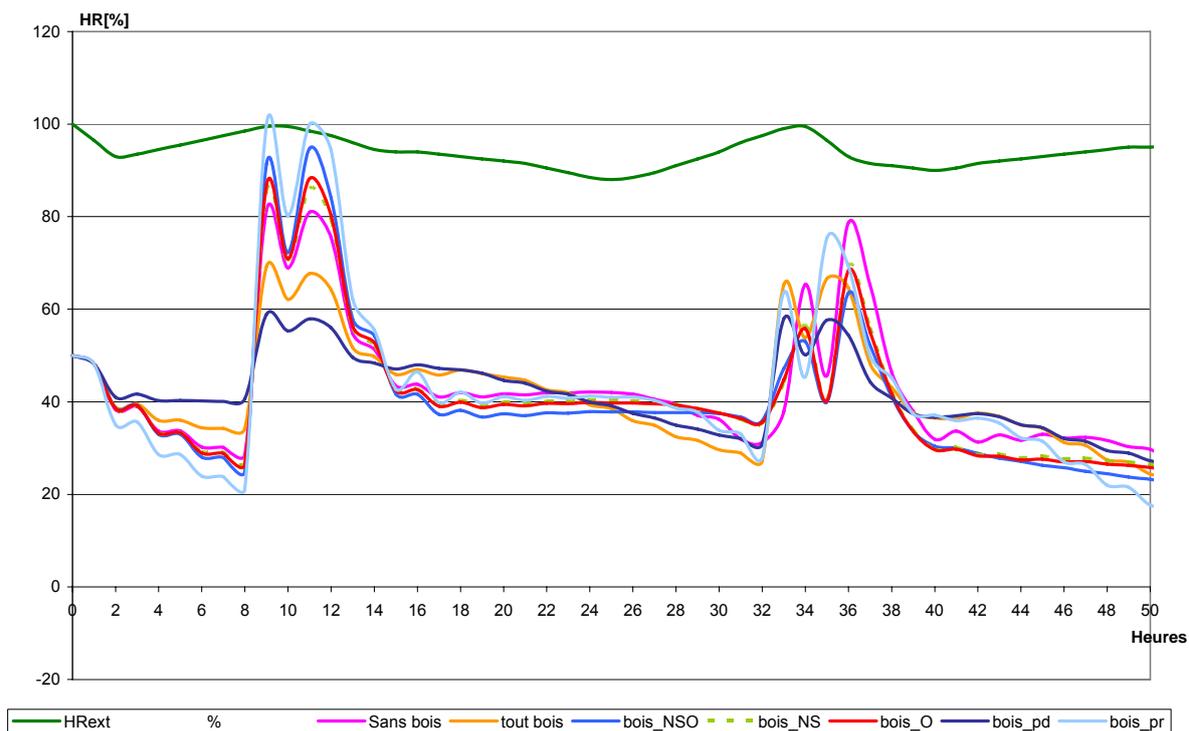


Figure 4-35 : Comparaison des humidités relatives dans différents scénarios

La figure 4-35 représente une comparaison des humidités relatives dans les 7 scénarios ainsi que celle de l'environnement extérieur. Le plancher en bois présente une HRmax supérieure aux autres et une HRmin inférieure aussi.

HRmax (courbe rose de la figure 4-35) de la configuration sans bois est inférieure à HRmax du plancher bois, Nord-Sud en bois et tous les murs en bois mais pour l'HRmin, c'est l'inverse car HRmin de la configuration sans bois est plus grande.

L'allure de la courbe de murs Ouest en bois et murs Nord-sud en bois est la même : ces deux scénarios ont une même surface de bois présent.

Si l'on compare avec l'extérieur, HRmax à l'extérieur coïncide avec les HRmax intérieures alors que les HRmin à l'intérieur sont en retard de 6 heures par rapport à HRmin à l'extérieur.

La plage d'HRmax à l'intérieur dure 2h alors qu'à l'extérieur, on observe un pic ponctuel. Par contre, les minimums à l'intérieur s'évalent sur environ 16heures avec une moyenne de 40% en humidité relative.

Ces observations sont vérifiées pour 23 jours sur 30 jours de simulation. Et lorsqu'on change les conditions extérieures, l'évolution de la température et l'humidité change et les comparaisons entre les scénarios évoluent comme ce qu'indiquent les figures 4-36 et 4-37.

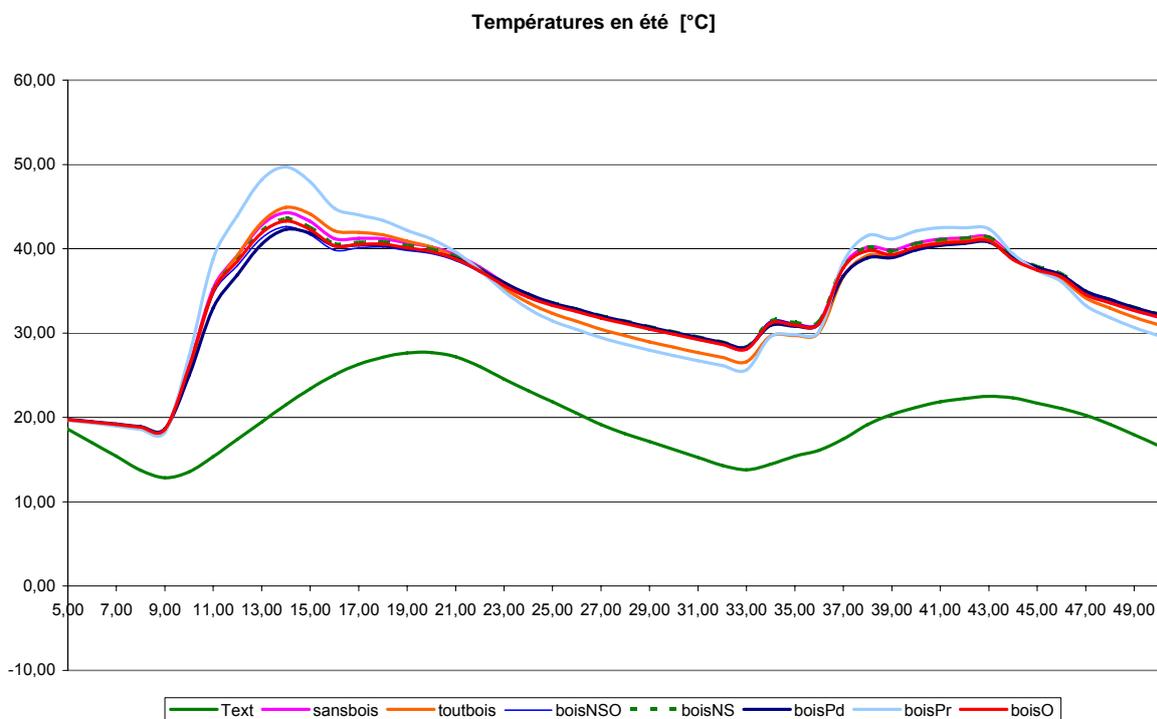


Figure 4-36 : Comparaison de températures correspondantes aux scénarios de revêtement en bois en été

Lorsqu'on a effectué une simulation pendant l'été, nous avons supprimé le chauffage utilisé. Nous avons alors observé la réponse de la pièce sur les différents scénarios.

Les températures dans la cellule pour les différents scénarios sont influencées par la faible inertie de la façade. D'où la surchauffe de la cellule avec des températures arrivant jusqu'à 50°C. Cependant, on retrouve la même conclusion concernant l'ajout de bois au plafond et au plancher.

En effet, le bois en revêtement de plancher augmente le pic de température : Tmax est augmenté de 2 à 8°C par rapport à l'état initial sans bois tandis que les Tmin descendent jusqu'à 2°C de moins par rapport à ceux du local sans bois.

Pour le plafond en bois, la fluctuation de température diminue de 1 à 2°C par rapport à l'allure générale de la température de la cellule au scénario sans bois.

La présence de bois sur les murs n'est pas significative parce que les températures sont voisines de celles du local initial. On observe quand même une petite différence au maximum des températures. Toutes les configurations de murs en bois présentent des maximums de températures inférieures de 0,5 à 1°C au Tmax du local initial alors que les températures minimums sont les mêmes.

Pour le scénario en tout bois, on a une variation de température maximum de 1°C supérieure à celle du local initial, et le minimum descend de 0,5 à 2°C inférieur à celui du local initial.

On peut en conclure alors que le plafond et le plancher en bois conservent le même effet sur l'intérieur même si l'on change de saison.

Par nos simulations, la présence de bois augmente la température intérieure, et est favorable pour améliorer la demande d'occupants en climat froid. Cela vérifie l'intérêt que porte le bois dans les pays froids de l'Europe du Nord et d'Amérique.

D'après ces résultats, le bois n'est pas favorable pour rafraichir en été pour le cas de maison avec peu d'inertie comme le local Hybcell. Nous observons une surchauffe jusqu'à supérieure à 40°C dans le local alors qu'à l'extérieur, le maximum observé est de 30°C. Il y a alors un phénomène de stockage de chaleur important malgré le renouvellement d'air de 0,6vol/h.

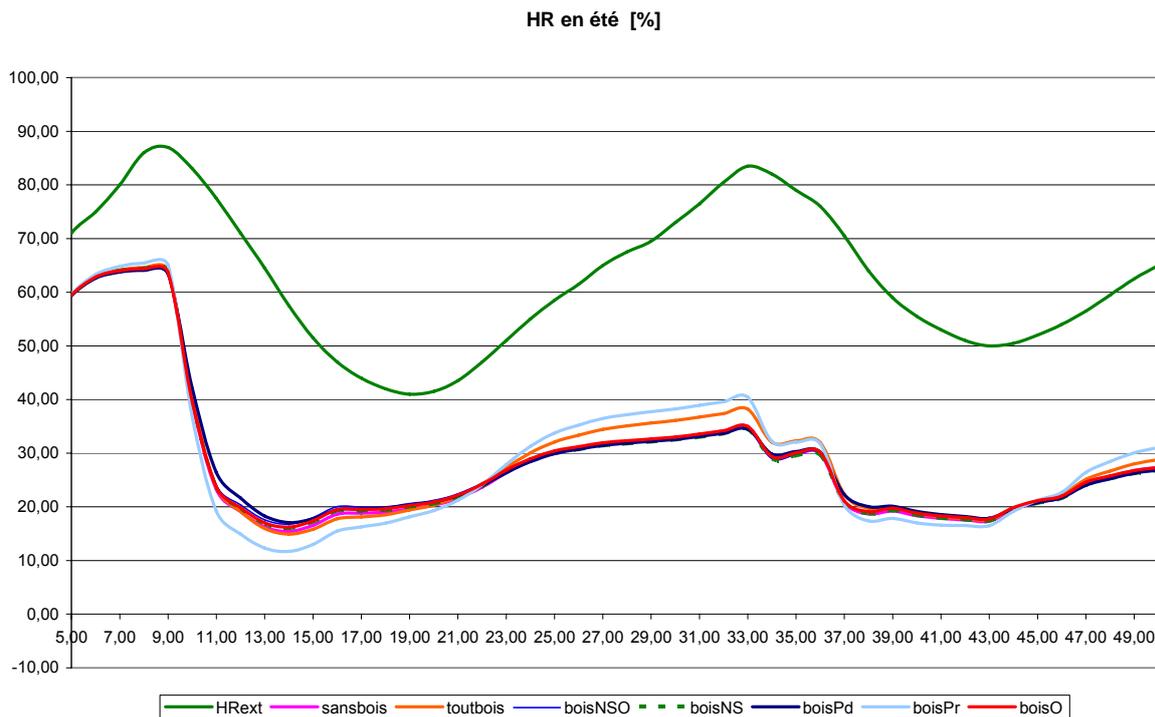


Figure 4-37 : Comparaison de températures correspondantes aux scénarios de revêtement en bois en été

Sur la figure 4-37, si l'on s'intéresse maintenant à l'humidité relative intérieure en été, on conserve les mêmes remarques que pour l'hiver pour les scénarios de bois en revêtement de plafond et plancher. Par contre, les murs en bois n'ont pas les mêmes effets en été et en hiver. Les murs en bois ne modifient que de 1 à 5% l'allure de l'humidité relative par rapport à l'état de l'air dans le local sans bois. On constate une augmentation de HRmax de 5% à 8% pour le scénario tout en bois, et HRmin est voisin de HRmin du local initial sans bois. On constate que l'HRint correspond à une fourchette de confort intérieur : de 20% à 40% sauf pendant deux à quatre heures de la journée (entre 12h et 15h) où HRmin descend moins de 20%.

Ces comparaisons sont observées pour les mesures en laboratoires et les simulations.

4.3.3 Etude de 4 variantes de revêtements intérieurs

Les mesures en laboratoire n'ont pas permis d'évaluer toutes les configurations possibles. Et pour des raisons de résistance du plafond, les expériences dans la cellule Hybcell ont été réalisées en utilisant un bois léger. Nous avons donc construit de nouveaux modèles avec TRNSYS pour tester différentes densités de bois et différentes épaisseurs de revêtement.

Modèles	Configuration	Densité du bois	Epaisseur du revêtement
1	Tout bois	Léger	2 cm
2	Tout bois	Léger	4 cm
3	Tout bois	Léger	6cm
4	Tout bois	Lourd	2cm

Tableau 4-14 : liste des nouveaux modèles TRNSYS

Les paramètres étudiés sont :

- La densité du bois
- Epaisseur
- Saisons (été/hiver)

Le modèle 1 correspond au scénario 1 des mesures effectuées dans la cellule en laboratoire.

4.3.3.1 Influence de l'épaisseur du revêtement

Si l'on effectue maintenant une simulation en variant l'épaisseur du bois en revêtement, l'évolution du scénario tout en bois est représenté par la figure 4-38 et 4-39.

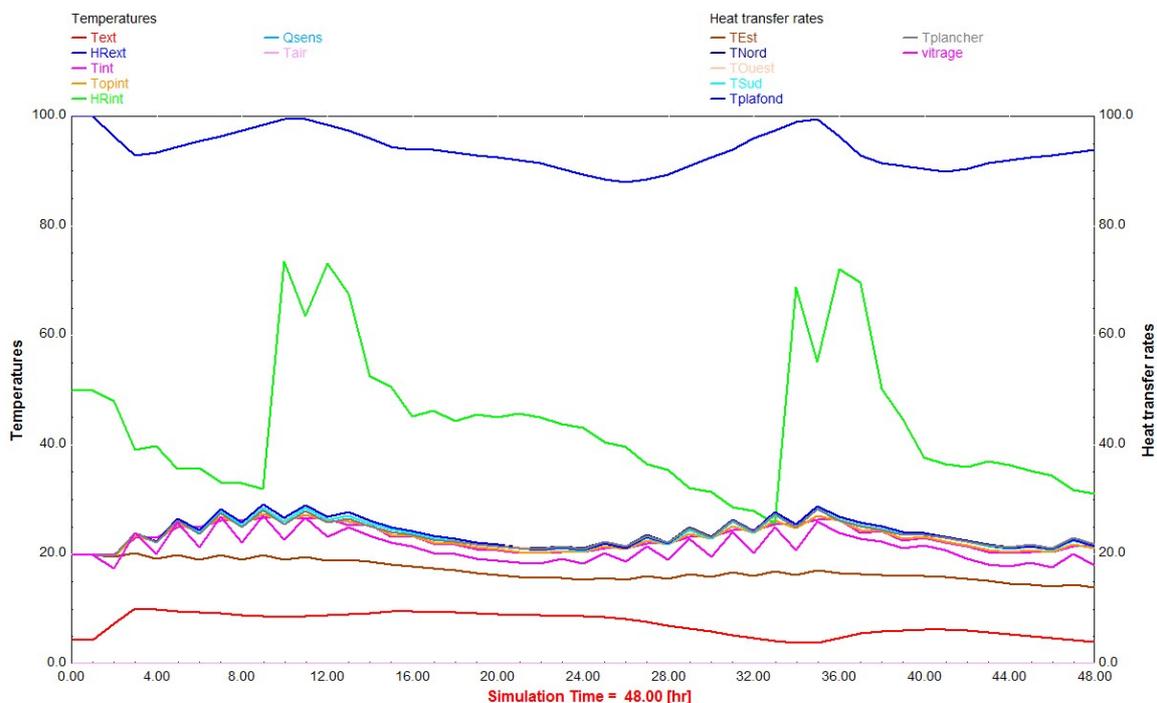


Figure 4-38 : Revêtement tout en bois ép = 4cm

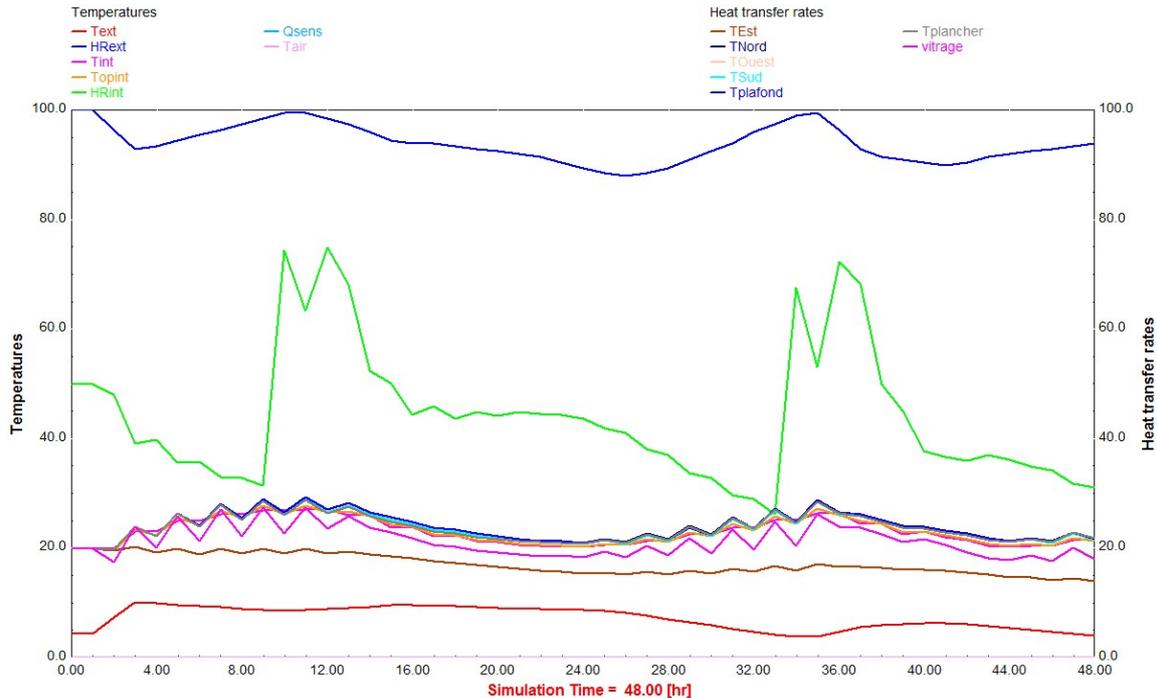


Figure 4-39 : Revêtement tout en bois ép = 6cm

Ainsi, l'on n'observe presque aucun effet du changement d'épaisseur de revêtement entre 2 cm, 4 cm et 6 cm. L'évolution des températures de parois, de la température d'air et d'humidité de l'air reste inchangée. L'effet hygrothermique du bois est alors surfacique ou sur une épaisseur fixe. Cette observation vérifie les résultats bibliographiques concernant le bois.

En effet, les propriétés du bois à absorber et restituer l'humidité est un phénomène instantané et en surface (voir chapitre 2 paragraphe 2.1.4). On ne peut pas utiliser le bois pour réduire un excès de condensation, et on ne peut pas non plus l'utiliser pour humidifier une ambiance dans une condition initialement sèche.

4.3.3.2 Influence de la densité de bois

Si l'on change le bois utilisé en revêtement, voici une comparaison entre deux scénarios où l'on a toutes les parois en revêtement bois : le premier est avec du bois léger sur tous les murs, plancher et plafond et le second avec du bois lourd sur les mêmes parois.

La conductivité du bois léger (sapin) est : 0.120 W/m.K, sa chaleur massique : 2,272 KJ/Kg.K et sa masse volumique : 350 Kg/m³. La conductivité du bois lourd est : 0.230 W/m.K, sa chaleur massique : 2,4 KJ/Kg.K et sa masse volumique : 650 Kg/m³.

Pour avoir les valeurs des propriétés thermiques à utiliser, nous avons effectué des mesures sur des échantillons de bois obtenus par une entreprise de production de matériaux de revêtement intérieur à Madagascar (Tropical Wood). Le protocole de mesure sur le bois sera donné en annexe F

Le bois léger représente les essences qui se rapprochent des propriétés du sapin, du mélèze et du pin présents dans les constructions françaises et malgaches ainsi que dans nos scénarios expérimentaux. Le bois lourd représente les bois exotiques qui sont très utilisés dans les maisons anciennes et récentes en France mais aussi dans les maisons urbaines à Madagascar où les essences locales sont les plus prisées : palissandre, handy, vandrika...

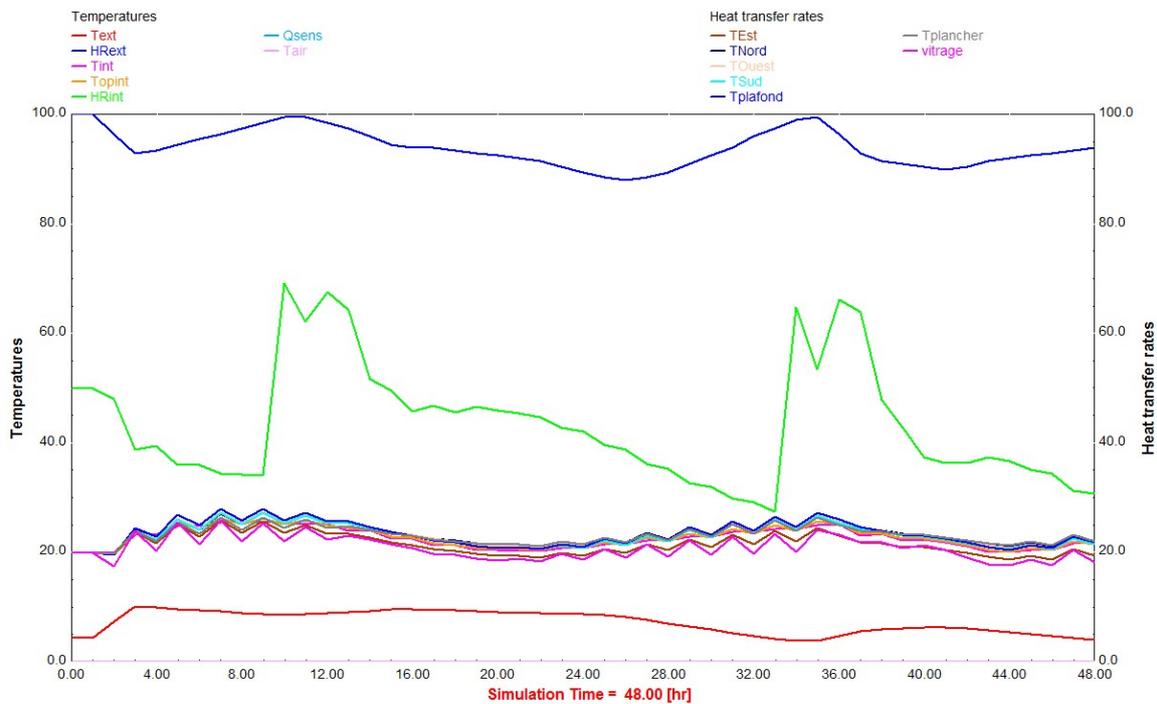


Figure 4-40 : Simulation de scénario : tout en bois léger

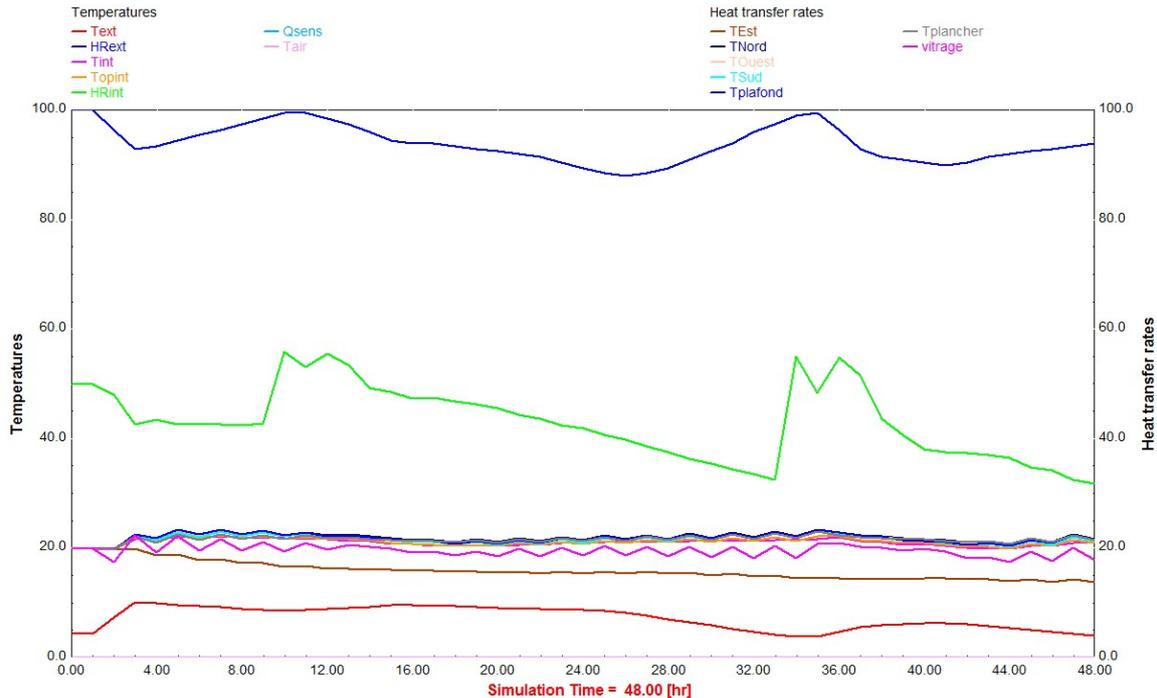


Figure 4-41 : Simulation de scénario : tout en bois lourd

Enfin, lorsqu'on compare différentes masses volumiques de bois pour une même configuration de revêtement, nous avons les figures 4-40 et 4-41. Nous constatons que dans les mêmes conditions sur l'état de l'air intérieur, nous avons moins de fluctuation de température de paroi et moins de fluctuation en humidité relative intérieure lorsqu'on utilise du bois lourd. Les propriétés du bois de revêtement modifient alors l'ambiance et l'on constate une réduction de 20% en moins des pics d'humidité relative, et 0.5°C de variation en moins de température de parois.

4.4 Conclusion

L'étude de 6 configurations de revêtements en bois dans la cellule Hybcell du Laboratoire des Sciences de l'Habitat a permis de compléter les résultats obtenus lors des mesures in situ en France et à Madagascar.

L'analyse des mesures des 6 configurations fournit une évaluation de l'impact sur le confort thermique. La zone d'influence, et les variations des indicateurs tels que le PMV, le PPD et le PIV ont été déterminées. La configuration avec un plancher bois est apparue comme la configuration la plus performante. Les résultats de l'étude montrent également que la configuration tout bois dans la cellule n'est pas la solution la plus favorable en matière de

confort thermique. De plus, l'influence d'une finition bois sur une seule paroi doit être évaluée au cas par cas puisqu'elle dépend aussi des caractéristiques géométriques du local.

L'étude a été complétée par l'élaboration de 8 modèles TRNSYS qui ont permis d'évaluer de nouvelles configurations avec des conditions climatiques différentes. L'intérêt en matière de confort de revêtir les parois par une finition bois est confirmé pour une période froide. Par contre, les résultats ont montré que les revêtements en bois ne sont pas adaptés à la recherche d'un rafraîchissement en période chaude.

Enfin, 4 autres modèles TRNSYS ont été élaborés pour évaluer l'impact de l'épaisseur des finitions et la densité du bois sur l'ambiance thermique. Il est apparu que l'épaisseur de 2 cm d'un revêtement de bois est suffisante pour donner les caractéristiques d'ambiance de la pièce. Par contre, le type de bois peut être plus influant en raison de sa densité.

Conclusion générale

Ce travail de thèse a permis de comparer les contextes et enjeux liés à l'utilisation du bois dans la construction en France et à Madagascar. Alors que la France va vers l'augmentation des ressources forestières et sa valorisation, on constate l'inverse à Madagascar, même si le pays a initié, dès 1990, une charte sur l'environnement. Le dilemme entre les soucis de déforestation abusive et la valorisation des forêts pose toujours des problèmes mais une démarche du pays vers le développement durable voudrait une orientation vers une exploitation durable soucieuse de la conservation de la biodiversité. Pour ce qui est de la France, le Grenelle de l'environnement a montré que le bois représentait un atout considérable pour arriver aux objectifs de réduction de l'effet de serre par le gaz carbonique de l'air. En considérant le cycle de vie du matériau bois, et notamment le cycle du carbone, le bois possède à la fois des qualités naturelles en stockant le carbone de l'air pendant sa constitution (phase de croissance de l'arbre) mais en plus, il assure cette capacité de stockage lorsqu'il est intégré dans la construction.

Les constructions traditionnelles en France et à Madagascar témoignent de l'utilisation ancienne d'abondantes ressources forestières locales et donc du bois dans l'architecture (par exemple, l'architecture Mérina à Madagascar). Le bois peut être considéré comme un matériau naturel et renouvelable dans la mesure où les ressources forestières locales sont gérées durablement. Ainsi, utiliser du bois en revêtement intérieur pour une pièce d'habitation de 20m² revient à utiliser 2m³ de bois, ce qui correspond à 2 tonnes de carbone stockées et à une réduction d'émissions de 2 tonnes de gaz à effet de serre. De plus, la substitution par le bois de produits plus énergivores et polluants à fabriquer pour la construction est également un point important à considérer pour répondre aux exigences d'une construction durable, à énergie positive.

Les principales caractéristiques physiques du matériau bois et des systèmes constructifs associés ont été présentées, montrant l'importance de se préoccuper de l'influence de revêtement en bois sur l'environnement intérieur des habitations. La caractérisation des phénomènes hygrothermiques à l'échelle de la pièce d'habitation a été détaillée : présence d'eau dans le bois, état hydrique du bois, comportement de l'équilibre hygroscopique, modèles d'isotherme de sorption, transferts de masse. De même, une caractérisation des

ambiances et du confort thermique est proposée à l'aide de plusieurs modèles: PMV, PPD, PIV, PIH, IUT. Les phénomènes physiques associés aux échanges liés à l'humidité de l'air et à la température de surface des revêtements intérieurs ont été décrits avec différents supports de modélisation (ASHRAE, diagramme psychrométrique, normes ISO, etc.). Ce travail apporte des connaissances sur l'évaluation des interactions entre le confort thermique, l'ambiance et le revêtement en bois. Le bâtiment reste principalement perçu par les acteurs de la construction dans son rôle d'abri à Madagascar, le confort thermique n'est pour le moment pas une priorité dans les réglementations en vigueur mais reste une attente à mettre en œuvre pour les occupants. Nous avons développé un outil de calcul des indices de confort thermique dans une pièce présentant des revêtements différents. Cet outil est disponible et est utilisable pour des pièces d'études et pour différents matériaux de revêtement intérieur. Il s'agit d'une aide à la conception des bâtiments puisqu'il fournit aux concepteurs et aux propriétaires le confort prévu et/ou escompté dans les locaux. Cet outil pourrait servir aussi à la réhabilitation de bâtiment (choix d'aménagement intérieur ou remplacement de revêtement existant) en ayant les indicateurs obtenus en sortie de l'outil.

Dans notre travail, nous avons mené des campagnes de mesures in situ dans deux maisons en France (à La Grave : G1, G2, G3 et à Vilette d'Anthon V1, V2, V3, V4) et une maison à Antananarivo, la Madagascar (M1 à M7). Elles ont permis de travailler avec un échantillon de 14 pièces d'habitation, dont 10 ont un ratio de revêtement en bois supérieur à 50%. Ces pièces d'habitation témoignent d'une pratique de la construction adaptée à la situation géographique, aux matériaux locaux présents sur le marché, au contexte économique et politique local, à la société et à la culture d'un pays. Elles ont permis d'évaluer l'influence de plusieurs configurations de revêtement en bois (plancher, plafond, murs). Les données de mesures ponctuelles et faites en continu (ambiances thermiques, conditions de confort et configurations en bois) ont été recueillies, selon un protocole expérimental adapté, pendant plusieurs campagnes de mesures in situ en 2007 et 2008.

La caractérisation de l'influence thermique du bois a donné plusieurs résultats :

- toutes les pièces étudiées présentent un PMV en dehors de la plage du confort $[-0.5 ; +0,5]$ et les ambiances sont plus chaudes en été ($PMV > +0,5$).

- les PPD rencontrés sont supérieurs à 10%, ce qui signifie une qualité médiocre des ambiances étudiées ; dans les locaux d'une même maison pour des saisons différentes, nous constatons que le PPD augmente avec le ratio pendant l'hiver et l'été.
- Le pourcentage d'insatisfaits par rapport au rayonnement vertical et horizontal est faible, et donc qu'aucune gêne liée à une asymétrie de rayonnement n'est rencontrée dans les pièces étudiées.
- Dans 13 locaux sur 14, plus le ratio de bois est grand, plus le PPD augmente. Il reste néanmoins des locaux (par exemple, V2) où le ratio de bois élevé présente un PPD plus faible que pour les autres locaux.
- Le comportement des locaux au printemps et en automne ne vérifie pas celui des autres saisons. Chaque local évolue en température et en humidité différemment.

L'influence de la position des parois revêtues en bois a été analysée. La meilleure réduction de la variation de température d'air à l'intérieur d'une pièce est le scénario avec le plafond en bois.

La comparaison des habitations en France et à Madagascar montre que la texture et les propriétés physiques des essences de bois malgaches et européens peuvent être proches : conductivité thermique, effusivité, capacité d'absorption, inertie, densité, propriétés mécanique. Nous avons aussi les différents systèmes constructifs présentés dans les maisons traditionnelles françaises et malgaches qui montrent des relations interculturelles mais le retard de la technologie à Madagascar se fait sentir au niveau des différentes réglementations en vigueur et des normes de construction. De plus, lors de son exploitation avec le temps (phase de vie du matériau), l'entretien des habitations est différent. Les moyens de nettoyage et d'entretien en France et à Madagascar ne se ressemblent pas : par exemple le balayage à la main et ponçage avec une brosse fabriquée avec la noix de coco à Madagascar et torchon humide et à l'aspirateur en France. L'expérience des revêtements n'est donc pas la même d'une famille à l'autre, d'une pièce à l'autre et d'une culture à l'autre. Dans les deux cas, l'aspect esthétique change, mais aussi le teneur en eau et les propriétés de surface (émissivité, effusivité) mais ces changements esthétiques sont essentiellement la conséquence de la lumière sur le bois et de l'essence utilisée.

Des modèles numériques ont été élaborés avec TRNSYS pour comparer différents scénarios de revêtement en bois dans une pièce d'habitation. Nous avons pu obtenir des résultats de

simulation en utilisant deux paramètres utilisés in situ et en laboratoire c'est-à-dire le ratio en surface de bois et la position du bois dans la pièce et nous avons aussi pu simuler d'autres paramètres sur le bois : l'épaisseur et la masse volumique.

Différents conditions climatiques ont été testées, correspondant au climat tropical à Madagascar. Il a été constaté que le bois est susceptible de chauffer une ambiance en été avec une enveloppe à faible inertie. Son utilisation mérite d'être associée à l'étude d'une enveloppe adaptée selon les orientations pour éviter de surchauffer en été : protéger l'entrée des rayonnements directs par les protections solaires par exemple. Dans le cas d'une maison à ossature en bois (ensemble de bardage, isolant, panneaux de matériaux dérivés de bois, montants en bois et revêtement intérieur), la performance de l'enveloppe se calcule en fonction des couches de matériaux présents. Et pour que le bois participe seule à la performance thermique de l'enveloppe, il faut une épaisseur de 7 à 8 cm comme ce que l'on rencontre dans les maisons en bois empilés ou les chalets en rondins de bois. (tableau 1-1 du chapitre 1).

Nous avons fait une comparaison entre différents scénarios de revêtement en bois mais en pratique, le choix du matériau en revêtement intérieur est souvent une question de goût esthétique ou de confort visuel. En compétition avec d'autres matériaux de revêtement, nous montrons que le choix du matériau bois peut se faire en considérant aussi son influence sur le confort et l'ambiance intérieure. Selon la position et la géométrie du revêtement en bois, il y a une différence d'ambiance.

Ainsi, les résultats permettent de proposer des recommandations en termes de conception d'un intérieur en bois. Il est possible d'étudier la position d'un revêtement en fonction de la future fonction du local. Par exemple, si le local est utilisé comme bureau, il est préférable d'adapter les revêtements selon l'ergonomie attendue pour un occupant situé à l'emplacement de son bureau (mobilier). On peut positionner un revêtement en bois qui serait au dos de l'occupant pour lui procurer de la chaleur en hiver. Un autre exemple est la chambre où l'occupant pourrait être pieds nus. Le contact avec le bois en plancher est bénéfique pour procurer une température de surface agréable (effusivité faible du bois).

Ce travail a été mené en mettant en avant la présence du bois en revêtement intérieur. En réalité, le bois ne travaille pas seul dans une ambiance. D'autant plus qu'ici, les revêtements

sont d'une épaisseur faible par rapport à toute l'épaisseur d'une paroi de bâtiment. Ce travail s'inscrit dans la connaissance particulière sur le bois dans le bâtiment et mérite d'être amélioré en travaillant sur différents types d'enveloppe (différents matériaux et assemblage de matériaux) pour permettre de dire si oui ou non le bois apporte plus ou moins de confort. L'issue de cette thèse peut-être l'étude du comportement dynamique d'un bâtiment. Nous avons émis une première approche sur la rénovation d'intérieur par le bois et connaître le confort apporté.

Nous avons abordé essentiellement la question du confort thermique, mais une approche multicritère du confort a déjà été développée au laboratoire en considérant également des critères d'adaptation de l'occupant. Intégrer ce travail avec les modèles dynamiques du confort est alors une perspective du travail. D'autre part, il y a des problèmes liés au confort visuel, acoustique, et la qualité de l'air intérieur sur le bois. Dans ce sens, il serait intéressant de développer des produits de revêtement et de finition qui permettraient de garder l'aspect visuel (couleur et texture) et les propriétés thermo physiques du bois.

Au cours de ce travail de thèse, nous avons constaté que l'utilisation du bois naturel, non traité, en revêtement intérieur est rare dans les habitations. En ce sens, les maisons étudiées in situ sont atypiques. Cependant, les résultats de nos travaux montrent l'intérêt de considérer le revêtement intérieur en bois naturel comme un système constructif adapté aux exigences du développement durable. Les caractérisations de l'influence du bois sur les ambiances et le confort thermique intérieur devraient permettre aux acteurs de la construction pour les constructions neuves et pour la réhabilitation, de mieux exploiter les différentes configurations des finitions intérieures en bois parce que le bois peut améliorer ou détériorer l'ambiance selon différents critères géographiques, matériaux d'enveloppe, les futures fonctions des locaux, les activités des occupants...

Bibliographie

BARREIRA E. et VASCO D. F. P. *Evaluation of building materials using infrared thermography*. Construction and Building Materials, 2007, vol. 21, pp. 218-224.

BJÖRK F., LUNDBLAD D. et ÔDEN K. *Transport of air, Tracer gas and moisture through a cellulose fibre insulated structure*. Stockholm SE-100 44 Suède: Departement of Building Sciences, Royale Institute of Technology, 1997, - p.

BORLOO J. L. *Plan climat de La France : Mise en oeuvre du Grenelle Environnement* [en ligne]. Disponible sur: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/09003_PLAN_CLIMAT.pdf>. (consulté le 02/06/2010).

BRAGER G. S. et DEAR R. J. D. *Thermal adaptation in the built environment : aliterature review*. Energy and buildings, 1998, vol. 27, 1, pp. 83-96.

BREYSSE P. N., BUCKLEY T. J., WILLIAM D. A., et al. *Indoor air exposure to air pollutants and allergens in homes of asthmatic children in inner-city Baltimore*. Environmental research, 2005, vol. 98, pp. 167-176.

BRUANT M. *Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance*. Rhône. Lyon: INSA, 1997, 312 p.

BUCHANAN A. H. et LEVINE S. B. *Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions*. Environment Sciences and Policy, 1999, vol. 2, pp. 427-437.

BULCKE J. V. D., ACKER J. V. et STEVENS M. *Physicochemical monitoring od wood coating degradation related to fungal disfigurement*. International Biodeterioration and Biodegradation, 2006, vol. doi:10.1016/j.ibiod.2006.08.008, pp. 12.

CANDAS V. *Confort thermique*. Techniques de l'Ingénieur, 1998, vol. BE4, BE9085, pp.

CANTIN R. *Développement d'une méthode prospective-Application aux systèmes de Gestion Technique du Bâtiment*. Rhône. Lyon: INSA, 2000, 320 p.

CECOBOIS. *Le bois et le cycle du carbone* [en ligne]. Disponible sur: <http://www.cecobois.com/index.php?option=com_content&view=article&id=90&Itemid=99>. (consulté le 10 Janvier 2011).

CEI-BOIS. *Luttez contre le changement climatique* [en ligne]. Disponible sur: <http://www.cei-bois.org/files/Luttez_contre_le_changement_climatique.pdf>. (consulté le 10 Janvier 2011).

CHANGEMENT-CLIMATIQUE. *Le changement climatique* [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/dossiers/changement-climatique/chronologie.shtml>>. (consulté le 02/11/2010).

CHARLES K., REARDON J. T. et MAGEE R. J. *Qualité de l'air intérieur et confort thermique dans les bureaux à aire ouverte* [en ligne]. Disponible sur: (consulté le 10 juillet 2006).

CHUARD D. et AIUFI D. *Climat intérieur et conservation des Monuments historiques* [en ligne]. Disponible sur: <www.sorane.ch/telechargeables/Article-Mon-Hist-Sorane.pdf>. (consulté le 10 Juin 2006).

CONSEIL C. D. B. *Le bois et la construction durable* [en ligne]. Disponible sur: (consulté le 5 Decembre 2005).

COURBE D. *Influence d'une finition en bois brut sur le confort thermique dans le bâtiment.* Travail de fin d'études d'Ingénieurs. Vaulx en velin: ENTPE, 2008, 68 p.

DE-DEAR R. J. et BRAGER G. S. *Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revision to ASHRAE standards 55.* Energy and Buildings, 2002, vol. 34, 6, pp. 549-561.

DE-DEAR R. J., BRAGER G. S. et COOPER D. *Developping an Adaptive Model of thermal Comfort and Preference* [en ligne]. Disponible sur: <http://atmos.es.mq.edu.au/rdedear/RP884_Final_Report.pdf>. (consulté le avril 2005).

DE MEIJER M. *Review on durability of exterior wood coatings with reduced VOC-content.* Progress in Organic Coatings, 2001, vol. 43, pp. 217-225.

DEGLISE X. et DONNOT A. *Bois énergie.* Techniques de l'Ingénieur, 2006, vol. BE3, BE 8535, pp. 1-21.

DÉVELOPPEMENT-DURABLE. *Logement, aménagement durable et ressources naturelles* [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Bois,13394.html>>. (consulté le 20/11/2010).

DIPLOMATIE F. *Aide Public au Développement - Ministère des Affaires Etrangères et Européennes* [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/>>. (consulté le 02/11/2010).

DONNADIEU G. et KARSKY M. *La systémique, penser et agir dans la complexité.* 1999, 272 p.

DOULOS L., SANTAMOURIS M. et LIVADA I. *Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials.* Solar Energy, 2004, vol. 77, pp. 231-249.

DURAND D. *La systémique.* France: Presse Universitaire de France, 2004, 126 p.

EL MANKIBI M. *Développement et évaluation numérique et expérimentale de stratégies de régulation de la ventilation hybride.* Conception en bâtiment et techniques urbaines. Villeurbanne, France: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, ENTPE, 2003, 388 p.

EL MANKIBI M. *Solar radiation modeling impact on control strategies design.* In: PLEA 2008, 2008, Dublin, Ireland. 2008, pp.

EL MANKIBI M. *Guidelines on Ventilation systems management for indoor air quality.* Building and Environment, 2009, vol. 44, 8, pp. 1356-1361.

EL MANKIBI M., CRON F., MICHEL P., et al. *Control strategies for hybrid ventilation simulations.* In: EPIC 2002 AIVC : Energy Efficient & Healthy Buildings in Sustainable Cities, 2002, Lyon, France. ENTPE, 23-26 octobre 2002, pp. 437-442.

EL MANKIBI M. et MICHEL P. *Strategie de gestion de la ventilation hybride.* Revue française de génie civil, 2002, vol. 6, Hors Série, pp. 141.

EL MANKIBI M. et MICHEL P. *Development and assessment of hybrid ventilation control strategies using multicriteria approach.* International journal of ventilation, 2005, vol. 4, 3, pp. 227-238.

ENTPE. *Station IDMP : Vaulx en Velin France [en ligne].* Disponible sur: (consulté le 03/03/2010).

EUROPÉENNE U. Calcul des structures en Bois - Règles générales et règles pour les bâtiments. Eyrolles. France: Eurocode 5, 1996, partie 1-1 p.

FANGER P. O. et TOFTUM J. *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates.* Energy and buildings, 2002, vol. 34, 6, pp. 533-536.

FRAISSE G. *Régulation thermique des bâtiments tertiaires : application de la logique floue à la régulation centrale du chauffage en régime intermittent.* Lyon. France: INSA, 1997, - p.

FRAISSE G. et VIRGONE J. *Modélisation numérique d'un bâtiment multizone sous trnsys.* France: INSA, 2001, - p.

GAUZIN-MÜLLER D. Construire avec le bois. Moniteur. France: 1999, 311 p.

GIEC. *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [en ligne].* Disponible sur: <<http://www.ipcc.ch/>>. (consulté le

GLOBAL-WITNESS et AGENCY E. I. *Enquête sur l'exploitation, le transport et l'exportation illicite de bois précieux dans la région SAVA à Madagascar [en ligne].* Disponible sur: <www.globalwitness.org/media_library.../madag_report_revised_finalfr.pdf

>. (consulté le 01/01/2010).

GODET M. Manuel de prospective stratégique. 2 : l'art de la méthode. Dunod. 1997, 412 p.

GRENELLE E. *Plan Bâtiment - Grenelle; Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer [en ligne].* Disponible sur: <<http://www.plan-batiment.legrenelle-environnement.fr/>>. (consulté le 02/11/2010).

GUARRACINO G. *Energétique du bâtiment.* Vaulx en Velin: Ecole Nationale des travaux publics de l'Etat, 2006, p.

HAMEURY S. *Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate : a numerical study.* Building and Environment, 2005, vol. 40, pp. 1400-1412.

HAMEURY S. *The hygrothermal inertia of massive timber constructions.* Stockholm. Suède: KTH Architecture and building Environment, 2006, 85 p.

HAMEURY S. et LUNDSTRÖM T. *Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign.* Energy and Buildings, 2004, vol. 36, 3, pp. 281-292.

HARIJAONA Z. *Etude paramétrique du confort adaptatif dans les bâtiments. Génie civil.* Vaulx-en-Velin: ENTPE, 2005, p.

HARIJAONA Z. *Le matériau Bois - Cours de matériaux de construction, 3^è année, VA Bâtiment.* Vaulx en Velin: ENTPE, 2006, 150 p.

HARIJAONA Z. *Impact thermique des revêtements en bois sur l'environnement intérieur des bâtiments.* Mécanique Energétique Génie Civil et Acoustique. Lyon: INSA Lyon, 2011, 250 p.

HARIJAONA Z., CANTIN R. et GUARRACINO G. *Numerical modeling of impact of radiation exchanges between wood and building thermal comfort.* **In:** International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA 2009), 2009, Zouk Mosbeh, Liban. 14-23 juillet 2009, pp. 249-254.

HARIJAONA Z., MOUJALLED B., CANTIN R., et al. *Multicriteria characterization of adaptive comfort variables in office buildings.* **In:** EPIC 2006 AIVC : Technologies & Sustainable Policies for a Radical Decrease of the Energy Consumption in Buildings, 2006, Lyon, France. 20-22 novembre 2006, pp.

HEIJMANS N., WOUTERS P., DELMOTTE C., et al. *La ventilation des immeubles de bureaux, Vers une meilleure conception des exigences.* In: Hybvent - annexe 35. France: 2005, p. 114.

HENNEUSE-BOXUS C. *Sampling analysis of volatile compounds (VOC) emitted by materials [en ligne].* Disponible sur: (consulté le 2006).

JANIN G., CHARRIER F., GONÇALEZ J., et al. *La colorimétrie appliquée à l'évaluation de la couleur et de la qualité des bois européennes et tropicales [en ligne].* Disponible sur: <http://zeus.dci.ubiobio.cl/~anancias/G_Janin%5B1%5D_colorimetrie.pdf>. (consulté le 10/09/2009).

KALEEMULLAH S. et KAILAPAN E. *Moisture sorption isotherms of red chilies.* Biosystems Engineering, 2004, vol. 88, 1, pp. 95-104.

KRABBENNOFT K. *Moisture transport in wood - A study of physical-mathematical models and their numerical implementation.* Department of Structural Engineering and Materials. Denmark: The Technical University of Denmark, 2003, 167 p.

KUMARA M. K., LACKEY J. C., NORMANDIN N., et al. *Variation in hygrothermal properties of several wood-based building products*. Leuven Belgium: Research in Building Physics, 2003, 35-52 p.

KUNZEL H. M., HOLM A., DIRKELBACH D., et al. *Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope*. Solar Energy, 2005, vol. 78, 4, pp. 554-561.

LAURENTIN C. *Etude expérimentale de la qualité des ambiances lumineuses dans les bureaux en conditions de lumière mixte et d'ambiances thermiques variées*. Lyon, France: INSA, 2001, 230 p.

LEE S. C., GUO H., LI W. M., et al. *Inter-comparison of air pollutant concentrations in different indoor environments in Hong Kong*. Atmospheric Environment, 2002, vol. 36, pp. 1929-1940.

LESOURD M. *L'Afrique. Vulnérabilité et défis*. In: Collection Question de géographie. Edition du temps. Nantes: 2003, p. 354-376.

MAE-MADAGASCAR. *Participation de Madagascar à la Conférence de haut niveau des Nations Unies sur la biodiversité [en ligne]*. Disponible sur: <http://www.madagascar-diplomatie.net/article.php?article_id=661>. (consulté le 19/10/2010).

MARTIN-AMOUROUX J.-M. *Perspectives énergétiques mondiales*. Techniques de l'Ingénieur, 2006, vol. BE3, BE 8515, pp. 1-13.

MERRAKEB S. *Modélisation des structures en bois en environnement variable*. Ecole doctorale Science, technologie, santé. Université de Limoges, 2006, 146 p.

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT D. L., DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DES TRANSPORTS. *Habiter le bois*. CSTB. France: 1986, 190 p.

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT D. T. E. D. L., MINISTÈRE DE L'EMPLOI ET DE LA SOLIDARITÉ. *Les principaux risques sanitaires*. Bâtiment et Santé, 1999, vol. pp.

MOIGNE J. L. L. *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Dunod, 1999, 178 p.

MORBIHAN C. D. M. E. D. L. A. D. *Toit et couverture [en ligne]*. Disponible sur: <<http://www.girouette.fr/toit.php>>. (consulté le 10 Janvier 2011).

MOUJALLED B. *Incidence des contraintes du confort d'été sur la réhabilitation des bâtiments scolaires : application au lycée Monge (Chamberry)*. Rhône. Lyon: ENTPE, 2002, 119 p.

MOUJALLED B. *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments ventilés*. Rhône. Lyon: INSA, 2007, 330 p.

NEUFERT E. *Les éléments des projets de construction*. 7ème - DUNOD. France: 1996, p.

NGOHE-EKAM P. S., MEUKAM P., MENGUY G., et al. *Thermophysical characterisation of tropical wood used as building materials : with respect to the basal density.* Construction and Building Materials, 2006, vol. 20, pp. 929-938.

NICOL F. Thermal comfort. A handbook for field studies toward an adaptive model. Great Britain: University of East London, 1993, 85 p.

NICOL F. et HUMPHREY M. *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings.* Energy and Buildings, 2002, vol. 34, 6, pp. 563-572.

NICOL F. et HUMPHREY M. *Adaptive thermal comfort evaluation in a field study.* Energy and Buildings, 2002, vol. 34, 6, pp. 10.

NICOL F. et HUMPHREY M. *The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments.* Energy and Buildings, 2002, vol. 34, 6, pp. 66-684.

NICOL F. et HUMPHREYS M. A. A stochastic approach to thermal comfort - Occupant behaviour and energy use in buildings. In: ASHRAE Transaction. 110, part 2. 2004, p. 554-568.

OBATA Y., TAKEUCHI K., FURUTA Y., et al. *Research on better use of wood for sustainable development : quantitative evaluation of good tactile warmth of wood.* Energy, 2005, vol. 30, pp. 1317-1328.

OSANYINTOLA O. F. et SIMONSON C. J. *Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials : Experimental facilities and energy impact.* Energy and Buildings, 2006, vol. 28, pp. 1270-1282.

PADFIELD T. *The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity*

Department of Structural Engineering and Materials. Denmark: The Technical University of Denmark, 1998, 165 p.

PADFIELD T. *Humidity buffering by absorbent materials in walls* [en ligne]. Disponible sur: <www.natmus.dk/cons/tp/wallbuff/wallbuff.htm>. (consulté le

RABEZA V. R. *Recensement général de la population et de l'habitat : Madagascar* [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.instat.mg/>>. (consulté le Juillet 2010).

REEF. *Recueil des Éléments utiles à l'Établissement et l'exécution des projets et marchés de bâtiments en France* [CD Rom]. France: CSTB, 2005.

RODE C., HANSEN K. K., PADFIELD T., et al. *Moisture Buffer Capacity - Summary report.* Nordic Building Physics Symposium. Denmark: Technical University of Denmark-BYG-DTU, 2003, 33 p.

RODE C., PEUHKURI R., TIME B., et al. *Moisture Buffering and building materials.* Denmark: Technical University of Denmark, 2005, 78 p.

ROELS S. et JANSEN H. *A comparison of Nordtest and Japanese Test methods for the moisture buffering performance of building materials.* Journal of building physics, 2006, vol. 30, 137, pp.

ROSNAY L. D. *Le microscope : vers une vision globale.* Paris: 1975, p.

ROUSSEAU D., BROWSER D. et MATTOCK C. *Guide d'équipement mécanique pour un environnement intérieur sain : au coeur de l'habitation.* Rapport de recherches. Canada: CHCL, 2003, 162 p.

SAKURAGAWA S. *Change in the impression of rooms with interior wood finishes arranged differently: questionnaire survey with the use of photographs for the analysis of impressions of rooms concerning living activities.* Journal of wood sciences, 2006, vol. 52, pp. 290-294.

SANTAMOURIS. vol. pp.

SATGE C. *Etude de nouvelles stratégies de valorisation de mono et polysaccharides.* Chimie Physique. Limoges: université de Limoges, 2002, p.

SATHRE R. et GUSTAVSSON L. *Effects of energy and carbon taxes on building material competitiveness.* Energy and Buildings, 2006, vol. doi:10.1016/j.enbuild.2006.09.005, pp. 7.

SESSI et MINISTÈRE DE L'ECONOMIE D. F. E. D. L. I. *Le bois en Chiffre [en ligne].* Disponible sur: <<http://www.le-bois.com/bois2006.pdf>>. (consulté le 10 Janvier 2011).

SIMONSON C. J., SALONVAARA M. et OJANEN T. *Improving Indoor Climate and Comfort with Wooden structures.* Finland: Technical Research Center of Finland, VTT, 2001, 200 p.

SQUINAZI F. *La pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments (allergènes exclus) [en ligne].* Disponible sur: (consulté le juin2006).

STEPHENSON D. G. *CBD-47-F. Températures extrêmes à la surface extérieure des bâtiments [en ligne].* Disponible sur: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd047_f.html>. (consulté le Aout 2006).

SYNNEFA A., SANTAMOURIS M. et APOSTOLAKIS K. *on the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment.* Solar Energy, 2006, vol. doi:10.1016/j.solener.2006.08.005, pp.

SYNNEFA A., SANTAMOURIS M. et LIVADA I. *A study of thermal performance of reflective coatings for the urban environment.* Solar Energy, 2005, vol. doi:10.1016/j.solener.2005.05.005, pp.

TOFTUM J., JORGENSEN A. et FANGER P. O. *Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort.* Energy and Buildings, 1997, vol. 28, pp. 15-23.

TOFTUM J., JORGENSEN A. et FANGER P. O. *Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin.* Energy and Buildings, 1997(2), vol. 28, pp. 1-13.

TROUY-TRIBOULOT M.-C. et TRIBOULOT P. Matériau bois : structures et caractéristiques. In: Techniques de l'Ingénieur. C 925. France: 2006, p. 1-26.

TSUNETSUGU Y., MIYAZAKI Y. et SATO H. *Physiological effects in humans induced by the visual stimulation of room interiors with different wood quantities.* Journal of Wood Sciences, 2006, vol. 53, pp. 11-16.

VINCKE P. L'aide multicritère à la décision. Université de Bruxelles. Belgique: 1989, 179 p.

VIRTA J., KOPONEN S. et ABSETZ I. *Modelling moisture distribution in wooden cladding board as a result of short-time single-sided water soaking.* Building and Environment, 2006, vol. 41, pp. 1593-1599.

WANG S.-Y., LIN F.-C. et LIN M.-Y. *Thermal properties of interior decorative material and contacted sensory cold-warmth I: relation between skin temperature and contacted sensory cold-warmth.* Journal of wood sciences, 2004, vol. 46, 5, pp. 357-363.

WILSON A. G. *Fuite d'air dans les bâtiments [en ligne].* Disponible sur: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd023_f.html>. (consulté le 11 Septembre 2006).

WOLOSZYN M. *Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones - Proposition d'une stratégie de résolution du système couplé.* Rhône. Lyon: INSA, 1999, 236 p.

YILDIZ S., GEZER E. D. et YILDIZ U. C. *Mechanical and chemical behaviour of spruce wood modified by heat.* Building and Environment, 2005, vol. doi:10.1016/j.buildenv.2005.07.017, pp. 5.

Liste des illustrations

Figure 1-1 : Emissions nettes de CO ₂ au cours du cycle de vie des éléments de construction [Beyer, et al., 2006]	26
Figure 1-2 Nomenclature de la filière bois en France,[Sessi, et al., 2006]	32
Figure 1-3 : Maison à colombage alsacienne (Strasbourg)	35
Figure 1-4 : Maison à ossature en bois (St Didier au mont D'or)	36
Figure 1-5 : Chalet en bois massif empilé	36
Figure 1-6 : Maison en panneaux de bois massifs contrecollés	37
<i>Figure 1-7 : Bardage tavaillon</i>	37
Figure 1-8 : Parquet en bois au grand temple Lyon 3ème	38
Figure 1-9 : Lambris bois à Vilette d'Anthon	38
Figure 1-10 : Composition d'une structure traditionnelle en bois[Morbihan, 2010]	39
Figure 1-11 : Ravinala, construction traditionnelle à base de Ravinala, construction traditionnelle en bambou aplati (Source www.architecture-madagascar.com)	40
Figure 1-12 : Demeure en brique rouge, et recouverte de chaume	41
Figure 1-13 : La case royale d'Andrianampoinimerina	42
Figure 1-14 : Maison réalisée par Cameron au pied du Faravohitra	43
Figure 1-15 : Introduction du bois dans le système Bâtiment - Occupant	44
Figure 1-16 : Positionnement du sujet de thèse	45
Figure 1-17 : Enchaînement de la méthode	47
Figure 2-1: structure en chaîne de la cellulose	50
Figure 2-2: structure moléculaire du glucose	51

<i>Figure 2-3 : Comparaison de MBV de différents matériaux de construction</i>	54
Figure 2-4 : Détermination de l'humidité d'équilibre du bois	56
Figure 2-5: problématique de l'existence des hystérésis	57
Figure 2-6: Représentation des équilibres de l'eau libre et liée avec l'environnement extérieur.	59
Figure 2-8: Graphe représentant les valeurs du PPD en fonction du PMV	67
Figure 2-9 : Diagramme psychrométrique	69
Figure 2-10 : Zones de confort selon ASHRAE [de-Dear, et al., 2005]	70
Figure 2-11 : Pourcentage d'insatisfaits pour le confort thermique local [Fanger, et al., 2002]	71
Figure 2-11 : Thermographie infrarouge du pied en contact avec divers matériaux après 1minute [Barreira, et al., 2007]	73
Figure 2-12 Représentation de l'homme selon ASHRAE	77
Figure 2-13 : Schéma général de fonctionnement du calculateur	80
Figure 2-14: Module de calcul des facteurs de forme ISO 7726	81
Figure 2-15: Module de calcul des facteurs de forme ASHRAE	82
Figure 2-16: Module de calcul de la température moyenne radiante	82
Figure 2-17: Module de calcul de l'écart de température	83
Figure 2-18: Module de calcul du PMV et du PPD	83
Figure 2-19: Module de calcul des PI	84
Figure 3-1 : Saisons dans l'hémisphère nord	88
Figure 3-2: représentation de la zone climatique de la région Rhône-Alpes	89
Figure 3-3: représentation de la zone climatique de la région d'Antananarivo	90
Figure 3-4 : comparaison de l'irradiation globale horizontale (année 2005)	91

<i>Figure 3-5 : comparaison de la température sèche d'air (année 2005)</i>	91
Figure 3-6 : précipitation et humidité relative (année 2005)	92
Figure 3-7: comparaison de la vitesse du vent	93
<i>Figure 3-8 : Matériels de mesure utilisés</i>	95
Figure 3-9 : Points de mesure d'une pièce, les revêtements en bois sont représentés en grisé.	96
Figure 3-10 : Fiche technique de la maison La Grave (G)	98
Figure 3-11 : plan représentant les trois pièces étudiées (G1, G2, G3)	99
Figure 3-12 : Fiche technique de la Maison La Villette (V)	102
Figure 3-13 : plan de l'extension : partie hachurée (V1, V2, V3, V4)	103
Figure 3-14 : Partie de la façade vitrée sud, mur ouest et plafond de la véranda –	104
Figure 3-15 : intérieur de la chambre : ouverture sur la véranda (à gauche) et partie sud-ouest (à droite)(V2)	104
Figure 3-16 : la salle de bain (V3) Figure 3-17 : la buanderie (V4)	105
Figure 3-18 : Présence de revêtement en bois dans les études de cas en France	106
Figure 3-19 fiche technique maison Malagasy (M)	107
Figure 3-20 : plan du niveau 3 de la maison M (M1, M2, M3,M4)	108
Figure 3-21 : niveau rez-de-chaussée (M4, M5, M6, M7)	111
<i>Figure 3-22 : Présence de revêtement en bois dans les locaux d'étude malgaches</i>	113
Figure 3-23 : Variations des températures extérieures et intérieures sur 2 jours	115
Figure 3-24 : Variation des températures diurnes au printemps (G2)	116
Figure 3-25 : Variations des températures nocturnes au printemps (G2)	117
Figure 3-26 : Variation des températures intérieures et extérieures au printemps (G2)	118
Figure 3-27 : Variation de l'humidité relative diurne au printemps (G2)	119

Figure 3-28 : Variation de l'humidité relative nocturne au printemps (G2)	119
Figure 3-29 : Variation de l'humidité relative extérieure et intérieure au printemps (G2)	120
Figure 3-30 : Courbes isothermes du local N°1(G1) pour une température moyenne d'air de 24°C	121
Figure 3-31 : PMV et PPD au printemps (G1) PMV moyen = -1.7 ; PPD = 64.3	123
Figure 3-32 : PMV et PPD au printemps (G2) PMV moyen = -2.5, PPD = 93.6%	123
Figure 3-33 : PMV et PPD en été (G1) PMV moyen = -0.75 ; PPD = 16.9	124
Figure 3-34 : PMV et PPD en hiver (G1) PMV moyen = -1.9, PPD = 72.3	124
Figure 3-35 : PIV pour G1 au printemps	125
Figure 3-36 : PIV pour G1 en été	126
Figure 3-37 : PIV pour G1 en hiver	126
Figure 3-38 : comparaison de températures entre G1, G2 et G3	127
Figure 3-39 : Comparaison de HR entre trois locaux d'une même maison	128
Figure 3-40 : détermination de la zone de point de rosée (printemps dans G, V et M)	131
Figure 3-41 : détermination de la zone de point de rosée (été dans G)	132
Figure 3-42 : détermination de la zone de point de rosée (hiver dans G)	132
Figure 3-43 : Evolution des deux critères de présence de bois dans un local	134
Figure 3-44 : G1 été : PMV moyen = -0.75 et PPD = 16.9	135
Figure 3-45 : G2 été PMV moyen = -0.96 et PPD = 24.6	136
Figure 3-46 : G3 été PMV moyen = -0.9 et PPD = 24.5	137
Figure 3-47 : Evolution du PPD avec le ratio de bois (G1, G2, G3) pour différentes saisons	138
Figure 3-48 : Evolution du PPD avec le ratio de bois dans les locaux de 2 maisons (G et V) sur une saison printemps	139

Figure 4-1 : façade extérieure de la cellule Hybcell	144
Figure 4-2 : coupe transversale et façade nord-est de la cellule	145
Figure 4-3 : diagramme solaire	146
Figure 4-4 : Montage des revêtements en bois des murs de la cellule	148
Figure 4-5 : scénario 1 - tout en bois	149
Figure 4-6 : Cellule avec le mur nord en bois	150
Figure 4-7 : plancher en bois	152
Figure 4-8 : Etat initial de la cellule Hybcell	153
Figure 4-9 : plafond en bois	154
Figure 4-10 : Zone d'influence du mur Sud en bois	157
Figure 4-11 : PMV et PPD pour la configuration sans bois	159
Figure 4-12 : PMV et PPD pour une finition tout bois	160
Figure 4-13 PMV et PPD pour un plafond bois	161
Figure 4-14 : PMV et PPD pour un plancher bois PMV moyen de -0,04 et PPD moyen de 5.11% de personnes insatisfaites	162
<i>Figure 4-15 : PMV et PPD pour le mur nord en bois</i>	163
Figure 4-16 : PMV et PPD pour le mur sud en bois	164
<i>Figure 4-17 : PMV et PPD pour le mur ouest en bois</i>	165
Figure 4-18 : PIV pour la configuration sans bois PIV: 0,66 %	166
Figure 4-19 : PIV pour la configuration tout bois	167
<i>Figure 4-20 : PIV pour un mur nord en bois / PIV=0,73 %</i>	168
<i>Figure 4-21 : PIV pour un mur Sud en bois / PIV=: 0,72 %</i>	168

Figure 4-22 <i>PIV pour un mur Ouest en bois / PIV= 0,94 %</i>	169
Figure 4-23 : Evolution du PPD avec le ratio de bois	171
Figure 4-24 : représentation des enchainements de calcul	174
Figure 4-25 : prise en compte des différences entre mesures et simulations	174
Figure 4-26 : prise en compte de la précision des mesures sur les simulations	175
Figure 4-27 : scenario de revêtement en bois des murs nord et sud	177
Figure 4-28 : scenario de revêtement en bois du mur ouest	177
Figure 4-29 : scenario de revêtement en bois du plafond	178
Figure 4-30 : scenario de revêtement en bois du plancher	178
Figure 4-31 : scenario de revêtement en bois des murs nord, ouest et sud	179
Figure 4-32 : scenario de revêtement initial de la cellule (sans bois)	179
Figure 4-33 : Comparaison des températures dans différents scénarios	180
Figure 4-34 : Influence du bois sur la température	182
Figure 4-35 : Comparaison des humidités relatives dans différents scénarios	183
Figure 4-36 : Comparaison de températures correspondantes aux scénarios de revêtement en bois en été	184
Figure 4-37 : Comparaison de températures correspondantes aux scénarios de revêtement en bois en été	186
<i>Figure 4-38 : Revêtement tout en bois ép = 4cm</i>	187
Figure 4-39 : Revêtement tout en bois ép = 6cm	188
Figure 4-40 : Simulation de scénario : tout en bois léger	189
Figure 4-41 : Simulation de scénario : tout en bois lourd	190

ANNEXES

Annexe A : Le Confort Thermique

La recherche de conditions satisfaisantes d'habitabilité et de bien-être d'un point de vue thermique transparait clairement au travers des structures bâties et de transports actuelles. Elles sont toutes équipées de dispositifs permettant de contrôler le climat intérieur. L'homme semble alors vouloir se maintenir dans un intervalle de conditions climatiques déterminées.

En dehors de cette plage de conditions, naît le sentiment d'insatisfaction et d'inconfort. Cependant, l'absence de cette insatisfaction signifie-t-elle pour autant une situation de confort ? Le confort est-il simplement une absence de gêne ou fait-il intervenir la notion d'agrément ? C'est la question de la définition du confort même qui apparaît. Candas aborde cette thématique et envisage de classer les notions de confort de la manière suivante [Candas, 1998] :

Inconfort : expression de l'insatisfaction ou du désagrément de façon continue ou répétitive ne permettant pas à la nuisance de se « faire oublier » ;

Confort dégradé : résulte de l'apparition épisodique (temporelle) ou locale (spatiale) d'un certain inconfort non persistant ou ressenti localement mais de façon peu intense (par exemple avoir légèrement froid aux pieds) ;

Confort : peut résulter de deux possibilités :

- Se déduit de l'absence exprimée de désagrément ou d'insatisfaction (échelle effective)
- Se déduit de l'incapacité qu'ont les gens à s'exprimer sur leur état hydrique (échelle perspective) ; cette notion est proche de l'indifférence ;

Confort optimale : résulte de l'expression de l'agrément du bien-être exprimé par l'individu par rapport au climat perçu (l'exemple le plus convaincant est celui de la douche : on ajuste la température de l'eau pour la sensation d'agrément recherchée)

Ainsi est-il proposé de faire correspondre au confort l'absence d'inconfort, mais en introduisant cette fois la nuance de confort optimal. Cette nuance fit apparaître le besoin de quantifier la situation de confort. Pour cela on se repose sur trois questions : « que ressent-

on ? », « est-ce agréable ? », « préférerait-on d'autres conditions ? ». A partir de ces interrogations on cherche ainsi à aborder l'évaluation du confort.

Evaluation du confort

La problématique de l'ingénierie du bâtiment, l'évaluation du confort thermique n'est pertinente que si elle offre une possibilité d'action. Cette capacité d'agir n'existe que si les paramètres qui régissent le confort sont connus et modifiables. Par conséquent, il devient indispensable d'appréhender les interactions thermiques entre un individu et son environnement. Celles-ci sont complexes et leur compréhension nécessite l'intervention de plusieurs disciplines.

Le mécanisme de production de chaleur interne et les réactions du corps humain aux conditions climatiques extérieures relèvent du domaine de la physiologie.

Les sensations de confort éprouvées et la quantification des ambiances intérieures sont liées à des comportements psychologiques

Les échanges de chaleur entre le corps et son environnement sont gérés par les lois physiques.

Ces trois domaines distincts que sont la physiologie, la psychologie et la physique interviennent simultanément dans la notion de confort thermique. Cependant, il est difficile de d'établir une définition et une interprétation d'une situation de confort thermique de manière transversale à ces trois domaines. Les différentes définitions avancées jusqu'à présent caractérisent une situation de confort uniquement à la lumière d'un seul facteur.

Aspect physiologique : les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont à un niveau d'activité minimum [Moujalled, 2007]

Aspect sensoriel : l'ensemble des conditions de stimulation simultanées des capteurs sensoriels qui procurent une sensation agréable. Etat d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement [ASHRAE, 1997].

Aspect psychologique et sensoriel : sensation de bien-être physique et mental total.

La physiologie et la psychologie n'offrent pas une compréhension satisfaisante dans le cadre d'une problématique d'ingénierie thermique car elles n'offrent pas la possibilité d'actions. La psychologie pose aussi problème par son échelle. Comment globaliser à l'échelle d'une population des conséquences psychologiques individuelles sur le confort ?

Les échanges thermiques sont la base fondamentale du confort. Les lois de la physique qui les régissent permettent d'identifier les paramètres d'actions susceptibles de modifier une situation thermique. Cependant, la physique est insuffisante pour définir le confort. Il est nécessaire de faire intervenir une dimension physiologique pour prendre en compte les perceptions sensorielles de l'individu.

Sur la base de ces constatations, plusieurs indicateurs ou modèles ont été développés dans les dernières décennies d'une complexité très variable. L'objectif était de proposer une évaluation approximative du confort qui soit valide pour une majorité d'individus.

Différents indicateurs sont présentés ici ? Dans un premier temps il s'agit d'indices simples susceptibles de caractériser une ambiance thermique. Par la suite, l'étude tournera vers des modèles plus avancés destinés à la détermination d'une situation de confort thermique par l'étude de phénomène physique et physiologiques.

Indices environnementaux simples.

La température résultante ou température opérative

La température opérative est un indice de confort intégrant l'effet de la convection et du rayonnement (t_a et t_r). Elle est en fait définie comme la température d'une enceinte isotherme dans laquelle un occupant échange la même quantité de chaleur par rayonnement et convection que dans l'enceinte dans laquelle il se trouve réellement [Bruant, 1997]. Elle peut être écrite de la façon suivante.

$$t_{op} = \alpha \cdot t_a + (1-\alpha) \cdot t_w$$

avec

t_a la température d'air [°C]

t_w la température radiante moyenne

α paramètre dépendant exclusivement de la vitesse d'air

La température opérative peut-être déterminée expérimentalement grâce à l'utilisation de globe noir, dont le diamètre est déterminé de façon que les échanges de chaleur par convection et par rayonnement soient dans les mêmes proportions que pour le corps humain. Pour une convection naturelle avec une vitesse d'air faible (entre 0,1 et 0,15 m/s), un globe de 40mm de diamètre est suffisant. Une balle de tennis est parfois utilisé (38mm de diamètre), elle représente ainsi un modèle physique simple du corps humain [Nicol, et al., 2002]

La température équivalente

La température équivalente est définie comme étant la température d'une enceinte isotherme ayant une vitesse d'air nulle, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur sensible, par convection et rayonnement, que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Elle permet de prendre en compte les effets des températures d'air, de rayonnement et de la vitesse d'air (t_a , t_r et v_a). Elle peut être calculée à partir de la température à l'intérieur d'un globe chauffé.

La température effective ET*

La température effective est définie comme étant la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur et aurait même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. L'indice ET* prend en compte les effets de la température et de l'humidité (t_a , t_r , et p_a), et pour le calculer, il faut connaître la mouillure cutanée et l'indice de perméabilité à la vapeur d'eau des vêtements (i_m). L'ASHRAE a établi des échelles de confort basées sur cet indice pour des sujets exerçant une activité faible (1 Met), ayant une vêtue de 0,6 Clo et dans une ambiance calme ($v_a < 0,2$ m/s).

Les indices de confort et modélisations

Les trois indices simples présentés permettent de caractériser partiellement une ambiance thermique en se rapprochant de la notion de perception thermique de l'utilisateur. Ils ne permettent cependant pas de caractériser complètement une situation de confort, de prendre

en compte la diversité des perceptions, des préférences, des acceptabilités et des conditions d'ambiances. Pour palier cette lacune, des modèles de comportement thermique des êtres humains et de leur état de confort ont été développés. Dans la littérature scientifique, on trouve une grande variété de modèles de perception humaine des conditions thermiques comme le modèle de Gagge à deux nœuds ou encore le modèle complexe de Stolwijk pour la NASA [Moujalled, 2007]. Ces modèles sont en réalité pour la plupart issus de la physiologie et leur complexité est adaptée à usage particulier comme l'aéronautique. Le modèle à un nœud de Fanger est l'un des rares modèles spécifiques au bâtiment. C'est pour cette raison qu'il est plus particulièrement développé dans ce mémoire.

Modèle de Fanger

Ce modèle statique est celui initié par les travaux du danois Fanger [Fanger, et al., 2002]. Les normes utilisées actuellement pour établir les modèles et indices de confort thermique pour une approche statique s'inspire de ces travaux : ISO 7733 et ASHRAE 55. Il se base sur une approche physique et expérimentale de la notion de confort thermique.

Equilibre thermique

Le confort thermique d'un individu correspond à une notion d'équilibre thermique. L'homme est un animal « homéotherme », c'est-à-dire dont la température interne est régulée. Ce « noyau central » homéotherme (le cerveau, les viscères) est maintenu à une température d'environ 37°C à quelques dixièmes de degré près. Les phénomènes permettant de contrôler cette température sont réunis sous l'appellation de thermorégulation. Lorsqu'un individu est en condition de confort thermique, les processus de thermorégulation sont minimes et inconscients. Ces processus sont de deux types :

La thermorégulation « chimique » c'est-à-dire l'augmentation ou la diminution du métabolisme de la production interne de chaleur

La thermorégulation physique, c'est-à-dire la modification des paramètres d'échange avec l'environnement extérieur, qu'ils soient effectués au moyen d'une régulation physiologique (vasodilatation, vasoconstriction, sudation, tremblements...) ou de la modification des paramètres d'ambiance ou de vêture. Cette thermorégulation peut-être purement reflexe et inconsciente. Cependant, lorsque son intensité devient trop importante, les phénomènes de

thermorégulation peuvent devenir conscients puisqu'ils s'expriment par des signes physiques sensibles (par exemple la sudation est perceptible). Lorsque cette intensité est atteinte, on entre dans le domaine de l'inconfort. Les travaux de Fanger ont pour objectif d'identifier ces seuils qui régissent les conditions de confort.

Aire cutanée

Les équations d'échange thermique entre l'homme et son environnement sont définies en termes de flux énergétique par m² de peau [W/m²]. il est donc nécessaire de définir l'aire cutanée. Pour cela, on utilise l'aire de Dubois :

$$A = 0,203 \times m^{0,425} \times H^{0,725}$$

Où

m est la masse du corps humain considéré [kg]

H la hauteur du corps humain considéré [m]

Production interne de chaleur, le métabolisme

Pour assurer ses fonctions vitales, l'homme dégrade des substances énergétiques en permanence, en consommant de l'oxygène et en produisant du CO₂. Or pour l'homme, comme pour toute machine thermique, ce dégagement d'énergie est associé à des pertes sous forme de dégagement de chaleur. Ainsi, une part du métabolisme cellulaire se traduit par une production de chaleur interne. Si on note M le métabolisme, production totale d'énergie, Mth le dégagement de chaleur occasionné et W le travail mécanique fourni alors :

$$M = Mth + W$$

On définit un rendement $\eta = W / M$. Ce rendement est compris entre 0 et 0,2 dans les situations courantes.

Le métabolisme et le dégagement de chaleur interne qui s'ensuit dépendent de l'activité de l'individu. La norme 7730 quantifie le métabolisme en fonction de l'activité. Le tableau indique ces valeurs en Met, l'unité de métabolisme, avec 1Met équivalent à 58W.m⁻².

Variation du métabolisme en fonction de l'activité (Iso 7730)

Activité	Métabolisme [Met]
Assis au repos	1
Assis écriture	1,1
Travail assis sur PC	1,2
Debout au repos	1,2
Activité légère debout	1,6
Activité moyenne debout	2

Echange de chaleur avec l'environnement

Pour que la température interne ait des variations acceptables, la chaleur échangée avec l'environnement doit être sensiblement équivalente à la chaleur interne produite. Les modalités d'échanges entre le corps humain et l'environnement extérieur sont conditionnées par les lois physiques d'échange de chaleur et les capacités physiologiques humaines. On dénombre six modes d'échanges de chaleur entre l'homme, sa vêtue et l'environnement.

Les échanges convectifs

Les échanges radiatifs

Les échanges de chaleur sensible par respiration

Les échanges de chaleur latente par respiration

Les échanges de chaleur latente par diffusion de vapeur d'eau au travers de la peau

Les échanges de chaleur latente par transpiration

Les échanges par conduction ne sont généralement pas pris en compte. En effet, les dimensions réduites des surfaces mises en jeu et la faible intensité des flux rendent la contribution des phénomènes conductifs négligeables.

Les échanges convectifs

La convection correspond aux échanges de chaleur entre le corps et l'air entourant. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement, en cas de convection naturelle. Si l'air est plus froid, le corps se refroidit par le mouvement de l'air qui se réchauffe au contact du corps et s'élève pour former un contour de panache au dessus de la tête avant d'être dissipé dans l'environnement [Nicol, 1993]. Le mouvement de l'air peut aussi être imposé en cas de convection forcée ou mixte. En plus, il faut prendre en compte le mouvement relatif de l'air par rapport au corps en cas de certaines activités (marche, course,...) qui s'ajoute au mouvement effectif de l'air. Quand l'air est plus chaud que la surface en contact, la convection résulte par un réchauffement du corps. L'échange convectif dépend de la différence entre la température d'air et celle du corps, peau ou vêtement, et du mouvement de l'air autour du corps. Il est calculé par l'expression suivante [ASHRAE, 1997].

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

avec

C = flux de chaleur convectif, W/m^2

f_{cl} = facteur d'habillement

h_c = coefficient d'échange convectif, $W/m^2.K$

t_{cl} = température de la surface externe du vêtement, $^{\circ}C$

t_a = température d'air, $^{\circ}C$

Le facteur f_{cl} est le rapport de la surface vêtue du corps à la surface corporelle, il est égal à 1 pour un sujet nu. Le coefficient d'échange convectif h_c dépend du mouvement de l'air effectif autour du corps. Il dépend aussi de la posture et de l'activité. ASHRAE [ASHRAE, 1997] propose plusieurs expressions empiriques pour calculer h_c selon différentes configurations (personne assise, debout, en marche dans un air calme ou en mouvement), avec les limites d'application exprimées en termes de vitesse d'air.

$$h_c = 3,5 + 5,2 \cdot V_{ar} \text{ pour } V_a \leq 1m/s$$

$$h_c = 8,7 \cdot V_{ar}^{0,6} \text{ pour } V_a > 1m/s$$

La vitesse d'air résultante V_{ar} tient compte de la vitesse d'air V_a et des vitesses liées aux déplacements et à l'activité du sujet selon la proposition :

$$\begin{cases} V_{ar} = V_a + 0,0052.(M - 58) \text{ si } M \leq 200 \\ \text{sinon } V_{ar} = V_a + 0,0052.(200 - 58) \end{cases}$$

Dans le modèle du PMV et du PPD utilisé dans cette étude h_c est déterminé de la façon suivante [AFNOR, ISO 7730] :

$$h_c = 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} \text{ si } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{v_a} \text{ et } 12,1\sqrt{v_a} \text{ sinon}$$

avec :

t_{cl} : la température de la v\^eture calculée en fonction de la résistance thermique due aux vêtements, du métabolisme, et du rapport entre la surface du corps habillé et la surface nue.

t_a : la température de l'air. (K)

v_a : la vitesse de l'air. (m.s-1)

Les échanges radiatifs

L'échange radiatif est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux corps par ondes électromagnétiques. On distingue deux catégories selon la bande d'émission : les échanges courtes longueurs d'onde (rayonnement solaire) non pris en compte dans les bâtiments, et les échanges grandes longueurs d'onde (rayonnement infrarouge) avec les parois qui entourent le sujet. A la température ambiante (300 K), toutes les surfaces émettent des radiations principalement dans l'infrarouge dont la puissance est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface. Ainsi, le corps humain émet en permanence une chaleur radiative liée à sa température cutanée et son émissivité, de même que les parois qui l'entourent. Le flux radiatif échangé par le corps correspond à la différence entre le rayonnement émis par celui-ci et le rayonnement reçu de son environnement [Moujalled, 2007]. Si le rayonnement reçu par le corps est supérieur à sa propre émission, le corps se réchauffe, et se refroidit dans le cas inverse. Pour simplifier le calcul du flux radiatif, la température moyenne de rayonnement est utilisée à condition que l'environnement thermique

soit homogène. Elle est une moyenne pondérée des températures de surface des parois du local en fonction de leur émissivité et de leurs positions relatives par rapport au sujet. En plus, une approximation linéaire est utilisée pour écrire l'équation du flux radiatif en raison des faibles écarts de température.

L'expression est la suivante [ASHRAE, 1997].

$$R = f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - t_r)$$

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot f_{eff} \cdot \left[273,2 + \frac{t_{cl} + t_r}{2} \right]^3$$

vec

R = flux de chaleur radiatif, W/m²

f_{cl} = facteur d'habillement

h_r = coefficient d'échange radiatif linéarisé, W/m².K

t_{cl} = température de la surface externe du vêtement, °C

t_r = température radiante moyenne, °C

ε = émissivité moyenne du corps

σ = constante de Stefan-Boltzmann, 5.67×10⁻⁸ W/m²K⁴

f_{eff} = coefficient effectif de surface rayonnante

Le coefficient f_{eff} est le rapport entre la surface du corps qui rayonne et la surface corporelle totale. Il joue le rôle d'un facteur de forme et dépend de la posture : 0.70 pour une personne assise et 0.73 pour une personne debout. Quant à l'émissivité, elle est typiquement proche de l'unité [ASHRAE, 1997]

Dans la plupart des cas, les environnements thermiques dans les bâtiments peuvent être considérés homogènes dans les zones occupées. Mais si l'environnement radiatif est

fortement hétérogène (large baie vitrée, panneaux rayonnants), la température moyenne de rayonnement est insuffisante, il faut prendre en compte l'asymétrie de rayonnement. Les équations du flux convectif et du flux radiatif sont souvent combinées en vue d'exprimer l'échange total de chaleur sensible, par convection et rayonnement, en termes de la température opérative t_o et le coefficient d'échange de chaleur sensible h .

$$(C + R) = f_{cl}.h.(t_{cl} - t_o)$$

$$T_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c . t_a}{h_r + h_c}$$

$$h = h_r + h_c$$

avec $(C+R)$ = échange de chaleur sensible cutané, W/m²

t_o = température opérative, °C

h = coefficient d'échange de chaleur sensible, W/m²K

En considérant le vêtement comme une seule couche à travers laquelle les transferts de chaleur se font uniquement par conduction entre la peau à température t_{sk} et la surface du tissu à température t_{cl} , les transferts de chaleur sensible peuvent être écrits de la façon suivante.

$$C+R = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{R_{cl}}$$

$$C+R = \frac{t_{sk} - t_o}{R_{cl} + \frac{1}{f_{cl}h}}$$

Avec R_{cl} = résistance thermique vestimentaire, m²K/W

Echanges de chaleur latente : évaporation

L'évaporation est le mode d'échange de chaleur dû au changement d'état de l'eau. Elle est le moyen essentiel pour évacuer la chaleur dans les ambiances chaudes par évaporation de la sueur à la surface cutanée. Le système de thermorégulation détermine le débit de sueur

nécessaire pour conserver l'équilibre thermique du corps. Le phénomène moteur de l'évaporation sur une surface humide est le gradient de pression de vapeur entre la surface cutanée, l'air environnant et la mouillure cutanée.

$$E_{sk} = \frac{\omega(p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl}h_e}}$$

Avec

Avec

E_{sk} = échange de chaleur évaporative cutanée, W/m²

p_a = pression de vapeur d'air, kPa

$p_{sk,s}$ = pression de vapeur à la surface de la peau, kPa (considérée saturée)

$R_{e,cl}$ = résistance vestimentaire à l'évaporation, m².kPa/W (similaire à R_{cl})

h_e = coefficient d'échange de chaleur par évaporation W/m².kPa (similaire à h)

ω = mouillure cutanée

Le coefficient d'évaporation h_e peut être calculé à partir du coefficient d'échange convectif h_c moyennant la relation de Lewis ($h_e/h_c = LR$, où LR est le « Lewis ratio », il est approximativement 16,5 °C/kPa pour des conditions intérieures typiques). [ASHRAE, 1997]

La mouillure cutanée est le rapport entre l'évaporation actuelle E_{sk} et l'évaporation maximale possible E_{max} (obtenu en remplaçant ω par 1 dans l'équation 1.13). Elle représente la fraction équivalente de peau mouillée pour obtenir l'évaporation observée (pour $\omega=1$ la peau est complètement mouillée) [Thellier, 1989]. La mouillure cutanée dépend de la production de sueur qui est déterminée par le système de thermorégulation. D'ailleurs elle n'est jamais nulle, il y a toujours une diffusion de l'eau à travers les cellules cutanées. Il s'agit de perspiration insensible, elle vaut 6% de l'évaporation maximale.

Les échanges de chaleur par respiration

Pendant la respiration, le corps échange de la chaleur sensible et latente, par convection et évaporation, avec l'air inhalé. A la sortie des poumons, l'air expiré est à une température proche de la température interne du corps, et il est presque saturé. La respiration s'accompagne ainsi d'un transfert de chaleur et de masse. Ces échanges dépendent des différences de température et d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant, et du débit ventilatoire. L'ASHRAE donne l'équation suivante pour calculer les échanges respiratoires

[ASHRAE, 1997].

$$C_{\text{res}} + E_{\text{res}} = 0,0014.M.(t_{\text{exp}} - t_a) + 0,0173.M.(P_{\text{exp}} - P_a)$$

avec

C_{res} = flux de chaleur par convection respiratoire, W/m²

E_{res} = flux de chaleur par évaporation respiratoire, W/m²

M = production de chaleur métabolique, W/m²

t_{exp} = température de l'air expiré, °C (~34 °C)

t_a = température de l'air ambiant, °C

P_{exp} = pression de vapeur d'eau dans l'air expiré, kPa (5,87 kPa à 34°C)

P_a = pression de vapeur d'eau dans l'air, kPa

Les conditions du confort thermique

La première condition nécessaire est que l'équilibre thermique en régime stationnaire soit respecté, c'est-à-dire que la température du noyau interne soit maintenue constante dans le temps.

$$M - W = Q_{\text{sk}} + Q_{\text{res}} + S$$

$$= (C + R + K + E_{\text{sk}}) + (C_{\text{res}} + E_{\text{res}}) + S_{\text{sk}} + S_c$$

avec

M = taux du métabolisme, W/m^2

W = travail externe, W/m^2

Q_{res} = flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m^2

Q_{sk} = flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m^2

C_{res} = flux de chaleur échangé par convection respiratoire, W/m^2

E_{res} = flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire, W/m^2

C = flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau, W/m^2

R = flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau, W/m^2

K = flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau, W/m^2

E_{sk} = flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau, W/m^2

S_{cr} = taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, W/m^2

S_{sk} = taux de chaleur stockée dans la peau, W/m^2

Discussions sur l'approche statique et autres modèles

Le PMV peut être calculé à partir des six paramètres de base du confort thermique décrits dans les paragraphes précédents. Cependant, il a été déterminé dans des conditions stationnaires (chambres climatiques), par conséquent son application reste limitée aux ambiances stationnaires et homogènes où les conditions ne varient pas ou peu, dans le temps. Dans le cas où une ou plusieurs variables auraient des fluctuations légères, le PMV pourrait être utilisé à condition de considérer les moyennes pondérées en fonction du temps pendant la période de 1h précédente. Ces limites de validité liées aux conditions d'obtention du PMV font parties des remises en cause des modèles statiques comme celui de Fanger. A cela s'ajoute la mauvaise prise en compte des comportements adaptatifs que peuvent avoir les

individus. Au centre des critiques, le PMV a vu son domaine de validité discuté, malgré les tentatives d'amélioration de Fanger [Fanger, et al., 2002, Moujalled, 2007].

La norme Iso 7730 ou des études menées par Humphreys ont abouti à la détermination de conditions d'application du PMV différentes.

Domaine de validité du PMV selon ISO 7730 et Humphreys

Les conditions de validité du PMV selon la norme Iso 7733	Les conditions de validité du PMV selon Humphreys
$10^{\circ}\text{C} < T_a < 30^{\circ}\text{C}$	$10^{\circ}\text{C} < T_a < 30^{\circ}\text{C}$
$10^{\circ}\text{C} < T_{\text{rmt}} < 40^{\circ}\text{C}$	$10^{\circ}\text{C} < T_{\text{rmt}} < 40^{\circ}\text{C}$
$V_a < 1\text{m.s}^{-1}$	$V_a < 0,2\text{m.s}^{-1}$
$\text{Pa}(\text{H}_2\text{O}) < 2,7\text{ kPa}$	$\text{Pa}(\text{H}_2\text{O}) < 2,2\text{ kPa}$
$I_{\text{cl}} < 2\text{ clo}$	$0,3 < I_{\text{cl}} < 1,2\text{ clo}$
$M < 4\text{ met}$	$M < 1,4\text{ met}$

Ces considérations ont plus d'importance en conditions d'été. C'est en effet à cette saison que les homogénéités des ambiances sont les plus grandes. < dans ces conditions particulières, il a été démontré que le PMV avait tendance à surestimer l'inconfort chaud. D'autres indices issus du modèle de Gagge par exemple permettent de mieux s'approcher de la situation de confort [Moujalled, 2007]. Le modèle de Gagge est dynamique et basé sur deux nœuds concentriques : le corps et la peau. Les transferts thermiques entre les deux nœuds se font par conduction tissulaire et convection via la circulation sanguine.

Gagge propose notamment d'utiliser la température effective ET^* (calcul standardisé par l'ASHRAE pour donner l'indice SET : température effective standard, afin de calculer le PMV. Le PMV ainsi calculé, noté PMV^* permet de mieux retranscrire l'effet de l'humidité en climats chauds.

Au-delà des considérations sur le domaine de validité du PMV, l'indicateur PPD est aussi sujet aux critiques. En effet, dans son modèle, Fanger associe le confort à une sensation

thermique nulle, soit un PMV nul. Or l'expérience montre que la situation de confort serait en réalité d'un PMV égal à +0,5 [Candas, 1998].

Les normes en matière de confort thermique

L'organisation internationale de normalisation, l'ISO, propose des normes concernant l'ergonomie des ambiances thermiques. Elle spécifie les méthodes de mesurage et d'évaluation des ambiances thermiques. L'utilisation des normes vaut tant pour l'appréciation et l'amélioration de conditions thermiques existantes que pour la conception de nouvelles conditions. Parmi les normes thermiques, il y a celles relatives aux ambiances chaudes, modérées ou froides, celles qui traitent le contact humain avec les surfaces solides, et celles qui sont normes de support (tableau 1.7).

Pour les ambiances thermiques chaudes, la norme ISO 7243 propose une méthode simple basée sur le calcul d'un indice, le WBGT (wet bulb globe temperature). Si cet indice dépasse les valeurs de référence, une analyse du bilan thermique et de la sudation requise sera nécessaire comme l'indique la norme ISO 7933. La norme ISO 9886 précise la modalité de mesures physiologiques de l'astreinte thermique.

La norme ISO 7730 fournit une méthode analytique pour l'évaluation des ambiances thermiques modérées en se référant aux indices PMV et PPD. Elle intègre aussi les inconforts locaux. Cette norme a été révisée en 2005. La nouvelle révision proposée prend en compte l'effet de l'augmentation de la vitesse d'air (pour compenser une élévation de la température d'air), l'humidité relative, l'inconfort thermique local et le confort thermique général à long terme (en fonction d'un facteur de pondération utilisé pour calculer le nombre ou le pourcentage d'heures où le PMV et la température opérative sont au-delà d'une plage spécifiée). Elle aborde l'adaptation et son influence dans les bâtiments non climatisés (utilisant la ventilation naturelle) sans proposer un modèle ou une alternative. Enfin elle propose trois catégories de confort thermique : catégorie A ($PPD < 6\%$ et $|PMV| < 0.2$), catégorie B ($PPD < 10\%$ et $|PMV| < 0.5$) et catégorie C ($PPD < 15\%$ et $|PMV| < 0.7$). Le Tableau 1.6 présente un exemple d'exigences de confort thermique. Enfin, dans les ambiances modérées, la norme ISO 10551 permet d'évaluer les réponses subjectives des personnes dans les ambiances modérées en fournissant plusieurs échelles de jugements subjectifs.

Les exigences de confort thermique pour les types de lieux indiqués

Type de bâtiment / Lieu	Activité (met)	Catégorie	Température opérative (°C)		Vitesse moyenne max de l'air (m/s)	
			Été (saison de refroidissement de l'ambiance)	Hiver (saison de réchauffement de l'ambiance)	Été (saison de refroidissement de l'ambiance)	Hiver (saison de réchauffement de l'ambiance)
Bureau individuel « Open-space »	1.2	A	24.5 ± 1.0	22.0 ± 1.0	0.12	0.10
Salle de conférence		B	24.5 ± 1.5	22.0 ± 2.0	0.19	0.16
Auditorium Restaurant Salle de classe		C	24.5 ± 2.5	22.0 ± 3.0	0.24	0.21
Catégorie	Différence verticale de température (°C)	Plage de température du sol (°C)	Asymétrie de rayonnement de température (°C)			
			Plafond chaud	Mur froid	Plafond froid	Mur chaud
A	< 2	19 – 29	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 3	19 – 29	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 4	17 – 31	< 5	< 13	< 18	< 35

Pour les ambiances thermiques froides, la norme ISO 11079 présente une méthode analytique pour déterminer l'isolement requis vestimentaire. Le contact avec les surfaces solides est traité dans les parties 1, 2 et 3 de la norme ISO 13732 (surfaces à température chaude, modérée et froide respectivement). Les normes de support permettent de déterminer le métabolisme (ISO 8996) ou l'isolement vestimentaire (ISO 9920). D'autres précisent les caractéristiques des instruments et les méthodes de mesures des grandeurs physiques de l'ambiance thermique (ISO 7726), ou les principes et l'application des normes internationales pertinentes (ISO 11399) ainsi que les symboles et le vocabulaire (ISO 13731). Certaines normes ont été homologuées en normes françaises et/ou européennes. En France, la réglementation thermique RT2000 a consacré pour la première fois une partie sur le confort thermique d'été, le confort thermique d'hiver étant assuré par le chauffage (les températures de consigne sont définies pour les différents types d'usage des bâtiments). La RT2000 vise à limiter les surchauffes en été dans les bâtiments non climatisés et à réduire les consommations de climatisation dans ceux climatisés. L'objectif réglementaire se décline en deux exigences : d'une part, respecter des exigences minimales qui concernent l'ouverture libre des baies (30 % pour les locaux courants et 10 % pour les locaux de grande hauteur) et la protection solaire des locaux de sommeil (devant respecter les valeurs de référence), et d'autre part obtenir pour

le bâtiment (ou chacune de ses zones) une température intérieure conventionnelle T_{ic} inférieure ou égale à celle obtenue dans le bâtiment sur lequel sont déterminées les valeurs de référence T_{icref} . Cette exigence peut être vérifiée par le calcul ou par le respect direct des références. Le calcul de T_{ic} et T_{icref} se fait suivant les règles th-E de la réglementation RT2000. La RT2000 est remplacée par la RT2005 qui incite à limiter le recours à la climatisation, en lien avec le renforcement des exigences sur le confort d'été ainsi que le calcul des éventuelles consommations de génération de froid.

Liste des normes ISO qui traitent les ambiances thermiques.

	<i>Norme</i>	<i>Titre</i>
Ambiance modérée	NF EN ISO 7730	Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local (2005)
	NF EN ISO 10551	Ergonomie des ambiances thermiques – Evaluation de l’influence des ambiances thermiques à l’aide d’échelles de jugements subjectifs (Juin 2001)
	ISO 13732-2	Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 2: Contact humain avec des surfaces à température modérée (2001)
Ambiance chaude	ISO 7243 (NF EN 27243)	Ambiances chaudes – Estimation de la contrainte thermique de l’homme au travail, basée sur l’indice WBGT (température humide et de globe noir), (Février 1994)
	ISO 7933 (NF EN 12515)	Ambiances thermiques chaudes – Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de la sudation requise (Septembre 1997)
	ISO 13732-1	Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 1: Surfaces chaudes
Ambiance froide	ISO 11079	Évaluation des ambiances froides -- Détermination de l'isolement requis des vêtements (1993)
	ISO 13732-3	Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 3: Surfaces froides (2005)
Normes de support	NF EN ISO 11399	Ergonomie des ambiances thermiques – Principes et application des Normes internationales pertinentes (Mars 2001)
	NF EN ISO 7726	Ergonomie des ambiances thermiques – Appareils de mesure des grandeurs physiques (Janvier 2002)
	NF EN ISO 9886	Evaluation de l’astreinte thermique par mesures physiologiques (Juin 2001)
	ISO 8996 (NF EN 28996)	Ergonomie – Détermination de la production de la chaleur métabolique (Février 1994)
	NF ISO 9920	Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination de l’isolement thermique et de la résistance à l’évaporation d’une tenue vestimentaire (Juin 1995)
	NF EN ISO 12894	Ergonomie des ambiances thermiques – Surveillance médicale des personnes exposées à la chaleur ou au froid extrêmes (Septembre 2001)
	NF EN ISO 13731	Ergonomie des ambiances thermiques – Vocabulaire et symboles (Mai 2002)

Annexe B : Choix De Revêtement En Bois

Nous avons effectué des mesures in situ et en laboratoire pour observer des ambiances présentant des revêtements en bois. Le bois à l'état naturel n'est pas très courant et pourtant, l'effet du bois ne peut se faire sentir que sur du bois non traité en surface (sans finition en vernis, lasure, peinture) donc notre choix a été conditionné. Nous avons rencontré quelques problèmes déjà pour trouver ces ambiances mais aussi pour faire accepter nos expérimentations chez les familles concernées. Il y a des occupants qui sont plus engagés et qui ont eu leur choix de matériau (propriétaires ou locataires plus exigeants) : ils sont plus intéressés par notre travail et ceux qui admettent les revêtements intérieurs existants sans forcément conditionner leur choix (employés, locataires...) c'est plutôt l'emploi du temps pour un rendez-vous qui pose problèmes. Au final, nous avons des maisons dont les propriétaires ont eu leur choix et ont décidé eux même de revêtir en bois les murs intérieurs.

Afin de caractériser l'influence du bois sur le confort nous avons choisi d'étudier 6 configurations types. La première servira de témoin et sera comparée aux suivantes. Les quatre autres ont été choisies pour leur simplicité de configuration mais aussi pour le fait qu'il s'agisse de configurations type de finition intérieure en bois.

La configuration sans bois

Cette configuration servira de témoin et sera opposée aux autres afin de pouvoir caractériser l'impact du bois. A l'origine la cellule HYBCELL est composée de différents matériaux sur chacune de ses parois comme décrite en 3.2.2. La paroi Est est composée d'une large baie vitrée dont la surface représente 57% de la façade, le support de la fenêtre en aluminium représente 32% de la surface et 10 % sont composés de béton. Le mur Nord est en béton nu, les murs Ouest et Sud sont, quant à eux, composés d'une cloison formée de deux plaques minces en acier séparés un espace de 6 cm rempli de laine de roche. Le plancher est composé de dalle en agglomérée de béton, et le plafond est un faux plafond.

La configuration tout bois

De nombreuses constructions ont un intérieur de ce type. Ce schéma de finition se retrouve par exemple dans la finition intérieure des chalets de montagnes (voir figure 38). Nous avons

choisi de prendre ce scénario en compte. La fenêtre placée sur le mur Est reste cependant en l'état dans la cellule HYBCELL.



Figure 4 : Intérieur de chalet
(le-bois.com)



Figure 5 : HYCELL intérieur bois

La configuration plafond bois

L'utilisation traditionnelle du bois pour les planchers à un pendant direct que sont les plafonds en bois. Les plafonds en bois avec poutres apparentes sont particulièrement prisés. Ils donnent en effet un certain cachet à la pièce. On retrouve cette configuration dans de nombreux cas, que ce soit du au plancher supérieur ou bien juste dans un souci purement esthétique. Ci-dessous une photographie prise dans la cuisine d'une maison que nous avons visitée à St Didier au mont d'or en début de thèse.



Figure 6 : Configuration plafond bois (maison à St Didier au mont d'or-Rhône)

La configuration plancher bois

L'utilisation du bois pour les planchers est une méthode constructive extrêmement répandue. Le parquet est en effet très demandé pour la beauté de sa finition ainsi que pour « la chaleur » qu'il apporte. On le retrouve aussi bien dans les habitats traditionnels que dans les constructions neuves, dans les bâtiments d'habitats que dans le tertiaire et même dans les salles de sport. Il était donc inévitable d'étudier cette configuration.



Figure 7 : Parquet bois (maison à Madagascar)

La configuration mur bois

Avoir un seul mur en bois est une configuration plus rare mais qui existe aussi. De plus la prise en compte de cette configuration permet de mieux mettre en évidence l'impact du bois sur le confort thermique. Nous avons pu rencontrer ces murs dans la maison à Madagascar que nous avons utilisé dans cette étude.



Figure 8 : Configuration mur en bois (maison à Madagascar)

Maison à St Didier au mont d'or

La maison se situe sur la commune de Saint-Didier-au-Mont-d'or, au nord de Lyon.

Le terrain en pente douce bénéficie d'une vue exceptionnelle sur les Alpes, le Mont Pilat et la plaine lyonnaise. La maison prend place dans un site résidentiel à faible densité alternant des espaces bâtis et des zones encore très rurales. Le bâtiment reflète ses fonctions intérieures par un jeu de volumes. La salle à manger et la cuisine, ouvertes sur la terrasse et le jardin par de grandes baies affirment leur côté festif et collectif. Le séjour, plus intimiste, se blottit en contrebas de la salle à manger. Une verrière apporte une lumière indirecte et douce dans ce lieu calme. Les chambres sont regroupées à l'étage et en façade est, elles profitent du terrain en pente pour s'ouvrir vers la ville et les Monts du Lyonnais.

C'est une maison à ossature bois sur maçonnerie et sous-sol partiel. Les murs bois sont en panneaux et poteaux-poutre. Nous avons des revêtements extérieurs en bardage en bois Red Cedar prétraité. Certains plafonds en solives apparentes.

Nous avons une ferme traditionnelle : charpente à 4 pans avec tirant métallique, charpente rayonnante cintrée.

Menuiseries Alu laqué ton gris anthracite

Toiture zinc préformées ou à joint-debout, toiture terrasse avec gravier ou caillebotis, chauffage géothermique.

Plancher chauffant en rez-de-chaussée. Ventilo-convecteur réversible

A l'étage. Sèches serviettes mixtes dans les salles de bains.

Carrelage grand format dans cuisine, cellier, salle à manger. Parquet en bois (Merbau) massif collé dans salon. Parquet chêne massif sur lambourde et isolant à l'étage.



Figure 9 : Maison à St Didier au Mont d'or

.....

Annexe C : Photo Infrarouge

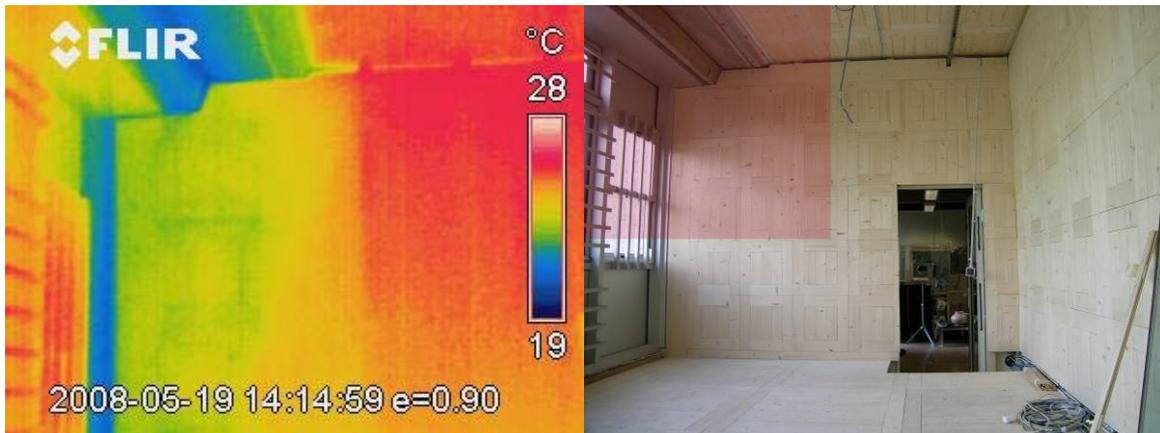


Figure 10 : Photo IR prise sur le mur Sud de Hybcell

Comme nous pouvons remarquer, nous avons une variation brusque de température de surface entre le bord des ouvertures vitrées et le reste du mur. Sur environ 50cm, la température est de 23°C et à partir de 50cm nous avons une surface isotherme avoisinant la température d'air à cet instant : 28°C.

Dans la photo IR, le cadre ne peut couvrir que la surface indiquée sous le carré rouge transparent de la photo réelle du mur.

Dans la photo suivante, nous remarquons comment on a pu observer le caractère isotherme des surfaces revêtues en bois. Ici, nous avons le plafond.

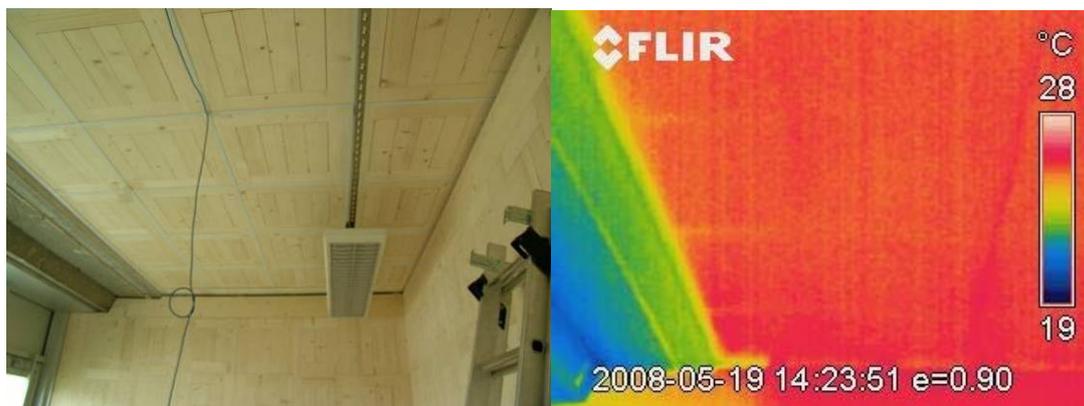


Figure 11 : Observation de l'uniformité de température sur une surface revêtue en bois

Nous pouvons observer que la partie du plafond en béton a une température nettement inférieure au reste du plafond qui est en bois. La couleur de la surface en rouge sur la photo infrarouge nous indique une température uniforme de 28°C pour une température d'air moyenne intérieur de 27.2°C à cet instant de la prise de photo IR.

En plus, nous avons effectué un enregistrement toutes les secondes pour que la caméra puisse couvrir une surface entière de paroi. Nous mesurons ainsi la température moyenne de la surface et nous observons la variation sur une même hauteur (pour les murs verticaux) et sur une même ligne pour les parois horizontales.

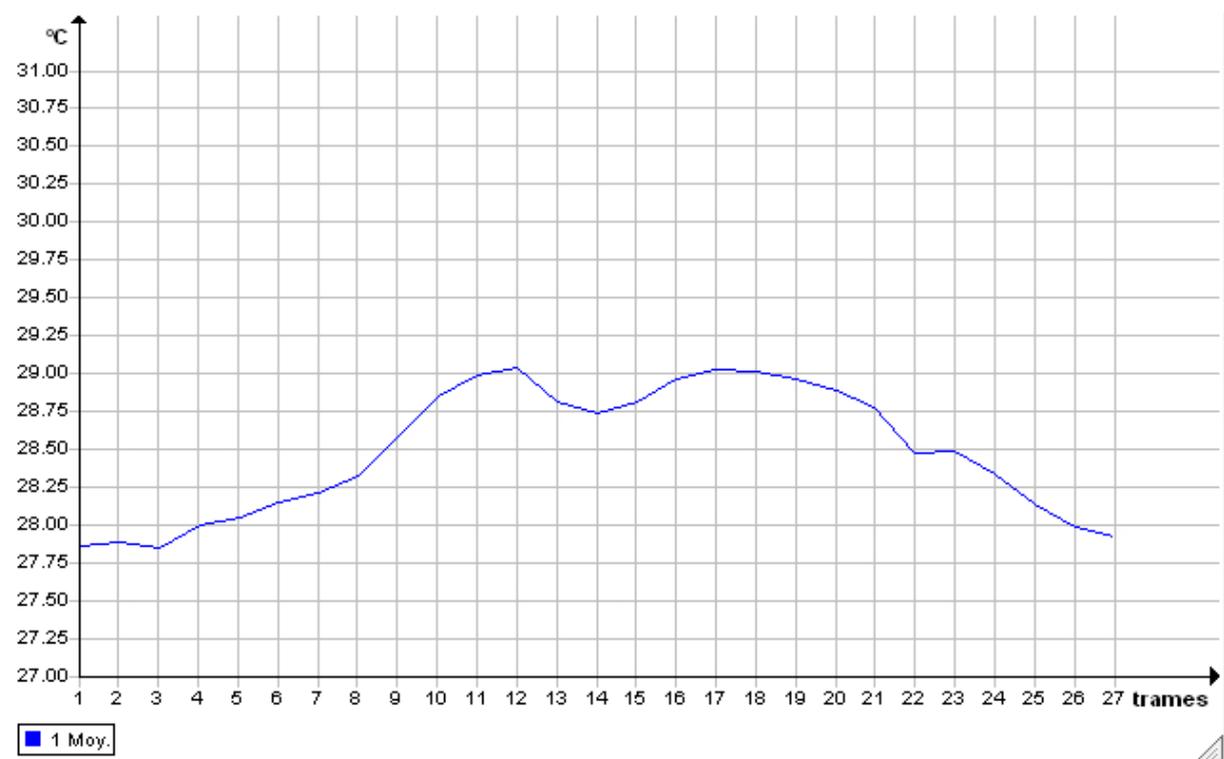


Figure 12 : Graphique des températures obtenues par seconde avec une couverture d'environ 50cm par seconde

Chaque numéro de trame correspond alors à une couverture de 50cm de largeur et 50cm de hauteur. Dans la succession d'images suivante, nous observons les images IR obtenues pour obtenir cette courbe de température. La palette de température utilisée est représentée dans la figure.

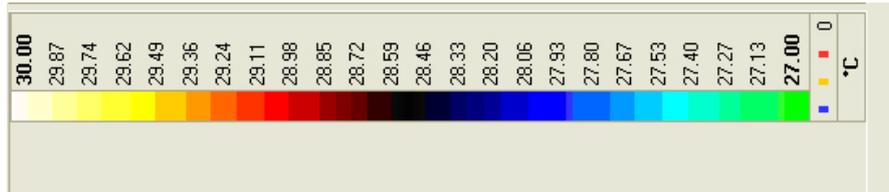
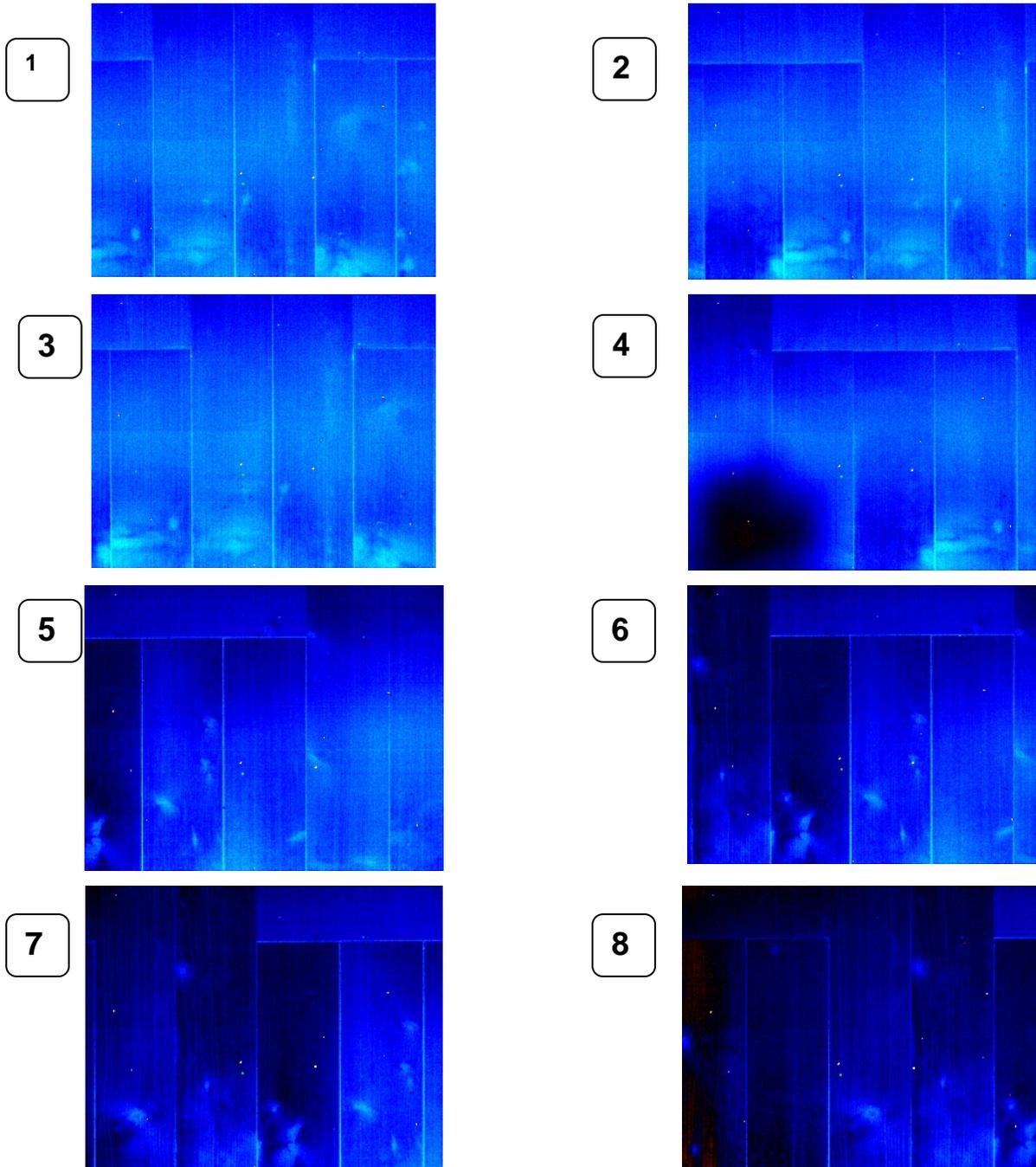
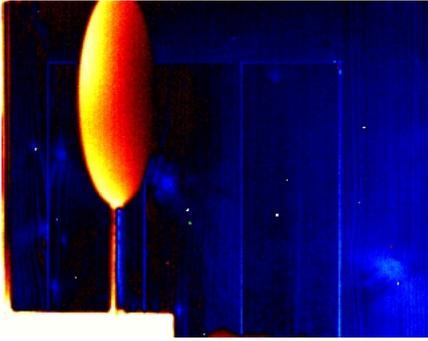


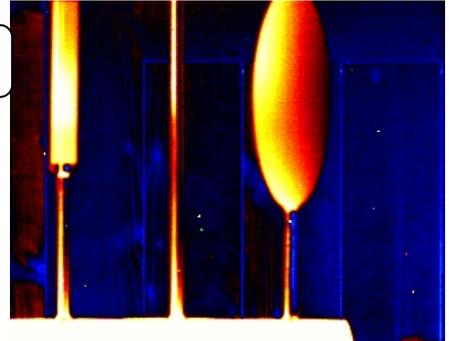
Figure 13 : Palette de température pour le film Infrarouge



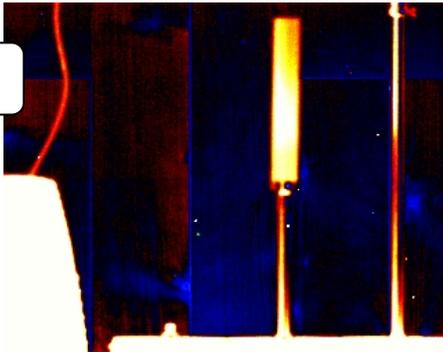
9



10



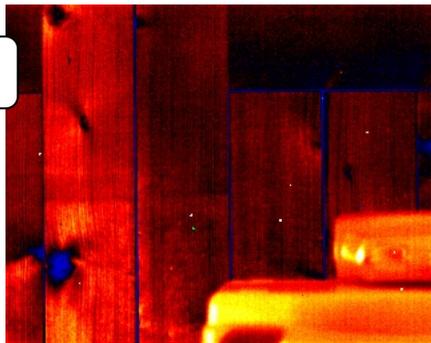
11



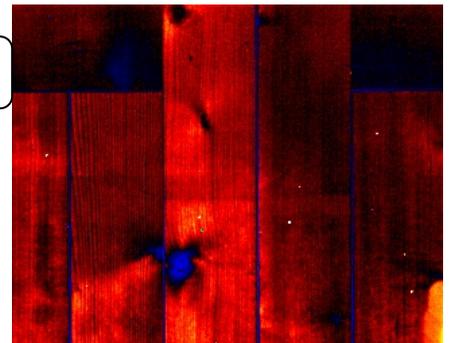
12



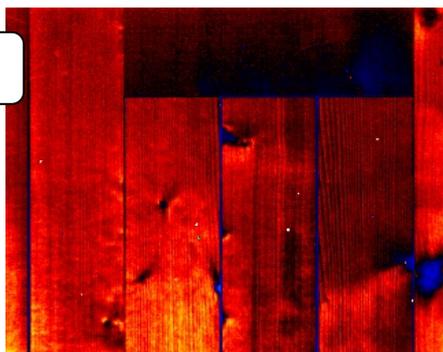
13



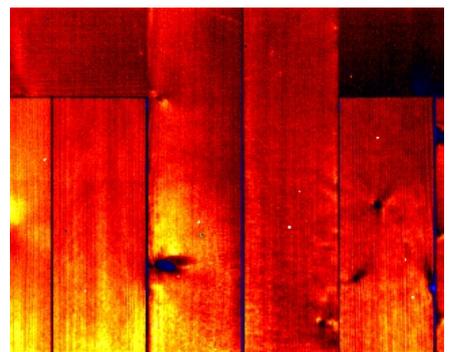
14



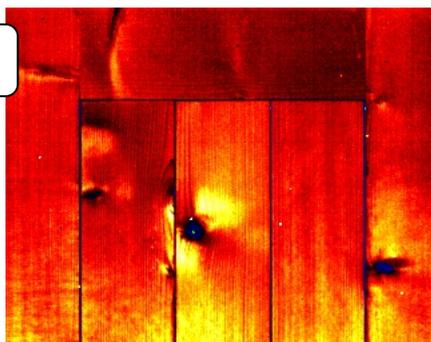
15



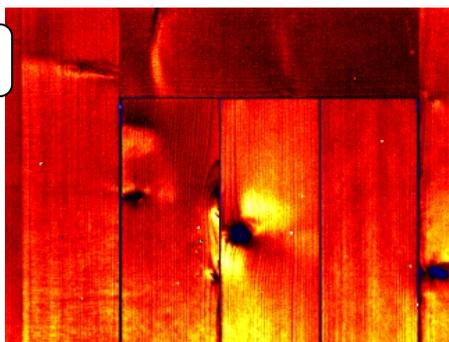
16



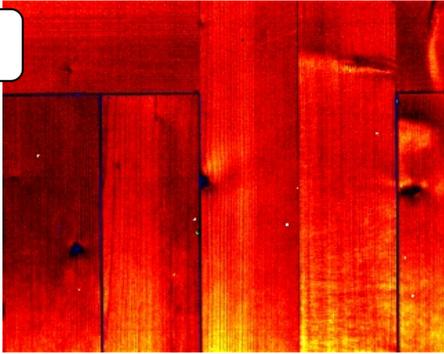
17



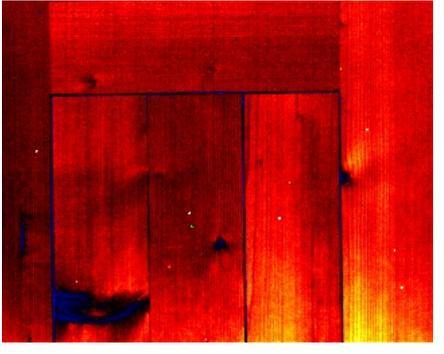
18



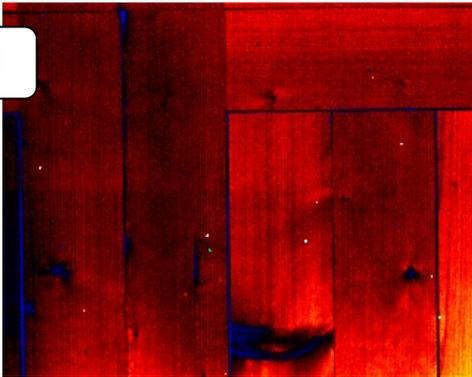
19



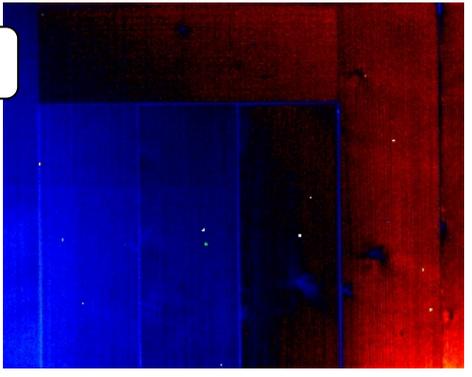
20



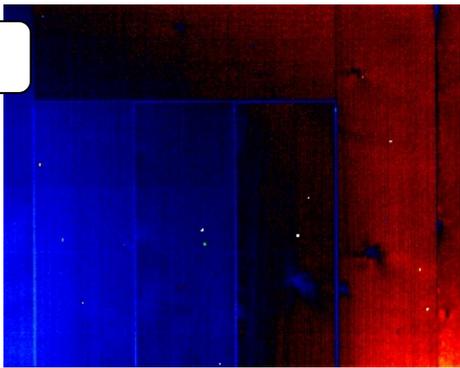
21



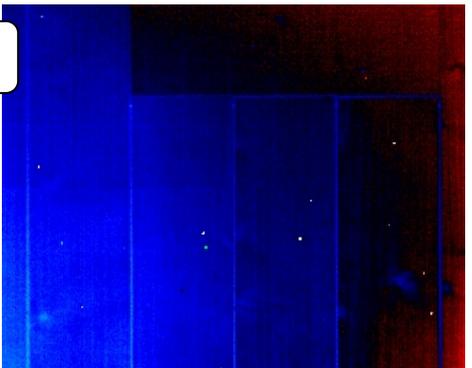
22



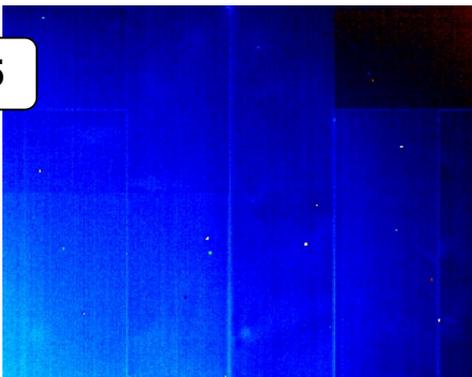
23



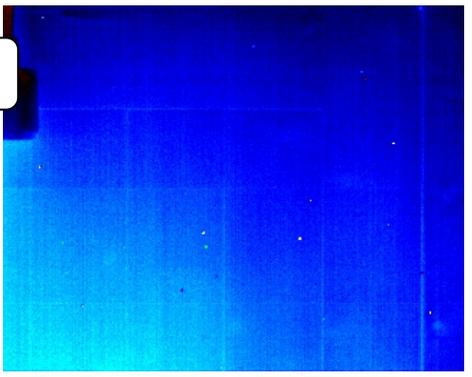
24



25



26



27

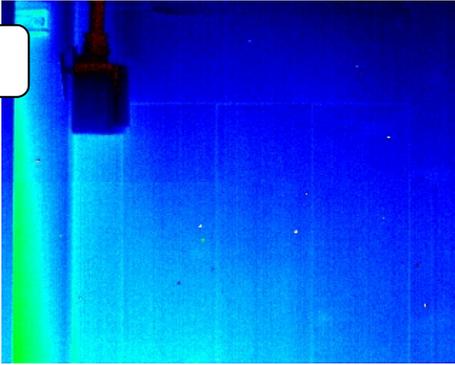


Figure 14 : Succession d'image infrarouge correspondant à la variation de la figure 12

Comme nous pouvons voir, il y a des pics de température dans la courbe des températures. Ils correspondent à des bruits qui sont dûs à la présence de divers objets (appareils, meubles) au passage de la caméra infrarouge. Nous observons cela aux images n°9 à 13. Par contre, vu que la palette indique les températures, nous observons que la moyenne de la température en chaque surface ne dépasse pas 0,5°C d'écart. Cette observation indique que la surface indiquée par les différents « bruit » est négligeable par rapport à la couverture de paroi bois filmée. Nous pouvons alors en déduire que la température de paroi est uniforme sur une même ligne horizontale et verticale. C'est de là que nous avons tiré les températures de surfaces utilisé dans l'analyse de rayonnement des scénarios de revêtement dans Hybcell.

Le choix du langage de programmation

Le choix du programme sous lequel développer le modèle a été une part importante en temps de mon travail. En effet plusieurs environnements de programmation ont été testés afin d'optimiser l'outil de calcul.

L'utilisation d'Excel

Le premier environnement testé a été Excel. Cependant les limites de ce programme ont été rapidement atteintes. En effet lors de l'automatisation des calculs ceux-ci ne fonctionnaient bien que pour un nombre limité de cas. Ceci a tout de même permis d'obtenir une première approche par l'étude de neuf points dans la cellule HYBCELL (voir figure 26) en utilisant le modèle de calcul de facteur de forme de la norme ISO 7726. La multiplication du nombre de point, nécessaire à l'atteinte de l'objectif de cette étude, a été confrontée à la lourdeur d'Excel. L'affichage des résultats sous forme de graphique prenait un temps considérable et aboutissait dans la majorité des cas à un blocage de l'ordinateur. Le choix d'un langage de programmation permettant d'alléger les calculs s'est donc imposé.

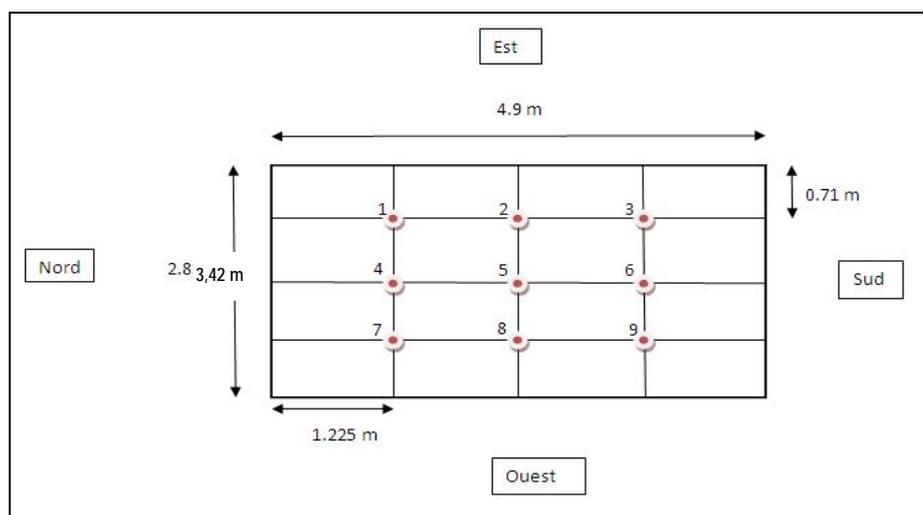


Figure 15 : Points étudiés Excel

Le choix de l'utilisation de Matlab

Matlab s'est donc imposé comme étant l'outil le plus adapté. Il est largement utilisé au laboratoire, capable de supporter de gros calculs, et permet de faire des graphiques relativement facilement. La version finale du projet est donc développée sous Matlab.

Le fonctionnement du programme

Cette partie a pour objectif d'expliquer à de futurs utilisateurs la manière d'utiliser l'outil de calcul créé sous Matlab.

Tout d'abord il faut charger le dossier confortpred dans Matlab.

Double-cliquer sur le fichier Parametre.m.

Puis renseigner les différents paramètres sachant que :

La position de l'utilisateur (0 assis, 1 debout) n'influence les résultats que si l'on utilise le modèle ISO 7726

Pour la vêtue (1 tenue d'été, 2 tenue d'hivers)

Les pourcentages d'insatisfaction ne seront donnés que si le choix 1 est pris lors du choix du modèle.

Une fois les paramètres renseignés sauver le nouveau fichier parametres.m.

Lancer parametres.m depuis la fenêtre de commande.

Ensuite lancer la commande general depuis la fenêtre de commande.

Le résultat s'affiche sous forme graphique dans une nouvelle fenêtre.

Les hypothèses

L'utilisation de l'outil de calcul et par conséquent des modèles qui y sont implémentés implique un certain nombre d'hypothèses. Celles-ci sont listées ci-dessous :

Le corps humain est un corps noir (émissivité réelle de la peau pour le rayonnement infrarouge à 33°C : 0,99 [KAPITANIAK])

La température de l'air est maintenue à une valeur constante de consigne [°C] avec une précision de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Il s'agit de la température d'air reproduite pendant les mesures dans les différents scénarios.

Seul le rayonnement à grandes longueurs d'onde est pris en compte. La tache solaire ainsi que le rayonnement solaire indirect ne sont pas pris en compte. Ce travail a été étudié dans d'autres travaux de recherches concernant les ensoleillements à travers les ouvertures et les surfaces vitrées de la cellule Hybcell [El Mankibi, 2008]

La température de surface des parois est uniforme sur toute la surface [°C] avec une précision de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

La composition des parois est uniforme sur toute la surface de celles-ci.

L'air est un milieu parfaitement transparent non absorbant pour la propagation des ondes infrarouges.

Les parois se comportent comme des corps gris, c'est-à-dire des surfaces opaques, isothermes, diffusantes en émissions et dont les propriétés sont totales et hémisphériques.

Le système (local+usager) est statique.

Validation et apport du calculateur

Afin de vérifier la validité des résultats obtenus par l'outil de calcul, nous avons comparé les valeurs de températures opératives mesurées au centre de la cellule Hybcell pendant les expériences explicitées en 3.5 de ce chapitre. Les configurations de revêtement intérieur prises en compte sont les suivantes :

L'ensemble des murs à l'exception du mur Est où se situe la fenêtre sont recouverts de bois.

L'ensemble des murs à l'exception du mur Est et du mur Ouest sont recouverts de bois

Les murs sont dans leur état de finition initiale

Seul le plafond est recouvert de bois

Seul le mur ouest est recouvert de bois

Seul le plancher est recouvert de bois

Le tableau suivant résume les valeurs des mesures effectuées in situ à l'aide de la station VIVO, les valeurs calculées avec l'outil présenté précédemment et l'écart relatif entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées.

Comparaison entre valeurs mesurées et valeurs calculées

configuration	mesure in situ	ASHRAE		ISO 7726	
	Top (°C)	Top(°C)	erreur relative(%)	Top(°C)	erreur relative(%)
Tout bois	29,3	29,0	1	28,8	1,6
Tout bois	29,5	29,8	0,9	29,6	0,4
Tout bois sauf ouest	26,1	25,3	3	25,2	3,5
Tout bois sauf ouest	22,3	21,8	2,4	21,7	2,9
Aucun bois	23,8	27	13,5	26,9	13
Aucun bois	23,9	24,2	1,2	24,2	1,1
Plafond bois	26,4	25,7	2,5	25,6	3,2
Plafond bois	29,7	30	0,9	29,7	0
Mur ouest	23,1	23,5	1,9	23,4	1,3
Mur ouest	27,7	28	1,1	27,8	0,3
Plancher bois	17,5	17,9	2,2	17,9	2,1

Nous écarterons la première valeur obtenue pour la configuration sans bois. En effet la température de l'air était de 24.6°C, toutes les températures de surfaces d'une valeur supérieure à 30°C et la vitesse de l'air inférieure à 0.05 m.s-1. La mesure in situ de température opérative de 23.8°C n'est donc pas cohérente, ce qui explique la forte erreur relative observée.

L'erreur relative moyenne entre les valeurs mesurées lors de l'expérience et celles obtenues par le calcul est de 1.72 % pour le modèle ASHRAE et de 1,64% pour le modèle ISO 7726. De plus l'écart maximal est de 3 % pour la première et de 3,5% pour la seconde. Le modèle donne donc des résultats cohérents.

Les apports du calculateur

Le calculateur permet grâce au maillage de la zone de mettre en évidence les zones d'inconfort. Le concepteur pourra donc choisir d'aménager les zones les plus proches de la thermoneutralité pour optimiser le confort des futurs occupants. En effet, comme le montre la simulation ci-dessous il est tout à fait possible d'avoir un PMV moyen de 0,04 et un PPD moyen de 5,35 alors que certaines parties du local présentent des pourcentages d'insatisfaits de plus de 7% ; soit un écart de plus de 30 % par rapport à la moyenne, et ce pour une différence de 10 °C entre les températures de surface des parois Nord et Sud (paroi Nord 13°C, paroi Sud 23°C). Ce cas peut tout à fait être observé lorsque l'on a, par exemple, une fenêtre (paroi froide en hiver) en face d'une paroi à température ambiante. Les graphiques permettent donc de visualiser les zones de confort et les zones à éviter dans ce type de configuration.

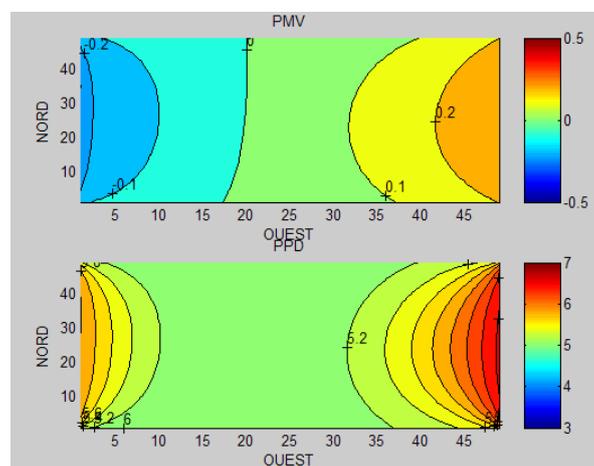
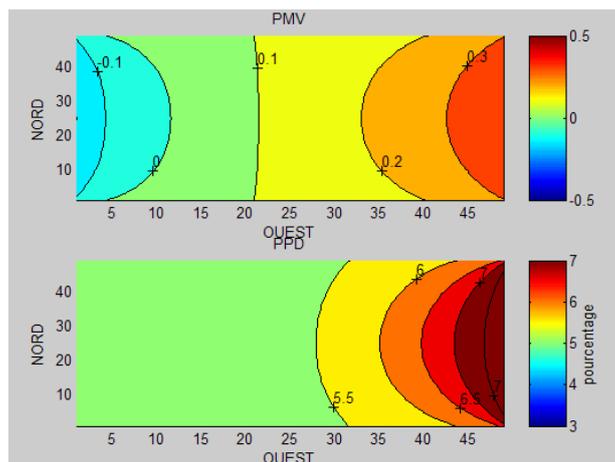


Figure 16 : Simulation différence de température de surface Nord-Sud 10°C cellule HYBCELL finitions d'origine (corps gris)



*Figure 17 : Simulation différence de température de surface Nord-Sud 10°C cellule
HYBCELL corps noirs*

PMV moyen= 0.12 et PPD moyen= 5.67%

On constate de plus que la même simulation effectuée en corps noir surestime la sensation d'inconfort chaud ressentie par les usagers et sous-estime la sensation d'inconfort froid par rapport à la précédente. Le PPD moyen est augmenté de 6% par rapport à la simulation précédente.

La zone d'insatisfaction due à la paroi froide a disparu et l'insatisfaction est uniquement due à la paroi chaude. Ceci provient du fait que le rayonnement soit maximal en corps noir, l'apport de la paroi chaude compense alors la paroi froide en terme de rayonnement moyen. Ceci peut avoir des conséquences pour l'aménageur puisqu'il pourrait limiter de façon trop importante les zones de travail, dans le cadre d'un bureau par exemple, aux abords de la paroi Sud au profit de la paroi Nord.

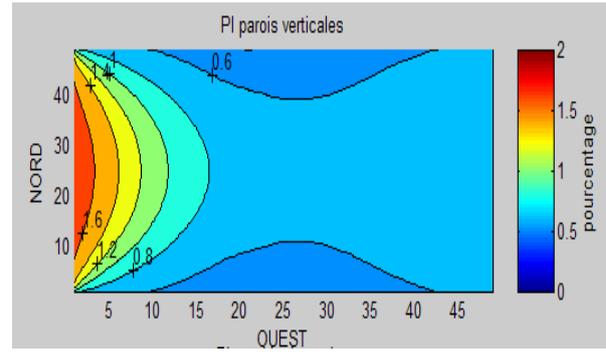
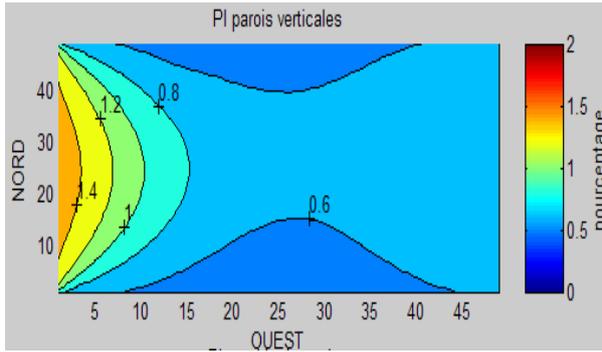


Figure 18 : Asymétrie de rayonnement corps gris Figure 19 : Asymétrie de rayonnement corps noirs

La simulation des pourcentages d’insatisfait du fait des asymétries de rayonnement montre de plus une surestimation de 5,3 % par rapport aux corps gris. La prise en compte des propriétés physiques des parois, de l’émissivité en l’occurrence, permet de ne pas surestimer les asymétries de rayonnement et l’inconfort thermique chaud, de ne pas sous-estimer l’inconfort thermique froid et donc de mieux adapter l’aménagement intérieur et la conception de la finition du bâtiment.

Dans le cadre des situations étudiées l’outil de calcul ne permet pas de tirer de conclusions quant aux asymétries de rayonnement entre le plafond et le sol. En effet les plages de températures considérées, d’après les mesures effectuées dans la cellule HYBCELL, et surtout le faible écart entre les températures de surface du plafond et du sol (un écart maximum de 4°C) ont pour conséquence un pourcentage d’insatisfaction inférieur à 0,01%. Ces résultats ne sont pas exploitables compte tenu de la précision des mesures.

Annexe E : Interventions scientifiques durant la thèse

- Les échos de la bissectrices (ENTPE)

Depuis le commencement de cette thèse, nous avons été amenés à trouver des pièces d'habitation en présence de bois pour effectuer des mesures in situ. L'objectif est de pouvoir estimer le comportement des ambiances intérieures de différentes configurations de revêtements en bois massif naturel sans traitement de surface. Nous avons fait des annonces auprès de famille, amis et collègues pour trouver des pièces qui seraient disponibles pour laisser les appareils de mesures mais aussi qui seraient accessibles pour les mesures ponctuelles. La figure 20 est un exemple d'annonce paru dans le journal de l'école ENTPE : Les échos de la bissectrice, N°79 en avril 2007.

LASH Un projet de recherche sur l'utilisation et l'impact du bois dans la construction est mené au LASH.

Le bois naturel, grâce à ces propriétés hygrométriques et thermo-aérauliques est un matériau intéressant pour la construction. En effet, ses qualités environnementales (matériau renouvelable, faible consommation d'énergie et réduction de l'émission des gaz à effet de serre), sa résistance (au feu, aux atmosphères agressives, aux zones sismiques), et sa pérennité en font un matériau de confort et de santé tout en étant un bon isolant thermique. L'objectif est d'évaluer l'impact du bois sur l'ambiance intérieure en effectuant des mesures de températures et d'humidité (de l'air et des parois) dans des locaux recouverts de bois naturel. Cette expérience nécessite la participation de personnes cohabitant avec le bois...

AVIS DE RECHERCHE
Personnes habitant de préférence Lyon, ayant au moins une chambre dont les planchers et/ou les murs et/ou le plafond sont en bois naturel (sans vernis, lasure ou peinture). Si vous êtes prêts à nous aider pour notre campagne de tests in situ, nous laisserons chez vous quelques capteurs et enregistreurs de paramètres thermiques et aérauliques durant une quinzaine de jours. Un petit questionnaire aux occupants clôturera le test.

Zaratiana Harijaona



Figure 20 : Appel à collaboration dans Les échos de la bissectrice

- Les présentations auprès du groupe thermiques et dans le département Génie civil et Bâtiment (ENTPE)
- Interventions dans les cours de Matériaux et produits de construction : le matériau bois, en 2006-2007 et 2007-2008 pour les 3^è année de la VA. Bâtiment
- Intervention dans les Travaux pratiques en étude d'un climatiseur pour les 1^{ères} années en énergétique du bâtiment
- Intervention en travaux pratiques de physique : thermique, hydraulique, électricité et éclairage à IUT A Université Claude Bernard Lyon1.

- Intervention pour les Séances scolaires de la manifestation « soleil » : énergie solaire thermique et photovoltaïque, au planétarium de Vaulx en Velin : 12 au 18 Novembre 2007

Annexe F : Mesures sur des essences de bois malgaches

Essences malagasy	Conductivité W/mK	Diffusivité mm ² /sec	Chaleur spécifique MJ/m ³ K	Emissivité thermique de	à	Masse volumique kg/m ³
Pin	0,152	0,394	0,387	0,79	0,82	467,97
Sapin	0,171	0,407	0,420	0,7		467,97
pallissandre	0,267	0,317	0,843	0,76	0,77	796,12
Sohihy	0,281	0,339	0,830	0,76	0,77	949,96
Anakaraka	0,282	0,351	0,805	0,82	0,83	949,96
Katrafay	0,285	0,293	0,973	0,82	0,84	974,59
Vandrika	0,288	0,347	0,828	0,83	0,84	937,20
Valompangady	0,288	0,311	0,926	0,84	0,86	923,01
Handy	0,321	0,274	1,172	0,88	0,92	923,01

Tableau F1 : Valeurs mesurés sur différentes essences de bois

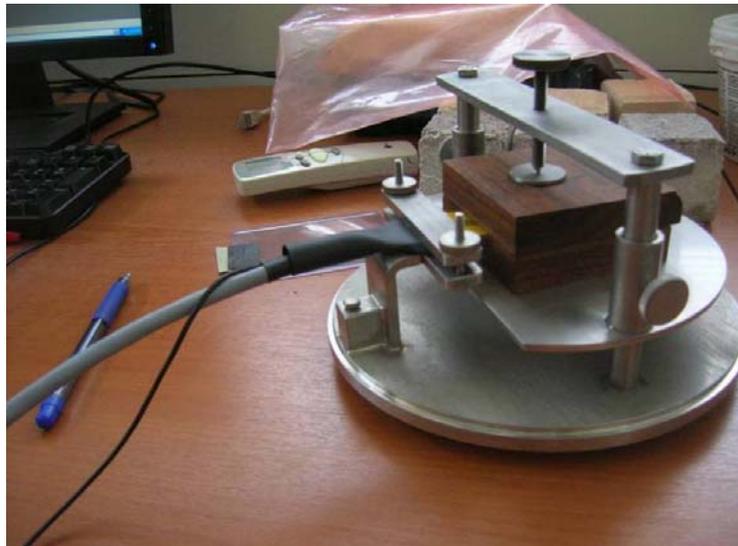


Figure 21 : Mesures de propriétés thermiques du bois

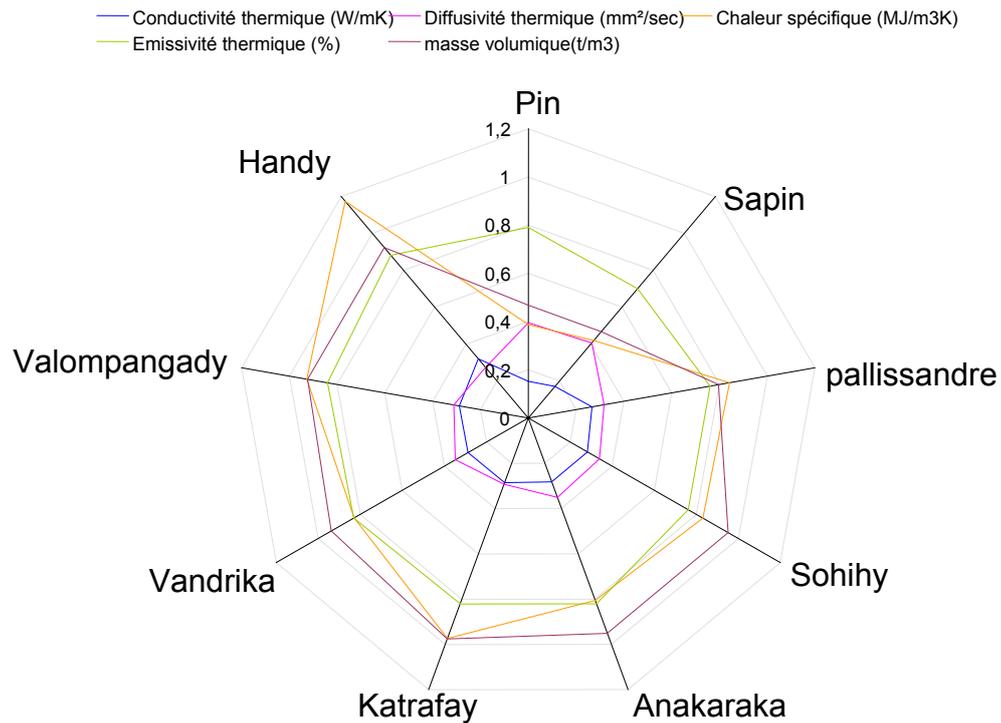


Figure22 : Propriétés thermo physiques de différentes essences malgaches

Voici les photos des différents échantillons utilisés dans les mesures physiques ci-dessus. Il s'agit d'échantillon qu'une entreprise de revêtement en bois à Madagascar nous a fourni, et qui sont des essences les plus prisées dans le marché malgache.



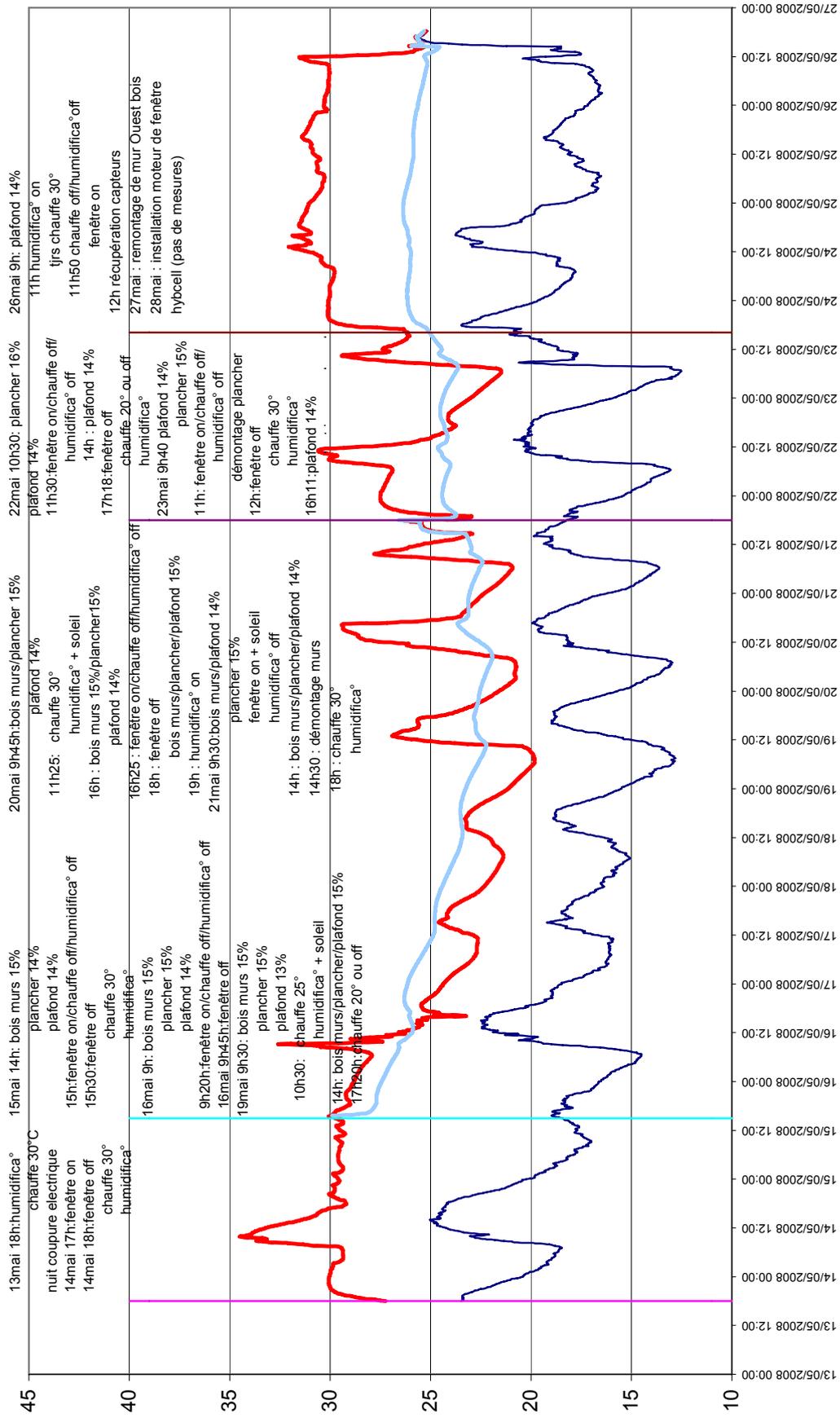


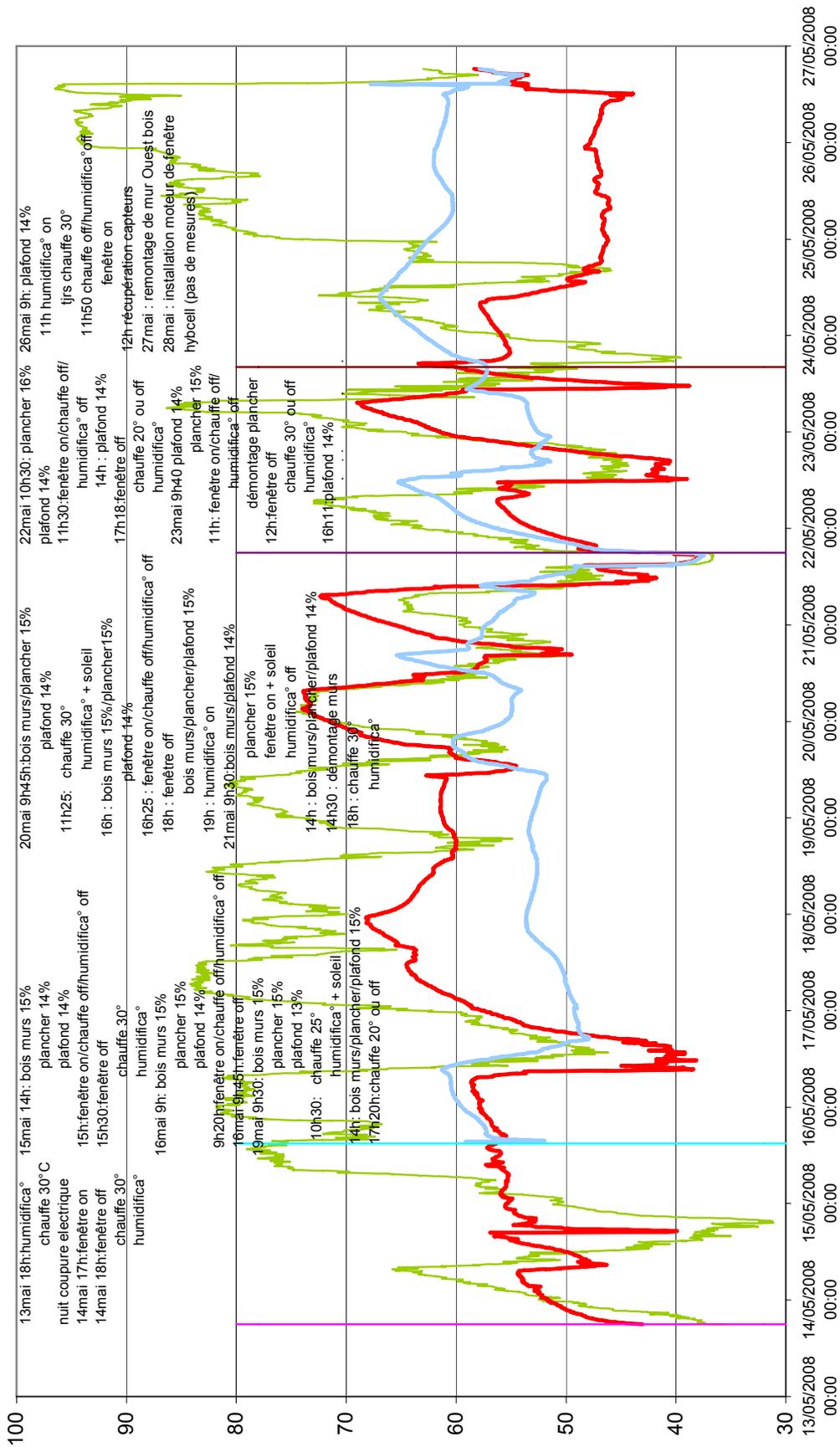
Tableau F.2: Photo des échantillons de bois mesurés

Annexe G : Mesures physiques commentées en laboratoire

Pendant la période de Mai 2008 (printemps) nous avons effectué les mesures physiques de températures et d'humidité relative de l'air intérieur et extérieur de la cellule expérimentale avec les différentes configurations de revêtement en bois. Comme nous pouvons constater, il est difficile de répéter des consignes d'ambiances intérieures puisque les conditions extérieures, et la configuration de la pièce influences les paramètres de consignes. Par exemple, l'existence de larges ouvertures vitrées modifient l'ambiance tout au long de la journée, si bien que les conditions que nous avons pu reproduire coïncident très souvent à des situations nocturnes. Les figures présentées ci-dessous nous expliquent les étapes de travail effectuées dans la cellule y compris les montages et démontage des revêtements en bois, et aussi la mise en marche des différents appareils de mesure.

— T.ext — T.int.hobo — Plafond — 1 — 2 — 3 — 4





Annexe H: Maisons traditionnelles en France et à Madagascar

A travers les paragraphes qui suivent, nous avons un aperçu de la différence et ressemblance de la présence du bois dans les bâtiments français et malgache. Comme partout dans le monde, l'art de bâtir a bien évolué suivant l'histoire, la géographie, le climat et les richesses de chaque région.

La France a connu une grande évolution dans le domaine du bâtiment, notamment la recherche des matériaux disponibles et les mieux adaptés à l'utilisation finale du bâtiment et les attentes de l'occupant. Désormais, le bâtiment n'est plus seulement qu'un abri mais surtout un lieu de vie de tous les jours où les Français passent 80% de leur temps ; d'où la recherche de plus en plus d'une ambiance intérieure confortable. Bien que la France ait eu beaucoup d'influence sur la culture et les divers métiers dans ce domaine, les Malgaches ont conçu bien avant l'entrée des Français en 1896, des maisons traditionnelles qui sont faites à base de matériaux d'origine végétale selon les essences du milieu. A Madagascar, on constate l'influence de l'architecture venant de l'étranger surtout dans les villes et les chefs lieux de provinces.

1 Evolution de l'utilisation du bois dans les bâtiments français

Dans l'architecture rurale, on distingue six régions géographiques en France, et qui présentent des ensembles cohérents du point de vue architectural : Alpes, Alsace, Bresse, Champagne humide, Landes, Normandie. Les maisons en bois existantes les plus anciennes (pan de bois) remontent en général au XVème siècle. Elles sont construites soit par la méthodes des bois long, soit par la méthode des bois courts, soit par la méthode mixte [Ministère de l'équipement, 1986].

Les conditions naturelles telles que le relief, le climat, le sol et la végétation influent beaucoup sur le choix des matériaux utilisés en construction. En effet, les maisons et bâtiments présentent plus ou moins un type de matériau selon la quantité disponible dans la région. Mais en plus, les formes des maisons changent d'une région à une autre. Citons par exemple le toit aigu se trouvant dans les régions où la fréquence des précipitations est plus grande comme en Alsace et en Normandie : les toitures sont de forte pente, les arêtes sont vives et la couverture lisse permet de laisser facilement écouler la neige et la pluie.

D'autre part, on distingue aussi diverses formes de maison selon l'influence historique :

- latine : toit plat couvert de tuiles creuses
- gauloise : toit aigu couvert de chaume à l'origine

En ce qui concerne les systèmes constructifs, à partir de deux systèmes traditionnels ou parfois combinés : construction en bois empilés et la construction à colombage, les artisans européens ont créé des modèles correspondant aux spécificités de chaque région :

en bois massif : les murs sont constitués de troncs d'arbres équarris et assemblés dans les angles (Alpes)

à ossature bois : mur extérieur en plateaux horizontaux, en bois encastrés dans les colonnes de l'ossature, ou encore mur extérieurs en planches clouées verticales ou horizontales. On considère alors le bois comme ossature porteuse et éléments de remplissage ou bardage.

En pan de bois : ossature principale en bois avec remplissage en torchis, en plâtre ou en maçonnerie.

A l'extérieur, le bois est utilisé pour l'habillage des murs sous forme de planchers ou écailles (Champagne) et à l'intérieur sous forme de lambris (Alsace)

On distingue alors en France suivant les régions géographiques, les constructions suivantes :

1.1. Alpes, Savoie et haute Savoie

En hauteur, habitat saisonnier à échelle réduite et en plaine habitat plus vastes. Entre les deux terrains, on a des habitats sur pierres sèches assises en bois massif pour les parois extérieures et intérieures, charpentes et couvertures en tuiles de bois ou ancelles.

Les conditions naturelles de ces régions sont caractérisées par :

- En Alpes du nord : relief caractérisé par les hauts massifs fragmentés qui favorisent la communication grâce à la formation de réseau de vallées fertiles. Climat humide et rude en hiver, végétation riche : conifères en pente, maisons isolées et village aux pieds des montagnes.

- En Alpes du Sud : sol maigre, climat sous influence méditerranéenne, sécheresse en été, végétation pauvre.
- En haute Savoie et Beaufortin, le type de maison est le chalet à dominante bois, maison semi enterrée.

Le soubassement en pierre constitue le rez-de-chaussée et parfois la cave, la structure bois constitue l'étage et les combles. Les murs extérieurs sont en planches verticales chevillées ou clouées sur sablières basse et haute. La couverture est à faible pente (20 à 30°), en tuile de bois.

1.2. Alsace

Dans un climat continental, les habitants de la région ont maîtrisé des matériaux locaux comme le bois, l'argile et parfois le grès. La couverture est toujours constituée par la terre cuite à forte pente.

La maison vosgienne de montagne est un bâtiment monobloc en pierre sur plan rectangle ou carré. Par contre, la maison du vignoble, sur les collines sous vosgienne est à toits multiple, des bâtiments en bois et en pierres. Et pour la plaine, ils sont en pan de bois, à toit multiple.

Ces régions ont découvert avec l'histoire, divers systèmes constructifs :

XV et XVI^e S : en bas-Rhin, on a utilisé la méthode des bois longs, avec des poteaux corniers d'une seule pièce traversante de fond en comble, le rez-de-chaussée et l'étage.

XVII : méthode des bois courts

XVIII : généralisation de la méthode des bois courts, poutraison plus rationnelle et harmonieuse

XIX : le croupe de toit a disparu, gouttières apparentes, séparation de l'éléments porteur et l'élément de clôture. Le bois utilisé est exclusivement d'origine locale : bois dur (chêne, châtaignier), bois tendre (pin, sapin, peuplier).

1.3. Bresse

Les maisons ont des plans rectangulaires de faible hauteur de murs et un volume important des combles. Les toits débordent largement en façade et pignon.

1.4. Champagne humide

En sol et relief peu accentués, il existe une vaste forêt de Chênes. Les sols argileux et la rareté de carrière sont à l'origine de l'habitat traditionnel en pan de bois avec remplissage en torchis, couvert de tuiles canal. La forme des bâtiments est allongée et basse avec une couverture à faible pente.

1.5. Les landes

Le climat océanique est caractérisé par une grande chaleur en été, pluie en hiver, vents dominants d'ouest toute l'année. Seule la construction en pan de bois est utilisée (à variante simple et primitive). Le plan des maisons est rectangulaire ou presque carré, symétrique par rapport à la faîtière. La couverture a trois pentes : 2 principales descendant très bas sur les côtés et une troisième protège des vents d'ouest.

Le soubassement est souvent maçonné en tuffeau calcaire.

1.6. Normandie

L'abondance de bois, la rareté de matériaux durs pour assurer les remplissage et la fantaisie des artisans sont à l'origine de la richesse et de la variété des colombages des maisons du pays d'Auge et haute Normandie. Le pan de bois trouve ses lettres de noblesse dans les constructions citadines du moyen-âge et la Renaissance : haute maison exigües.

Dans la vallée de Seine remplie de Chênes (haute Normandie), les matériaux existants sont les roches dures (calcaire, dans la campagne de Caen, le schiste et le grés dans le Otentin et le bocage normand) La façade principale est au sud et la façade nord est souvent aveugle.

1.7. Bois et l'architecture contemporaine

Les nouveaux procédés s'inscrivent dans les priorités pour la rationalisation et augmentation de la production :

- économiser le bois,

- alléger les charpentes
- utilisation des planches et des clous

En s'inspirant de ces procédés, on a découvert en Europe, l'agrafage des planches et l'utilisation de matériaux dérivés du bois (cf : annexe1) : bois lamellé collé, panneau de particules, panneau de fibres orientées, contreplaqués... Des règles de construction sont à respecter pour les nouveaux bâtiments, ainsi que pour les bâtiments existants. Ce qui conduit à rénover et à améliorer l'enveloppe, les équipements et les éléments de la structure. Pour les structures en Bois, les règlements appliqués en France sont ceux de l'Eurocode 5 concernant la résistance mécanique, après les règlements « Calculs Bois 1971 », la durabilité de l'ouvrage et la résistance au feu. Il est cependant très courant aussi de rencontrer des structures mixtes béton et bois, métallique et bois, briques et bois, d'où la nécessité de combiner les normes appliquées à chaque construction.

Et parallèlement à ce qui s'est passé en France, nous allons parler dans ce qui va suivre, de l'utilisation du bois dans les bâtiments dans d'autres pays, notamment Madagascar, pour qu'on puisse identifier les ressemblances et comparer.

1.2. Evolution de l'utilisation du bois dans les bâtiments malgaches

L'architecture traditionnelle malgache reflète dans sa diversité, l'influence des conditions naturelles et les matériaux existants, partagés selon la richesse de chaque région géographique et climatique. On distingue par région :

- dans le sud-ouest (milieu salé, climat chaud et sec), on utilise le Jonc ou Vondro comme corps des murs, renforcé et rempli par de la terre
- Sur la côte Est (climat tropical humide) : arbre du voyageur ou ravinala, bambou ou volo, palme ou raphia constituent les murs pour se protéger de la pluie. Les maisons sont souvent reposées sur un plancher en bois ou en béton surélevé par des pilotis.
- Dans le sud-est : (climat chaud et humide) : bois dur ou bois massif (palissandre, varongy...) constituent les murs, et les toitures sont pareilles sur toute la côte Est : ravinala ou raphia.
- Dans le sud de l'Androy : bois léger et tendre (raotse) pour des constructions sur pilotis, revêtus à l'extérieur par des murs fins en bois

- Région ouest (climat chaud et sec) : bois massif associé à une structure en béton ou en parpaings. La chaleur tout au long de l'année nécessite une grande circulation d'air soit : terrasse couvert, murs à trous réguliers, grandes ouvertures. Dans ces régions, on constate qu'on s'oriente beaucoup plus à des maisons en dur.
- Sur les haut-plateaux : torchis, adobe, brique cuite, pisé, ou bien structure en béton associé au bois venant des côtes constituent les murs et la structures des bâtiments.
- Le relief montagneux est généralement constitué de sol argileux en plaine, et, latéritique ou rocheux sur les collines. Ce qui constitue une grande ressource en carrières et matériaux de proximité. Les toitures anciennes sont en pailles mais remplacés par des tuiles en terres cuites ou plus récemment en tôles métalliques.

Les anciens palais (situés à Tananarive) symbolisent l'habileté des Malgaches à façonner le bois. Les constructeurs de l'époque se sont inspirés des modèles architecturaux de leur origine ethnique (asiatique, africain, indien), puis amélioré par le savoir faire européen (Anglais et Français) pour arriver à des maisons à matériaux mélangés.

Dans chaque région, en dehors des villes et chef lieu de province, les maisons sont faites artisanalement selon les matériaux (surtout végétaux) existant. Les artisans ne construisent pas de maisons durables par peur des violents cyclones fréquents et par manque de moyens.

En ville, l'utilisation de nouvelles techniques venant de l'étranger (brique cuite, béton armé, menuiserie aluminium et autres) n'exclut pas la conservation de la culture du bois dans l'aménagement intérieur des maisons malgaches comme plancher, plafond, escalier, poteaux, poutres ou menuiseries diverses. La richesse du pays en essence de bois (palissandre, Ambora, Arofy, Eucalyptus, pin, ramy, varongy...) explique cette grande présence, surtout dans les bâtiments d'habitation.

Cependant, aucun règlement n'est appliqué en matière de confort intérieur. Les acteurs de la construction s'intéressent beaucoup plus à l'aspect architectural et structurel. Les ingénieurs et architectes sont focalisés vers la conception de bâtiments résistants aux intempéries et qui durent le plus longtemps possible en suivant les règlements français : BAEL 91 modifié 99. L'application de techniques étrangères n'a pas conduit aux respects de règlements étrangers.

3. Les éléments des systèmes constructifs

L'architecture dans le monde repose toute sur l'histoire, la culture et le milieu dans lequel les bâtiments sont implantés. A Madagascar comme en France, nous pouvons relever plusieurs ressemblances grâce à plusieurs années de transfert de connaissances (à partir de 1650) dont la construction d'églises, de palais et des bâtiments administratifs.

En observant les chalets en campagne et en montagne français, ils ont beaucoup de similarités avec les pavillons des villes et les alentours des villes malgaches. Le bois peut être rencontré partout comme plancher, plafond, revêtement de murs, décoration ou meubles.

Il existe différentes formes d'utilisation du bois dans un bâtiment mais on le rencontre plus souvent en plancher, plafond et les ouvertures. Le tableau suivant présente une comparaison générale de maison française (chalet en montagne ou pavillon aux alentours des villes) avec les pavillons les plus répandus dans les villes de Madagascar.

Systèmes constructifs	France (chalet existant traditionnel contenant du bois) : depuis 1974 – règlement sur les déperditions de l'enveloppe	Nouveau pavillon en bois et chalet français rénové règlementé par RT 2000 ou RT 2005 (à partir de Septembre 2006)	Madagascar (pavillons anciens et existants) : aucun règlement thermique
Murs extérieurs	<ul style="list-style-type: none"> - Montants et traverses en bois massif - Revêtement de façade : enduit de mortier, bardage bois - matériaux d'isolation ou épaisseur importante des murs - Voile de contreventement en torchis ou maçonnerie - Parement intérieur : lambris, plaque de plâtre, matériaux dérivées du bois, plaques de gypses 	<ul style="list-style-type: none"> - Montants et traverses en bois (structure en bois) - Revêtement de façade : bardage bois, panneaux dérivés du bois - Pare pluie respirant - Voile de contreventement en panneaux de matériaux dérivés du bois - Pare vapeur - Isolant en laine de verre, de roche, de 	<ul style="list-style-type: none"> - Poteaux et murs en torchis ou briques ou parpaings (25 cm à 35cm), - traverses et poutres en bois massif - Sans isolation ni pare vapeur ni pare pluie - Revêtement extérieur en mortier (ciment et terre) ou rien - Revêtement intérieur : enduit de mortier ou gypse ou plâtre et très rarement en bois ou matériaux dérivés du bois

		chanvre ou de lin - Parement intérieur : lambris, plaque de plâtre, matériaux dérivés du bois, plaques de gypses	
Murs intérieurs	Cloison comme murs extérieurs à faible épaisseur	Cloison en plaque de plâtre ou en bois, avec isolation thermique et acoustique	Cloison en brique ou parpaing à faible épaisseur (15cm)
Planchers	- Dalle de béton revêtu de carreaux ou parquets en bois ; ou bien plancher en bois : solives et parquets - Poutres et solives en bois ou matériaux composites - Plafond en bois apparent ou panneaux dérivés du bois ou enduit de mortier	- Dalle de béton revêtu de carreaux ou parquets en bois ; ou bien plancher en bois : solives et parquets - Isolation thermique et phonique en laine de verre, de chanvre ... - Poutres et solives en bois massif ou lamellé collé ou matériaux composites - Plafond suspendu en plâtre ou panneaux dérivés du bois	- Plancher sans isolation - Solive en bois massifs (madrriers et parquets) ou bien dalle de béton revêtu de chape en mortier de ciment, carreaux ou parquet en bois - Plafond souvent en bois cloué aux solives (volige en pins) ou lattis enduit de plâtre ou mortier
Escaliers	bois massif et souvent identique à la composition du plancher à l'étage	Matériaux souvent identiques à ceux du plancher à l'étage, ou bien mixte bois-béton ou métal-bois	Très souvent en bois massif et pas forcément identique aux matériaux du plancher à l'étage
Charpentes	- Technique multiple : couverture en bois, tuiles, zinc, fibrociment..., charpentes bois - Isolation thermique, - Pare vapeur - Plafond : idem que plancher pour les combles	- Technique multiple : couverture en bois, tuiles, zinc, fibrociment..., charpentes bois, métal, béton... - Isolation thermique, - pare vapeur	De l'extérieur à l'intérieur : couverture (tuiles ou zinc ou fibrociment...), volige, chevron, pannes et fermes en bois (arbalétrier, poinçon, entrails, aisseliers, contrefiche) Plafond : idem que plancher pour les combles habitables et sans isolation

	habitables	- Plafond : idem que plancher pour les combles habitables	
Ouvertures	Fenêtres et portes en bois et simple vitrage et volets extérieurs en bois	Fenêtres et portes en bois ou autres matériaux avec double vitrage et volets extérieurs en bois ou non	Très souvent fenêtres et portes en bois avec simple vitrage et volets extérieurs en bois Existence de auvent pour se protéger du soleil, ou terrasse couvert pour avoir l'ombre Existence de lucarne ou œil-de-bœuf pour l'aération et pour donner du jour
Equipements	Chauffage par des combustibles ou électrique Rafraîchissement d'air, ventilation ou climatisation obligatoire	Chauffage, ventilation et rafraîchissement réglementés par RT2000 ou RT2005	Sans chauffage obligatoire Ventilation naturelle

Tableau H.1 : les éléments d'un système constructif malgache et français

Nous avons remarqué que la maison malgache est composée de matériaux plus lourds comme les briques en cloison, ou encore l'épaisseur des murs extérieurs (25 à 35cm), mais surtout la toiture qui est souvent en terre cuite (tuiles). Le bois s'utilise surtout en plancher, plafond escaliers et les ouvertures. Les artisans ont tendance à sur-dimensionner les structures, et les propriétaires ne font généralement pas appel à des architectes ni ingénieurs lorsqu'il s'agit de maison et pavillon individuel. Ce sont des projeteurs dessinateurs qui exécutent les plans pour les procédures d'obtention de permis et une équipe de maçons et ouvriers pour la réalisation. Ce problème est répandu par manque de réglementation et par manque de compétence et qui entraîne l'insuffisance de budget prévu pour un projet puisque plus tard ou même en pleine construction, les propriétaires peuvent décider de changer, d'ajouter des équipements ou éléments de structures pour leur confort intérieur. Actuellement, la différence de climat que nous allons voir dans la suite avec la France ne se manifeste pas par l'apparence extérieure des maisons, ni les éléments de la structure d'intérieur, mais surtout dans l'épaisseur des différentes couches de l'enveloppe et la finition des éléments du système constructif.

Annexe I : Les modèles d'équilibre hygroscopique du bois

- Modèles de B.E.T et G.A.B

Ces modèles sont basés sur l'adsorption surfacique. Schématiquement, cela correspond à la formation de couches successives de film d'eau pendant l'adsorption. Le modèle stipule que l'énergie de liaison du premier film d'eau est plus grande que l'énergie de liaison de deuxième film adsorbé à la première couche.

Le domaine d'application du modèle de B.E.T. (Brunauer-Emmet-Teller) est limité aux basses activités (de 0 à 50% maximum). Son application a été par la suite étendue vers des activités d'eau plus élevées par Guggenheim, Anderson et de Boer (G.A.B. 1966) [Merrakeb, 2006]

- Modèle de Dent

La théorie de Dent [Merrakeb, 2006] semblable à celle de BET, postule que l'eau est adsorbée sous deux formes. La première forme est constituée de molécules d'eau primaire directement liées aux sites de sorption avec une grande énergie de liaison. La seconde forme représente des molécules secondaires liées aux sites de sorption déjà occupés par les molécules primaires. La différence avec le modèle de BET est que celui-ci considère que les propriétés thermodynamiques des molécules d'eau secondaires sont identiques à celles de l'eau ordinaire alors que dans le modèle de Dent elles sont différentes. Cependant, les deux modèles stipulent que les propriétés thermodynamiques des molécules secondaires superposées en couches multiples, sont identiques. Le modèle de Dent considère que la surface interne S du bois est occupée par les sites de sorption. A une teneur en eau quelconque, une portion S_0 de la surface totale reste libre. Une autre portion de surface S_1 est occupée par une seule couche d'eau. Une portion S_2 est occupée par une bicouche, S_3 par une trois couches, et ainsi de suite...(figure I-1).

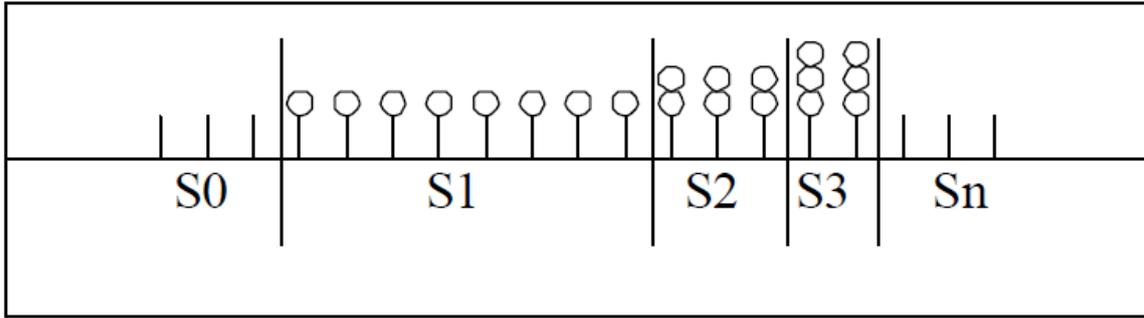


Figure I-1: modèle d'adsorption surfacique [Merrakeb, 2006]

Quand la surface interne de sorption se trouve en équilibre thermodynamique avec la pression de vapeur de l'environnement, le modèle stipule qu'il existe un équilibre entre les taux de condensation et d'évaporation de l'eau sur chaque couche. Le taux de condensation sur la surface S_0 est supposé être égal au taux d'évaporation sur la surface S_1 . De plus, le taux de condensation sur la surface S_0 est proportionnel à la pression de vapeur p_v à une température constante. L'équilibre entre le taux de condensation sur la surface S_0 et le taux d'évaporation sur la surface S_1 peut s'écrire :

$$C_0 \times S_1 = a \times p_v \times S_0 \quad [\text{Équation I-1}]$$

a est lié à un taux constant par unité de pression de vapeur, supposé être le même pour toutes les couches. C_0 est une constante liée à la surface S_0 .

Nous pouvons réécrire l'équation I-1 comme suit :

$$S_1 = b_1 \times p_v \times S_0 \quad \text{avec } b_1 = \frac{a}{C_0} \quad [\text{Équation I-2}]$$

De manière similaire, nous écrivons les équations d'équilibre pour chaque paire de surfaces adjacentes comme suit :

$$S_2 = b_2 \times p_v \times S_1$$

$$S_3 = b_3 \times p_v \times S_2$$

$$S_4 = b_4 \times p_v \times S_3$$

.....

$$S_n = b_n \times p_v \times S_{n-1} \quad [Équation I-3]$$

Les coefficients b_n sont supposés être identiques sauf pour $n=1$ correspondant à la première couche :

$$b_2 = b_3 = b_4 \dots = b_n \quad [Équation I-4]$$

La surface interne totale est la somme de toutes les surfaces partielles :

$$S = \sum S_n \quad [Équation I-5]$$

Le volume partiel de l'eau contenue sur une surface S_n est :

$$V_n = n \times S_n \times d_0 \quad [Équation I-6]$$

Avec d_0 l'épaisseur d'une seule couche.

Le volume possible V_0 de l'eau sous la forme primaire est :

$$V_0 = d_0 \sum S_n = d_0 \times (S_0 + S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n + \dots) \quad [Équation I-7]$$

Le volume total est la somme de tous les volumes partiels :

$$V = d_0 \sum n \times S_n = d_0 \times (S_1 + 2S_2 + 3S_3 + \dots + nS_n + \dots) \quad [Équation I-8]$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{b_1 \times p_v}{(1 - b_2 \times p_v) \times (1 + (b_1 - b_2) \times p_v)} \quad [Équation I-9]$$

En termes de teneur en eau w et d'humidité relative h , le rapport V/V_0 du volume total au volume d'eau primaire peut être identifié au rapport w/w_0 et la variable p_v peut être tout simplement remplacée par la variable h (h et p_v sont reliés par une équation linéaire, auquel cas, les valeurs des paramètres b_1 et b_2 sont considérées dans un autre système d'unités) :

$$\frac{w}{w_0} = \frac{b_1 \times h}{(1 - b_2 \times h) \times (1 + (b_1 - b_2) \times h)} \quad [Équation I-10]$$

Si nous associons à b_2 la valeur unité (cas où l'énergie de liaison de l'eau sous sa forme secondaire est la même que celle de l'eau libre), nous retrouvons alors le modèle de BET :

$$\frac{w}{w_0} = \frac{b_1 \times h}{(1-h) \times (1 + (b_1 - 1) \times h)} \quad [Équation I-11]$$

Le cas où $b_2=0$ donne :

$$\frac{w}{w_0} = \frac{b_1 \times h}{1 + b_1 \times h} \quad [Équation I-12]$$

C'est l'équation correspondant au modèle de Langmuir.

- Modèles de Hailwood-Horrobin

Ce modèle considère la sorption comme une réaction chimique où les réactants sont le bois sec et l'eau libre. Le produit de réaction est le bois hydraté. C'est un modèle d'adsorption volumique. Beaucoup de similitudes existent entre ce modèle et celui de DENT qui dérive lui-même de B.E.T.

Les deux modèles prévoient les mêmes paramètres empiriques et les mêmes conséquences sur l'interprétation physique de certaines quantités, comme la quantité nécessaire (ou quantité minimale) pour hydrater tout les sites de sorption qui est la masse d'eau adsorbée comme monocouche, définie dans le modèle de DENT. Cette même quantité correspond dans le modèle de Hailwood-Horrobin aux molécules d'eau primaires [Merrakeb, 2006]

Cependant, les paramètres empiriques des deux modèles ne permettent pas de différencier une phase d'adsorption et de désorption. Ils traitent le problème de manière spécifique en ne tenant en compte ni de l'état hydrique initial du matériau ni du sens de variation de l'humidité et encore moins de l'influence de la température.

Nom du modèle	Expression
Oswin (1946)	$h = \frac{\left(\frac{w}{a}\right)^{1/b}}{1 + \left(\frac{w}{a}\right)^{1/b}}$
Smith (1947)	$h = 1 - \exp\left(\frac{a - w}{b}\right)$
Halsey (1948)	$h = \exp\left(-\frac{a}{t \cdot w^b}\right)$
Henderson (1952)	$h = 1 - \exp(-a \cdot t \cdot w^b)$
Day et Nilson (1965)	$h = 1 - \exp(-a \cdot t^b \cdot w^{a^d})$
Modified Henderson (Thomson et al., 1968)	$h = 1 - \exp(-a \cdot (t + b) \cdot w^c)$
Modified Halsey (Iglesias et Chirife, 1976)	$h = \exp\left(\frac{-\exp(a + bt)}{w^c}\right)$
Modified Chung and Pfof (Pfof et al., 1976)	$h = \exp\left(\frac{-a \cdot \exp(-b \cdot w)}{t + c}\right)$

Tableau I-15: modèles d'isotherme de sorption. h est l'humidité relative d'équilibre exprimée en décimale; w est la teneur en eau exprimée en %. t la température exprimée en °C.

Aux cotés des modèles présentés ci-dessus, le tableau I-1 nous donne quelques modèles utilisés dans la littérature [Kaleemullah, et al., 2004, Merrakeb, 2006]

AFNOR. NF EN ISO 7730 : Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. Paris: AFNOR, 1995, 27 p.

AFNOR. NF EN ISO 7726 : Ergonomie des ambiances thermiques - Appareils de mesures des grandeurs physiques. Paris: 2002, 54 p.

ASHRAE. Chapter8 : Thermal comfort. In: ASHRAE handbook fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 1997, p. 8.1-8.28.

BARREIRA E. et VASCO D. F. P. *Evaluation of building materials using infrared thermography.* Construction and Building Materials, 2007, vol. 21, pp. 218-224.

BORLOO J. L. *Plan climat de La France : Mise en oeuvre du Grenelle Environnement [en ligne].* Disponible sur: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/09003_PLAN_CLIMAT.pdf>. (consulté le 02/06/2010).

BRAGER G. S. et DEAR R. J. D. *Thermal adaptation in the built environment : aliterature review.* Energy and buildings, 1998, vol. 27, 1, pp. 83-96.

BRUANT M. *Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance.* Rhône. Lyon: INSA, 1997, 312 p.

CANDAS V. *Confort thermique.* Techniques de l'Ingénieur, 1998, vol. BE4, BE9085, pp.

CECOBOIS. *Le bois et le cycle du carbone [en ligne].* Disponible sur: <http://www.cecobois.com/index.php?option=com_content&view=article&id=90&Itemid=99>. (consulté le 10 Janvier 2011).

CEI-BOIS. *Luttes contre le changement climatique [en ligne].* Disponible sur: <http://www.cei-bois.org/files/Luttes_contre_le_changement_climatique.pdf>. (consulté le 10 Janvier 2011).

CHANGEMENT-CLIMATIQUE. *Le changement climatique [en ligne].* Disponible sur: <<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/dossiers/changement-climatique/chronologie.shtml>>. (consulté le 02/11/2010).

COURBE D. *Influence d'une finition en bois brut sur le confort thermique dans le bâtiment.* Travail de fin d'études d'Ingénieurs. Vaulx en velin: ENTPE, 2008, 68 p.

DE-DEAR R. J. et BRAGER G. S. *Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revision to ASHRAE standards 55.* Energy and Buildings, 2002, vol. 34, 6, pp. 549-561.

DE-DEAR R. J., BRAGER G. S. et COOPER D. *Developping an Adaptive Model of thermal Comfort and Preference [en ligne].* Disponible sur: <http://atmos.es.mq.edu.au/rdedear/RP884_Final_Report.pdf>. (consulté le avril 2005).

DÉVELOPPEMENT-DURABLE. *Logement, aménagement durable et ressources naturelles [en ligne].* Disponible sur: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Bois_13394.html>. (consulté le 20/11/2010).

DIPLOMATIE F. *Aide Public au Développement - Ministère des Affaires Etrangères et Européennes [en ligne]*. Disponible sur: <<http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/>>. (consulté le 02/11/2010).

EL MANKIBI M. *Solar radiation modeling impact on control strategies design*. In: PLEA 2008, 2008, Dublin, Ireland. 2008, pp.

FANGER P. O. et TOFTUM J. *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates*. Energy and buildings, 2002, vol. 34, 6, pp. 533-536.

GIEC. *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [en ligne]*. Disponible sur: <<http://www.ipcc.ch/>>. (consulté le

GLOBAL-WITNESS et AGENCY E. I. *Enquête sur l'exploitation, le transport et l'exportation illicite de bois précieux dans la région SAVA à Madagascar [en ligne]*. Disponible sur: <www.globalwitness.org/media_library.../madag_report_revised_finalfr.pdf

>. (consulté le 01/01/2010).

GRENELLE E. *Plan Bâtiment - Grenelle; Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer [en ligne]*. Disponible sur: <<http://www.plan-batiment.legrenelle-environnement.fr/>>. (consulté le 02/11/2010).

HAMEURY S. *Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate : a numerical study*. Building and Environment, 2005, vol. 40, pp. 1400-1412.

HAMEURY S. *The hygrothermal inertia of massive timber constructions*. Stockholm. Suède: KTH Architecture and building Environment, 2006, 85 p.

HAMEURY S. et LUNDSTRÖM T. *Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign*. Energy and Buildings, 2004, vol. 36, 3, pp. 281-292.

HARIJAONA Z. *Etude paramétrique du confort adaptatif dans les bâtiments*. Génie civil. Vaulx-en-Velin: ENTPE, 2005, p.

JANIN G., CHARRIER F., GONÇALEZ J., et al. *La colorimétrie appliquée à l'évaluation de la couleur et de la qualité des bois européens et tropicaux [en ligne]*. Disponible sur: <http://zeus.dci.ubiobio.cl/~ananas/G_Janin%5B1%5D_colorimetric.pdf?script=sci_arttext%C0%03d=S0718-221X2001000100001&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. (consulté le 10/09/2009).

KALEEMULLAH S. et KAILAPAN E. *Moisture sorption isotherms of red chilies*. Biosystems Engineering, 2004, vol. 88, 1, pp. 95-104.

KUNZEL H. M., HOLM A., DIRKELBACH D., et al. *Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope*. Solar Energy, 2005, vol. 78, 4, pp. 554-561.

LAURENTIN C. *Etude expérimentale de la qualité des ambiances lumineuses dans les bureaux en conditions de lumière mixte et d'ambiances thermiques variées*. Lyon, France: INSA, 2001, 230 p.

LESOURD M. *L'Afrique. Vulnérabilité et défis*. In: Collection Question de géographie. Edition du temps. Nantes: 2003, p. 354-376.

MAE-MADAGASCAR. *Participation de Madagascar à la Conférence de haut niveau des Nations Unies sur la biodiversité* [en ligne]. Disponible sur: <http://www.madagascar-diplomatie.net/article.php?article_id=661>. (consulté le 19/10/2010).

MERRAKEB S. *Modélisation des structures en bois en environnement variable.* Ecole doctorale Science, technologie, santé. Université de Limoges, 2006, 146 p.

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT D. L., DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DES TRANSPORTS. *Habiter le bois.* CSTB. France: 1986, 190 p.

MORBIHAN C. D. M. E. D. L. A. D. *Toit et couverture* [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.girouette.fr/toit.php>>. (consulté le 10 Janvier 2011).

MOUJALLED B. *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments ventilés.* Rhône. Lyon: INSA, 2007, 330 p.

NGOHE-EKAM P. S., MEUKAM P., MENGUY G., et al. *Thermophysical characterisation of tropical wood used as building materials : with respect to the basal density.* Construction and Building Materials, 2006, vol. 20, pp. 929-938.

NICOL F. et HUMPHREY M. *The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments.* Energy and Buildings, 2002, vol. 34, 6, pp. 66-684.

OBATA Y., TAKEUCHI K., FURUTA Y., et al. *Research on better use of wood for sustainable development : quantitative evaluation of good tactile warmth of wood.* Energy, 2005, vol. 30, pp. 1317-1328.

OSANYINTOLA O. F. et SIMONSON C. J. *Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials : Experimental facilities and energy impact.* Energy and Buildings, 2006, vol. 28, pp. 1270-1282.

PADFIELD T. *The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity*

Department of Structural Engineering and Materials. Denmark: The Technical University of Denmark, 1998, 165 p.

PADFIELD T. *Humidity buffering by absorbent materials in walls* [en ligne]. Disponible sur: <www.natmus.dk/cons/tp/wallbuff/wallbuff.htm>. (consulté le

RABEZA V. R. *Recensement général de la population et de l'habitat : Madagascar* [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.instat.mg/>>. (consulté le Juillet 2010).

RODE C., HANSEN K. K., PADFIELD T., et al. *Moisture Buffer Capacity - Summary report.* Nordic Building Physics Symposium. Denmark: Technical University of Denmark-BYG-DTU, 2003, 33 p.

SAKURAGAWA S. *Change in the impression of rooms with interior wood finishes arranged differently: questionnaire survey with the use of photographs for the analysis of impressions of rooms concerning living activities.* Journal of wood sciences, 2006, vol. 52, pp. 290-294.

SATGE C. *Etude de nouvelles stratégies de valorisation de mono et polysaccharides.* Chimie Physique. Limoges: université de Limoges, 2002, p.

SESSI et MINISTÈRE DE L'ECONOMIE D. F. E. D. L. I. *Le bois en Chiffre* [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.le-bois.com/bois2006.pdf>>. (consulté le 10 Janvier 2011).

TOFTUM J., JORGENSEN A. et FANGER P. O. *Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort.* Energy and Buildings, 1997, vol. 28, pp. 15-23.

TOFTUM J., JORGENSEN A. et FANGER P. O. *Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin.* Energy and Buildings, 1997(2), vol. 28, pp. 1-13.

TROUY-TRIBOULOT M.-C. et TRIBOULOT P. Matériau bois : structures et caractéristiques. In: Techniques de l'Ingénieur. C 925. France: 2006, p. 1-26.

TSUNETSUGU Y., MIYAZAKI Y. et SATO H. *Physiological effects in humans induced by the visual stimulation of room interiors with different wood quantities.* Journal of Wood Sciences, 2006, vol. 53, pp. 11-16.

WANG S.-Y., LIN F.-C. et LIN M.-Y. *Thermal properties of interior decorative material and contacted sensory cold-warmth I: relation between skin temperature and contacted sensory cold-warmth.* Journal of wood sciences, 2004, vol. 46, 5, pp. 357-363.

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : MANDRARA née HARIJAONA

DATE de SOUTENANCE : 10 juin 2011

Prénom : Zaratiana

TITRE : Impact thermique des revêtements en bois sur l'ambiance intérieure des bâtiments. Application dans l'habitat traditionnel en France et à Madagascar.

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre :

Ecole doctorale : Mécanique Energétique Génie Civil et Acoustique

Spécialité : Thermique et énergétique du bâtiment

Cote B.I.U. - Lyon : / et bis CLASSE :

RESUME :

Les constructions traditionnelles en France et à Madagascar témoignent de l'utilisation ancienne d'abondantes ressources forestières locales et donc du bois dans l'architecture. Le bois peut être considéré comme un matériau naturel et renouvelable dans la mesure où les ressources forestières locales sont gérées durablement. L'utilisation du bois dans la construction contribue largement à la maîtrise du cycle du carbone atmosphérique et à la limitation des émissions de gaz à effet de serre. Ce travail présente les principales caractéristiques physiques du matériau bois et des systèmes constructifs associés, montrant l'importance de se préoccuper de l'influence de revêtement en bois sur l'environnement intérieur des habitations. La caractérisation des phénomènes hygrothermiques à l'échelle d'une pièce d'habitation a été détaillée : présence d'eau dans le bois, état hydrique du bois, comportement de l'équilibre hygroscopique, modèles d'isotherme de sorption, et transfert de masse. De même, une caractérisation des ambiances et du confort thermique.

En partant d'une étude bibliographique sur les approches du confort et sur les connaissances sur le bois, nous avons conduit une étude expérimentale in situ dans des locaux d'habitation en France et à Madagascar. Ce travail apporte des connaissances sur l'évaluation des interactions entre le confort thermique, l'ambiance et le revêtement en bois. Par la suite, des campagnes de mesure en laboratoire ont permis de tester sept configurations de revêtement intérieur en bois dans une cellule expérimentale, et le travail a été complété par des simulations numériques.

Les résultats du travail contribuent à une réponse pour recommander ou non l'emploi du bois dans l'habitat traditionnel dans la construction neuve en France et à Madagascar.

MOTS-CLES: bois - - revêtement - ambiance - confort - habitation - naturel - écologie

Laboratoire (s) de recherche : Laboratoire des Sciences de l'habitat de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Département Génie Civil et Bâtiment FRE CNRS 3237

Directeurs de thèse:

M. GUARRACINO Gérard,
M. CANTIN Richard,

Président de jury : M. JEAN JACQUES ROUX, Professeur, CETHIL- INSA Lyon

Composition du jury :

GUARRACINO,	Directeur 1
CANTIN	Directeur 2
DEPECKER Patrick,	Rapporteur
FRAISSE Gilles,	Rapporteur
ROUX Jean Jacques,	Président
MOUJALLED Bassam,	Examineur