

UNIVERSITE D'ARTOIS

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

SPECIALITE : SCIENCES POUR L'INGENIEUR

OPTION : GENIE CIVIL

Présentée et soutenue publiquement par

Emilio SASSINE

Ingénieur en énergétique

ANALYSE TYPOLOGIQUE ET THERMIQUE DES MAISONS ANCIENNES DE LILLE. ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DES PAROIS VERTICALES

Devant la commission d'examen formée de :

S. Fohanno	Maitre de conférences HDR – Université de Reims	Rapporteur
G. Nasr	Professeur – Université Libanaise	Rapporteur
E. Antczak	Professeur – Université d'Artois	Directeur de thèse
L. Lahoche	Professeur – Université d'Amiens	Examineur
Z. Younsi	Maitre de conférences – Université d'Artois	Co-encadrant
Y. Chérif	Maitre de conférences – Université d'Artois	Co-encadrant

*A mes parents, mon premier support moral,
A mon frère David,
Aux êtres qui me sont les plus chers,
A toute personne qui a contribué à la réussite de cette thèse,
Et à la femme de ma vie,
Je dédie ce travail, fruit de trois ans de recherche.*

« Personne ne peut vous apprendre quoi que ce soit qui ne repose déjà au fond d'un demi-sommeil dans l'aube de votre connaissance.

Le maître qui marche parmi les disciples, à l'ombre du temple, ne donne pas de sa sagesse, mais plutôt de sa foi et de sa capacité d'amour.

S'il est vraiment sage, il ne vous invite pas à entrer dans la demeure de sa sagesse. Il vous conduit jusqu'au seuil de votre esprit.

L'astronome peut vous parler de son entendement de l'espace. Il ne peut vous donner son entendement.

Le musicien peut vous interpréter le rythme qui régit tout espace. Il ne peut vous donner l'ouïe qui capte le rythme, ni la voix qui lui fait écho.

Celui qui est versé dans la science des nombres peut décrire les régions du poids et de la mesure. Il ne peut vous y emmener.

Car la vision d'un être ne prête pas ses ailes à d'autres,

De même que chacun de vous se tient seul dans la connaissance de Dieu, chacun de vous doit demeurer seul dans sa connaissance de Dieu et dans son entendement de la terre. » {Gibran Khalil Gibran – Le Prophète}

Remerciements

Ce travail a été mené au sein de l'Ecole des Hautes Etudes d'ingénieur de Lille et du Laboratoire de Génie Civil et Géo Environnement.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur le Professeur Emmanuel Antczak pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire, d'avoir mis à ma disposition les moyens qu'a nécessité cette étude, ainsi, que pour ses directives et encouragements précieux. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression des mes vifs remerciement pour l'esprit de recherche et d'indépendance qu'il m'a transmis tout au long de cette aventure.

Je tiens à remercier Messieurs Stéphane Fohanno et le Professeur Georges Nasr pour avoir accepté d'être Rapporteurs de ce travail.

J'exprime aussi ma reconnaissance au Professeur Laurent Lahoche pour avoir participé au Jury de ma soutenance et d'avoir porté de l'intérêt à mon travail.

Je remercie mon co-encadrant Zohir Younsi pour son implication dans ma thèse, pour ses conseils et son support moral.

Pareillement, je remercie aussi mon co-encadrant Yassine Chérif pour son encadrement et sa participation dans les travaux.

Je suis également très reconnaissant à Monsieur Thierry Chartier pour ses aides dans le montage et l'entretien du dispositif expérimental ainsi qu'à ses conseils et ses explications.

Je remercie HEI (Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur) – Université Catholique de Lille d'avoir financé une partie de ma thèse. Je remercie également tout son personnel pour m'avoir offert l'ambiance favorable pour le déroulement de ma thèse.

Je remercie aussi le Conseil Régional du Nord-Pas de Calais (service recherche et développement), qui m'ont financé en partie ma thèse de doctorat.

Un remerciement aussi pour les personnes qui ont travaillé sur le projet URPACK qui fut pour nous une référence importante et surtout dans l'étude thermique des différentes typologies.

Je souhaite remercier tous les membres du LGCgE qui ont contribué au bon déroulement de cette thèse, que ce soit de manière technique, scientifique, administrative ou amicale.

Je tiens à remercier chaleureusement tous les thésards avec qui j'ai partagé mon bureau, à HEI comme à Béthune et qui ont partagé avec moi leurs multiples et riches connaissances, ainsi, que leurs rêves et projets.

Finalement, je remercie ceux qui m'ont donné la vie, l'éducation et le support : mes parents... Si je souhaitais vous exprimer par écrit combien je vous suis reconnaissant, je rédigerais des thèses et des thèses... Merci pour tout...

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	18
------------------------------------	-----------

CHAPITRE I: ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	23
--	-----------

I.1 INTRODUCTION	23
-------------------------------	-----------

I.1.1 LE SECTEUR LOGEMENT	23
I.1.1.a Dépenses énergétiques	24
I.1.1.b Confort thermique	25
I.1.2 LE CADRE REGLEMENTAIRE ET LES LABELS	26
I.1.2.a Evolution de la réglementation thermique française	26
I.1.2.b Les labels en France	28

I.2 LE BATI ANCIEN	29
---------------------------------	-----------

I.2.1 DEFINITION DU BATI ANCIEN	29
I.2.2 SPECIFICITES DU BATI ANCIEN	31
I.2.2.a Interaction avec son environnement	31
I.2.2.b Le comportement des occupants	32
I.2.2.c Mode constructif particulier	32
I.2.2.d Grande inertie thermique	33
I.2.2.e Sensibilité à l'humidité	33
I.2.3 RISQUES ET PROBLEMES	34
I.2.3.a Humidité	34
I.2.3.b Pathologies structurelles	35
I.2.3.c Effet de la paroi froide	36
I.2.3.d Ponts thermiques	36
I.2.4 REHABILITATION ET RENOVATION	38

I.3 L'ISOLATION THERMIQUE	38
--	-----------

I.3.1 GENERALITES	38
I.3.2 L'ISOLATION THERMIQUE DES MURS EXTERIEURS	39
I.3.3 LES DIFFERENTS TYPES D'ISOLANTS	40
I.3.3.a Les isolants synthétiques	40
I.3.3.b Les isolants minéraux	41
I.3.3.c Les isolants végétaux	42
I.3.3.d Les isolants issus du recyclage	43
I.3.3.e Les isolants d'origine animale	44
I.3.4 L'ISOLATION ECOLOGIQUE	45
I.3.5 LA CERTIFICATION DES ISOLANTS	46

I.4 CRITERES DE CHOIX D'UN ISOLANT PERFORMANT	46
--	-----------

I.4.1 CRITERES HYGROTHERMIQUES	47
I.4.1.a Epaisseur minimale	47
I.4.1.b Réaction à l'humidité	47
I.4.1.c Inertie thermique	48
I.4.2 AUTRES CRITERES	49
I.4.2.a Critères environnementaux et sanitaires	49

I.4.2.b Performances acoustiques	50
I.4.2.c Prix	50
I.5 SYNTHESE DES TRAVAUX SUR LA REHABILITATION DES BATIMENTS ANCIENS..	51

CHAPITRE II: TYPOLOGIE DE BATIMENTS A LILLE.....57

II.1 INTRODUCTION.....	57
II.2 PRESENTATION DU CONTEXTE LILLOIS.....	57
II.2.1 APERÇU HISTORIQUE	57
II.2.2 ANALYSE DU PARC DE LOGEMENTS EXISTANTS A LILLE	59
II.2.2.a Occupation du parc de logements à Lille	59
II.2.2.b Précarité énergétique du parc de logements anciens à Lille	59
II.3 APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TYPOLOGIES DU BATI ANCIEN AU NORD	61
II.3.1 GENERALITES SUR LES TYPOLOGIES.....	61
II.3.2 ETUDES DEJA FAITES SUR LE PARC LILLOIS	61
II.4 LA TYPOLOGIE ADOPTEE	64
II.4.1 LES TYPES DE MAISONS IDENTIFIES	64
II.4.1.a La maison de courée	65
II.4.1.b La maison de ville et la maison ouvrière	66
II.4.1.c La maison bourgeoise	69
II.4.2 CONSTANTES ET VARIANTES DES TYPOLOGIES.....	70
II.4.2.a Les constantes.....	70
II.4.2.b Les variantes.....	70
II.5 LES SPECIFICITES	71
II.5.1 SPECIFICITES ARCHITECTURALES	71
II.5.1.a Eléments caractéristiques	71
II.5.1.b Marge d'évolution et de modification du patrimoine bâti	72
II.5.2 SPECIFICITES ENERGETIQUES.....	74
II.5.2.a La précarité énergétique.....	74
II.5.3 REHABILITATION ENERGETIQUE DU BATI ANCIEN	76

CHAPITRE III: COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN MUR ANCIEN LILLOIS TYPIQUE.....80

III.1 INTRODUCTION	80
III.1.1 DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR	81
III.1.1.a La conduction.....	81
III.1.1.b La convection.....	81
III.1.1.c Le rayonnement	81
III.1.1.d Couplage (Convection + rayonnement)	82
III.1.1.e Conditions aux limites.....	82
III.1.2 CONDUCTION UNIDIRECTIONNELLE EN REGIME PERMANENT	83
III.1.2.a Cas du mur simple (monocouche)	83
III.1.2.b Cas du mur multicouches.....	83
III.1.3 CONDUCTION UNIDIRECTIONNELLE EN REGIME VARIABLE.....	84

III.1.3.a	Mur thermiquement mince (Méthode de gradient nul) et méthode nodale	85
III.1.3.b	Méthode analytique – Mur semi-infini et mur fini	86
III.1.3.c	Méthode des éléments finis.....	86
III.1.3.d	Méthode des quadripôles.....	86
III.2	DETERMINATION DES PROPRIETES THERMIQUES DES MATERIAUX (BRIQUE ET MORTIER).....	88
III.2.1	METHODOLOGIE EXPERIMENTALE.....	88
III.2.1.a	Détermination de la conductivité thermique	90
III.2.1.b	Détermination de la chaleur massique	91
III.2.2	PROPRIETES DE LA BRIQUE.....	92
III.2.3	PROPRIETES DU MORTIER	94
III.3	CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU MUR	96
III.3.1	CAPTEURS ET INSTRUMENTATION :	96
III.3.1.a	Les capteurs de flux :	96
III.3.1.b	Les capteurs de température :	98
III.3.2	DESCRIPTION DU DISPOSITIF ET DE LA METHODE.....	99
III.3.3	ETUDE DU MUR EN REGIME PERMANENT	101
III.3.3.a	Méthode.....	101
III.3.3.b	Résultats et discussion	102
III.3.4	ETUDE DU MUR EN REGIME HARMONIQUE ETABLI	105
III.3.4.a	Approximation du mur semi-infini	107
III.3.4.b	Méthode du mur fini.....	108
III.3.5	ANALYSE D'INCERTITUDE.....	110
III.3.5.a	Incertitude sur le flux mesuré	110
III.3.5.b	Incertitude sur la température mesurée.....	110
III.3.5.c	Incertitude sur la position des capteurs.....	110
III.4	RESULTATS THEORIQUES EN REGIME HARMONIQUE	111
III.4.1	DETERMINATION DES PROPRIETES EQUIVALENTES DU MUR.....	111
III.4.2	PRESENTATION DES METHODES UTILISEES	113
III.4.2.a	Choix des conditions aux limites.....	113
III.4.2.b	Méthode des quadripôles	114
III.4.2.c	Résolution numérique (HEAT software).....	115
III.4.2.d	Méthode nodale	116
III.4.3	CONFRONTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION	117
III.5	ETUDE DU MUR EN REGIME QUELCONQUE	119
III.5.1	DETERMINATION DE LA FONCTION DE FOURIER.....	119
III.5.2	PRESENTATION GENERALE DE LA METHODE.....	120
III.5.3	SOLUTION POUR LA METHODE D'ORDRE 2	121
III.5.3.a	Détermination de la fonction de transfert	121
III.5.3.b	Analogie Electrique.....	122
III.5.3.c	Réponse à un échelon de température	123
III.5.3.d	Réponse à une excitation sinusoïdale.....	124
III.5.3.e	Réponse à une excitation cosinusoidale	124
III.5.4	MODELE D'ORDRE 4.....	125
III.5.4.a	Détermination de la fonction de transfert	125
III.5.4.b	Réponse à un échelon de température	126
III.5.4.c	Réponse à une excitation sinusoïdale	127

III.5.4.d Réponse à une excitation cosinusoidale	128
III.5.5 ANALYSE FREQUENTIELLE	128
III.5.5.a Méthodologie	128
III.5.5.b Diagramme de Bode	129
III.5.5.c Résultats et analyse	130
III.5.6 RESULTATS ET DISCUSSION	131
III.5.6.a Signal 1	132
III.5.6.b Signal 2	133
III.5.6.c Influence de n – ordre 4	133
III.5.7 SYNTHESE	135

CHAPITRE IV: ETUDE DES DIFFERENTS SCENARIOS D'ISOLATION DU MUR ETUDIE137

IV.1 INTRODUCTION137

IV.2 DETERMINATION DES PROPRIETES THERMIQUES DES MATERIAUX ISOLANTS137

IV.2.1 METHODE DE DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE ET DE LA CHALEUR MASSIQUE DES ECHANTILLONS.....	138
IV.2.1.a Détermination de la capacité thermique des fluxmètres.....	139
IV.2.1.b Détermination de la chaleur massique réelle des isolants	140
IV.2.2 DETERMINATION DES PROPRIETES THERMIQUES DES ISOLANTS	140
IV.2.2.a Le polystyrène.....	140
IV.2.2.b La laine de bois	143
IV.2.2.c La laine de mouton	143
IV.2.2.d Le lin	143
IV.2.2.e Le métisse.....	144
IV.2.3 COMPARAISON ET SYNTHESE	144

IV.3 VALIDATION DU MODELE THEORIQUE PAR COMPARAISON AVEC LE MODELE EXPERIMENTAL146

IV.3.1 RESULTATS EN REGIME PERMANENT	146
IV.3.2 RESULTATS EN REGIME HARMONIQUE.....	148
IV.3.3 RESULTATS EN REGIME QUELCONQUE	149
IV.3.3.a Présentation de la méthode	149
IV.3.3.b Etude fréquentielle (Bode) et conclusion	151
IV.3.3.c Résultats pour un pas de temps de 20 minutes.....	152
IV.3.3.d Résultats pour un pas de temps d'une heure.....	154

IV.4 ETUDE D'UN MUR DANS DES CONDITIONS CLIMATIQUES LILLOISES REELLES AVEC LE MODELE THEORIQUE155

IV.4.1 DETERMINATION DES CONDITIONS LIMITES EXTERIEURES.....	155
IV.4.1.a Définition de la méthode utilisée.....	156
IV.4.1.b Application de la méthode au climat de Lille.....	158
IV.4.2 ETUDE DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS D'ISOLATION AVEC DU POLYSTYRENE.....	160
IV.4.2.a L'isolation intérieure.....	161
IV.4.2.b L'isolation extérieure.....	162

IV.4.2.c Comparaison entre isolation par l'extérieur et isolation par l'intérieur	163
IV.4.3 COMPARAISON DES DIFFERENTS MATERIAUX.....	164
IV.4.3.a L'isolation intérieure.....	164
IV.4.3.b L'isolation extérieure.....	165
IV.4.3.c Synthèse.....	167
IV.4.4 DISCUSSION ET CONCLUSION	167

CHAPITRE V: SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES DES DIFFERENTES TYPOLOGIES168

V.1 INTRODUCTION.....	168
V.2 HYPOTHESES ET DONNEES D'ENTREE.....	169
V.2.1 LA COMPOSITION DES PAROIS.....	169
V.2.2 LES DONNEES CLIMATIQUES.....	170
V.2.3 SCENARIO DE CHAUFFAGE	171
V.2.4 LES INFILTRATIONS ET LES DEBITS D'AIR.....	171
V.2.5 LES APPORTS INTERNES	171
V.2.6 LES SCENARIOS D'OCCUPATION.....	171
V.2.7 LES PONTS THERMIQUES.....	172
V.3 RESULTATS AVANT ISOLATION THERMIQUE.....	173
V.3.1 COMPARAISON DES PERFORMANCES ENERGETIQUES DES DIFFERENTES TYPOLOGIES.....	173
V.3.2 PERFORMANCES ENERGETIQUES DE LA MAISON OUVRIERE AVANT ISOLATION	174
V.3.2.a Comparaison de la température intérieure dans la zone la plus occupée	174
V.3.2.b Confort thermique dans la pièce la plus occupée.....	176
V.3.2.c Diagramme de Sankey.....	176
V.4 RESULTATS APRES ISOLATION THERMIQUE.....	178
V.4.1 DEFINITION DES DIFFERENTS SCENARIOS D'ISOLATION.....	178
V.4.2 RESULTATS POUR LES DIFFERENTS BOUQUETS DE TRAVAUX ET POUR LES DIFFERENTES TYPOLOGIES.....	180
V.4.3 RESULTATS POUR LES DIFFERENTS MATERIAUX ISOLANTS (CAS DE LA MAISON OUVRIERE).....	182
V.4.4 COMPARAISON ENTRE ISOLATION INTERIEURE ET ISOLATION L'EXTERIEURE	183
V.4.5 CONFORT THERMIQUE D'ETE PENDANT LA PERIODE DE CANICULE.....	185
V.5 SYNTHESE ET CONCLUSION.....	186

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES187

ANNEXES190

ANNEXE 1 - PLANS DES TYPOLOGIES [33]190

ANNEXE 2 - METHODE DES SOURCES VIRTUELLES : DIFFUSION DANS UN MILIEU D'EPaisseur FINIE LIMITE PAR DEUX PLANS PARALLELES	199
ANNEXE 3 - RACINES D'UN POLYNOME DE DEGRE 4 [66]	201
ANNEXE 4 - CARACTERISATION DES DIFFERENTS MATERIAUX ISOLANTS	203
A.) MESURES REALISEES POUR L'ECHANTILLON DE LAINE DE BOIS	203
B.) MESURES REALISEES POUR L'ECHANTILLON DE LAINE DE MOUTON	205
C.) MESURES REALISEES POUR L'ECHANTILLON DE LIN	207
D.) MESURES REALISEES POUR L'ECHANTILLON DE METISSE	209
ANNEXE 5 - DONNEES D'ENTREE POUR LES DIFFERENTES STD	211
A.) DELIMITATION DES DIFFERENTES ZONES THERMIQUES	211
B.) PROPRIETES DES DIFFERENTS MATERIAUX CONSTITUANTS LES PAROIS	214
C.) LES APPORTS INTERNES	214
D.) LES PONTS THERMIQUES	216

Liste des figures

Figure 1- Scénarios de réchauffement mondial [1].....	18
Figure 2- Evolution et prédiction de la production mondiale de pétrole et de gaz (1930-2050) [3]	19
Figure I-1- Nombre de résidences principales en France [4].....	24
Figure I-2- Part des usages dans la consommation énergétique finale des logements en France [5].....	24
Figure I-3- Plage de confort thermique [8].....	26
Figure I-4- Consommation énergétique moyennes des bâtiments selon leurs dates de construction [15].....	30
Figure I-5- Phénomènes physiques dans les parois respirantes [17].....	34
Figure I-6- Exemple de ponts thermiques linéiques et ponctuel	36
Figure I-7- Diagramme de Mollier et condensation [23]	37
Figure I-8- Teneur en eau et courbe de rétention d'humidité [18]	48
Figure I-9- Répartition géographique du panel d'étude [16].....	52
Figure I-10- Comparaison entre les consommations réelles et les consommations simulées [16].....	53
Figure I-11- Comparaison entre le fonctionnement hygrométrique d'un mur ancien non isolé et celui d'un mur isolé [15].....	53
Figure I-12-Différents dispositifs mis en place pour réduire les consommations énergétiques des bâtiments [15].....	54
Figure I-13- Bonnes et mauvaises interventions sur les murs anciens [15]	54
Figure II-1- Carte de Lille Métropole [35]	58
Figure II-2- Distribution des types d'occupations par tranches d'âge dans la métropole lilloise [36].....	59
Figure II-3- Effectifs cumulés des logements existants à Lille par année de construction [40].....	60
Figure II-4- Habitat mal isolé cumulé à Lille en pourcentage par année de construction [40].....	60
Figure II-5- Croisement des différents critères faisant naître les différents types de maisons individuelles [44]	62
Figure II-6- Répartition des 3 grandes familles de typologies [37]	63
Figure II-7- Maison de courée vue 3D (3 mitoyennetés)	65
Figure II-8- Photo d'une rue composée de maisons de courées	66
Figure II-9- Maison ouvrière vue 3D	67
Figure II-10- Rue bornée par des maisons ouvrières.....	67
Figure II-11- Maison de ville vue 3D	68
Figure II-12- Photo d'une maison de ville.....	68
Figure II-13- Maison bourgeoise vue 3D	69
Figure II-14- Photo d'une maison bourgeoise.....	69
Figure II-15- Maisons en bandes caractéristiques du Nord de la France.....	70

Figure II-16- Perte de l'homogénéité du rang (une rupture y est introduite), perte de la qualité esthétique de la façade	73
Figure II-17- Répartition des ménages en précarité énergétique en fonction de la date de construction [38].....	75
Figure II-18- Répartition des logements en précarité énergétique en fonction du type de chauffage utilisé [4].....	76
Figure II-19- Repérage des zones froides dans l'enveloppe à l'aide de caméra thermique infrarouge [33].....	76
Figure II-20- Besoin de chauffage d'un logement en fonction de son âge et de son type [46].....	77
Figure II-21- Répartition des étiquettes énergétiques des logements au Nord-Pas-de-Calais selon leurs dates de construction [46].....	77
Figure III-1- Façade extérieure d'une construction Lilloise typique (maison de ville).....	80
Figure III-2- Transfert thermique unidirectionnel dans une paroi homogène.....	83
Figure III-3- Transfert thermique en régime permanent dans une paroi multicouches..	84
Figure III-4- Schéma électrique analogue d'un mur thermiquement mince.....	85
Figure III-5- Modèle du mur par la méthode nodale.....	86
Figure III-6- Transfert thermique en régime transitoire dans une paroi bicouche.....	88
Figure III-7- Dispositif de caractérisation des matériaux.....	89
Figure III-8- Schéma du dispositif expérimental de caractérisation des matériaux.....	89
Figure III-9- Système conductif unidirectionnel soumis à un gradient de température ($\theta_1 > \theta_2$).....	90
Figure III-10- Evolution des flux au cours de la détermination de la conductivité thermique.....	91
Figure III-11- Evolution des flux au cours de la détermination de la chaleur massique ..	92
Figure III-12- Bloc de brique expérimenté.....	93
Figure III-13- Détermination de la conductivité thermique de la brique	93
Figure III-14- Détermination de la chaleur massique de la brique	94
Figure III-15- Bloc de mortier expérimenté.....	94
Figure III-16- Détermination de la conductivité thermique du mortier	95
Figure III-17- Détermination de la chaleur massique du mortier	95
Figure III-18- Mur en cours de construction.....	96
Figure III-19- Coupe d'une cellule de fluxmètre.....	97
Figure III-20- Dispositif d'étalonnage des fluxmètres à flux nul.....	97
Figure III-21- Réponse en tension en fonction de la densité de flux.....	98
Figure III-22- Photo du montage expérimental (mur + caisson) avant assemblage	99
Figure III-23- Disposition des thermocouples dans les couches numéros 6 (à gauche) et 7 (à droite) du mur	100
Figure III-24- Schéma du modèle expérimental (coupe transversale du caisson)	100
Figure III-25- Représentation électrique du montage expérimental en régime stationnaire	101
Figure III-26- Régime permanent pour différentes températures de consignes.....	102
Figure III-27- Evolution de la température du caisson en régime permanent en fonction de la température de consigne	103

Figure III-28- Evolution de la température intérieure du mur en régime permanent en fonction de la température de consigne.....	103
Figure III-29- Evolution de la température extérieure du mur en régime permanent en fonction de la température de consigne.....	103
Figure III-30- Evolution du flux intérieur en régime permanent en fonction de la température de consigne	104
Figure III-31- Etablissement du régime harmonique dans le mur.....	105
Figure III-32- Evolution de la température dans le mur pour diverses profondeurs (valeurs expérimentales)	106
Figure III-33- Température moyenne du mur pour diverses profondeurs.....	106
Figure III-34- Solution de $H(\alpha)$	109
Figure III-35- Configuration du mur étudié.....	111
Figure III-36- Représentation d'une couche du mur	112
Figure III-37- Schéma électrique équivalent du mur.....	112
Figure III-38- Conditions aux limites expérimentales	114
Figure III-39- Résultats du programme basé sur la méthode des quadripôles.....	114
Figure III-40- Maillage du mur – Heat 3D	116
Figure III-41- Comparaison du transfert thermique pour différents nombres de nœuds	117
Figure III-42- Modélisation du mur sur Matlab – Simulink	117
Figure III-43- Confrontation des résultats dans le cas du régime harmonique	118
Figure III-44- Schéma électrique analogue du mur 3R2C.....	122
Figure III-45- Diagramme de Bode pour le mur pour différents ordres.....	130
Figure III-46- Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats des deux modèles théoriques (ordre 2 et ordre 4) pour le signal 1.....	132
Figure III-47- Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats des deux modèles théoriques (ordre 2 et ordre 4) pour le signal 2.....	133
Figure III-48- Etude de l'influence du développement de la fonction de Fourier (nombre d'harmoniques) sur l'allure du flux intérieur théorique	134
Figure III-49- Comparaison de la composition des signaux 1 et 2 en fréquences	135
Figure III-50- Variation de la température de l'air dans l'ambiance du laboratoire sur une durée de près de 16 jours	136
Figure IV-1- Dispositif de caractérisation des matériaux	138
Figure IV-2- Détermination de la capacité thermique des fluxmètres	139
Figure IV-3- Echantillon de polystyrène expérimenté.....	141
Figure IV-4- Variations de la température et du flux pendant la mesure de la conductivité du polystyrène	141
Figure IV-5- Conductivité thermique du polystyrène en fonction de la température moyenne imposée.....	142
Figure IV-6- Variations de la température et du flux pendant la mesure de la chaleur massique du polystyrène.....	142
Figure IV-7- Echantillon de laine de bois expérimenté.....	143
Figure IV-8- Echantillon de laine de mouton expérimenté	143
Figure IV-9- Echantillon de lin expérimenté	144
Figure IV-10- Echantillon de métisse expérimenté.....	144

Figure IV-11- Conductivité thermique des différents matériaux isolants en fonction de la température moyenne imposée	144
Figure IV-12- Comparaison des performances thermiques des différents isolants	145
Figure IV-13- Schéma du montage expérimental du mur après isolation	146
Figure IV-14- Flux et températures en régime permanent dans le cas du mur isolé.....	147
Figure IV-15- Comparaison des deux flux expérimental et nodal dans le cas du mur isolé et sollicité par une température sinusoïdale.....	148
Figure IV-16- Diagramme de Bode pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'intérieur.....	151
Figure IV-17- Diagramme de Bode pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'extérieur	152
Figure IV-18- Comparaison des deux flux expérimental et théorique (ordre 2) dans le cas du mur isolé pour un pas de temps de 20 minutes.....	152
Figure IV-19- Influence de la température de l'air ambiant sur les résultats expérimentaux.....	153
Figure IV-20- Comparaison des deux flux expérimental et théorique (ordre 2) dans le cas du mur isolé et sollicité par une température quelconque pour un pas de temps d'une heure.....	154
Figure IV-21- Variations de la température extérieure à Lille entre le 1 ^{er} janvier et le 17 janvier 2012 [83]	155
Figure IV-22- Profil quotidien de température solaire pour les différentes saisons.....	158
Figure IV-23- Température ambiante et température solaire entre le 1 ^{er} et le 17 janvier 2012 à Lille	159
Figure IV-24- Composition des variations de climat réel en fréquences.....	160
Figure IV-25- Variations de la densité de flux thermique sur la durée considérée pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'intérieur.....	161
Figure IV-26- Déperditions énergétiques surfaciques en kW.h/m ² pour le mur isolé par différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'intérieur sur la durée considérée (400 h)	161
Figure IV-27- Variations de la densité de flux thermique sur la durée considérée pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'extérieur	162
Figure IV-28- Déperditions énergétiques surfaciques en kW.h/m ² pour le mur isolé par différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'extérieur sur la durée considérée (400 h).....	163
Figure IV-29- Comparaison des densités de flux thermiques entre l'isolation par l'intérieur et l'isolation par l'extérieur pour 10 cm de polystyrène.....	163
Figure IV-30- Variations de la densité de flux thermique sur la durée considérée pour différents matériaux appliqués de l'intérieur	164
Figure IV-31- Déperditions énergétiques surfaciques en kW.h/m ² pour le mur isolé par différents matériaux appliqués de l'intérieur sur la durée considérée.....	165
Figure IV-32- Variations de la densité de flux thermique sur la durée considérée pour différents matériaux appliqués de l'extérieur.....	166
Figure IV-33- Déperditions énergétiques surfaciques en kW.h/m ² m ² pour le mur isolé par différents matériaux appliqués de l'extérieur sur la durée considérée.....	166
Figure V-1- Coefficients de déperdition surfacique des différentes parois	170

Figure V-2- Variations annuelles de la température extérieure (Lille)	170
Figure V-3- Localisation des différents ponts dans la maison bourgeoise	172
Figure V-4- Comparaison des besoins énergétiques annuels pour les différentes typologies.....	173
Figure V-5- Comparaison des besoins énergétiques annuels pour les différentes typologies par unité de surface habitable.....	174
Figure V-6- Evolution de la température dans la zone la plus occupée (salon + salle de séjour) pendant la semaine la plus chaude (28 Juillet – 3 Aout).....	175
Figure V-7- Evolution de la température dans la zone la plus occupée (salon + salle de séjour) pendant la semaine la plus froide (12 Février – 18 Février).....	175
Figure V-8- Zone de Brager pour la maison ouvrière à l'état existant (avant isolation)	176
Figure V-9- Diagramme de Sankey pour la maison ouvrière à l'état existant (avant isolation)	177
Figure V-10- Besoins énergétiques pour les différents scénarios d'isolation et pour les différentes typologies.....	180
Figure V-11- Signatures énergétiques des différentes typologies.....	181
Figure V-12- Comparaison des besoins annuels de chauffage pour une maison ouvrière selon différents types d'isolants employés pour le scénario d'isolation 2.....	182
Figure V-13- Influence du type d'isolant sur le confort thermique dans la zone la plus occupée pendant la semaine la plus chaude pour le scénario 2.....	183
Figure V-14- Comparaison des besoins de chauffage entre l'isolation thermique intérieure et l'isolation thermique extérieure pour une maison ouvrière pour le scénario 2	183
Figure V-15- Evolution des besoins de chauffage pendant la semaine la plus froide pour la maison ouvrière (scénario 2).....	184
Figure V-16- Influence de l'emplacement de l'isolant sur le confort thermique dans la zone la plus occupée pendant la semaine la plus chaude	184
Figure V-17- Influence de l'emplacement de l'isolant sur le confort thermique dans la zone la plus occupée pendant la semaine la plus chaude en période de canicule (été 2003).....	185

Liste des tableaux

Tableau I-1- Comparaison entre la RT2005 et la RT2012	27
Tableau I-2- Exigences sur les résistances thermiques ($m^2.W/K$) des parois (RT2005 élément par élément) [10].....	28
Tableau I-3- Labels pour les bâtiments existants construits avant 1948.....	28
Tableau I-4- Avantages et inconvénients de l'isolation par l'intérieur [18].....	40
Tableau I-5- Les isolants synthétiques	41
Tableau I-6- Les isolants minéraux.....	42
Tableau I-7- Les isolants végétaux.....	43
Tableau I-8- Les isolants issus du recyclage	44
Tableau I-9- Les isolants d'origine animale	45
Tableau II-1- Répartition du parc du Nord-Pas-de-Calais en différentes typologies architecturales selon le modèle Enerter [46]	64
Tableau II-2- Gains liés à la mise en œuvre du bouquet de travaux [46].....	78
Tableau III-1- Propriétés thermo physiques de la brique et du mortier	96
Tableau III-2- Disposition des différents capteurs dans le mur.....	96
Tableau III-3- Résultats des températures et des flux dans le cas du régime permanent	102
Tableau III-4- Incertitude due à la position des thermocouples.....	111
Tableau III-5- Propriétés thermiques de la brique et du mortier déterminées expérimentalement (partie III.2)	115
Tableau III-6- Evaluation de l'influence du nombre d'harmoniques dans la précision des résultats	134
Tableau IV-1- Propriétés thermiques mesurées des différents matériaux isolants.....	145
Tableau IV-2- Résultats de températures et de flux dans le cas du régime permanent (mur isolé).....	147
Tableau V-1- Epaisseurs d'isolant à appliquer pour les différents scénarios d'isolation [33].....	178

Nomenclature

U	Coefficient de transmission thermique global	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
V	Tension électrique (analogie électrique)	$[V]$
R	Résistance thermique (ou résistance électrique dans le cas de l'analogie électrique $[\Omega]$)	$[m^2.K.W^{-1}]$
C	Capacité thermique (ou capacité électrique dans le cas de l'analogie électrique $[F]$)	$[J.m^{-3}.K^{-1}]$
T	Température	$[^{\circ}C, K]$
e	Epaisseur	$[m]$
x	Abscisse	$[m]$
t	Temps	$[s]$
h	Coefficient de transmission thermique surfacique	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
S	Surface	$[m^2]$
Bi	Nombre de Biot	$[-]$
a	Diffusivité thermique	$[m^2.s^{-1}]$
c_p	Chaleur massique	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
G	Gain	$[-]$
D	Module cumulé	$[-]$
n	Ordre d'itération	$[-]$
I	Courant électrique (analogie électrique)	$[A]$
K	Sensibilité du fluxmètre	$[\mu V.W^{-1}.m^2]$
P	Puissance de chauffage	$[W]$
H	Signature énergétique du bâtiment	$[W/^{\circ}C]$

Symboles grecs

ε	Emissivité du matériau	$[-]$
φ	Flux thermique	$[W.m^{-2}]$
θ	Température (après soustraction de la température intérieure)	$[^{\circ}C]$
λ	Conductivité thermique	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
σ	Constante de Stefan Boltzmann	$[W.m^{-2}.K^{-4}]$

ξ	Amortissement du signal (température)	[–]
ψ	Déphasage du signal (température)	[rad]
ω	Fréquence angulaire	[rad/s]

Indices

i	Intérieur	[–]
e	Extérieur	[–]
wi	Relatif à la surface intérieure du mur	[–]
wo	Relatif à la surface extérieure du mur	[–]
w	Relatif au mur	[–]
d	Relatif au système de chauffage (damping system)	[–]
t	Total	[–]
m	Mortier	[–]
b	Brique	[–]
a	Air	[–]
s	Soleil	[–]
c	Relatif à la convection	[–]
r	Relatif au rayonnement	[–]

Introduction générale

L'énergie, cette ressource précieuse qui conditionne notre vie quotidienne, impose aujourd'hui un défi pour l'humanité: d'une part, le mode de vie actuel et l'explosion démographique de la planète font que la consommation de l'énergie mondiale se voit augmenter continuellement; et d'autre part, la limitation de la plupart des ressources énergétiques utilisées actuellement et la pression exercée par l'homme sur l'environnement en utilisant ces ressources font que cette consommation doit absolument diminuer.

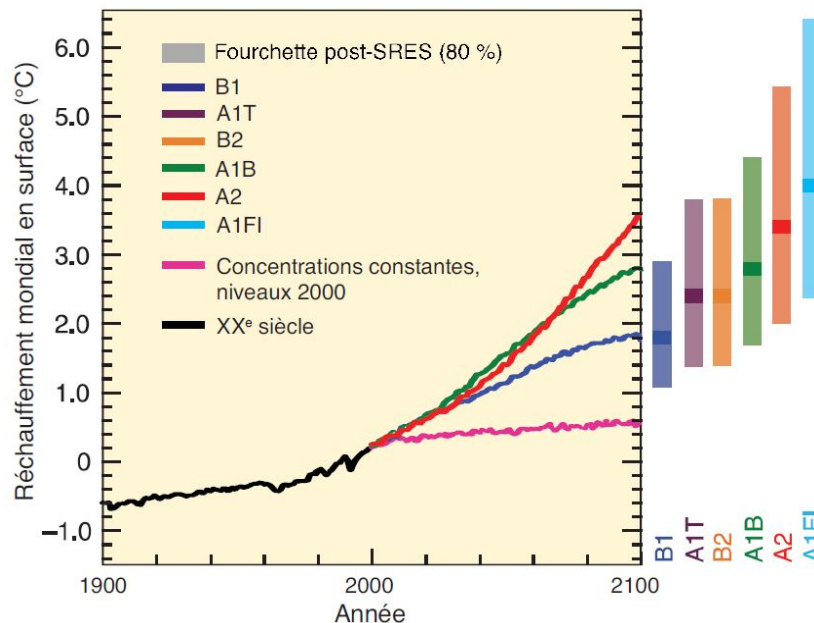


Figure 1- Scénarios de réchauffement mondial [1]

La pression de l'homme sur son environnement par la consommation énergétique se manifeste surtout par le réchauffement climatique défini comme étant une modification durable des paramètres statistiques du climat. En effet, les projections des modèles climatiques présentées dans le dernier rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) [1] indiquent que la température de surface du globe est susceptible d'augmenter de 1,1 à 6,4° C supplémentaires au cours du XXIe siècle (les incertitudes étant liées à la précision des modélisations employées, et aux comportements étatiques et individuels présents et futurs). La question posée aujourd'hui est comment amortir l'effet de serre et non pas comment l'éviter; même l'arrêt complet des émissions amortirait le phénomène de réchauffement sans l'empêcher de se poursuivre en raison de la grande capacité calorifique des océans et de la durée de vie des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Les répercussions du réchauffement de la planète sur l'homme et son environnement peuvent être dramatiques à moyen et long terme :

-Conséquences environnementales : principalement liées à la fonte des glaciers et couvertures neigeuses, ce qui se traduit par une montée des eaux due à cet apport d'eau supplémentaire et à la dilatation thermique de l'eau des mers et des océans. De plus, Si le réchauffement moyen de la planète excédait 1,5 à 2,5 °C par rapport à 1980-1999, le risque d'extinction de 20 à 30 % des espèces recensées à ce jour serait probablement accru, et si la température s'élevait de plus de 3,5 °C environ, les modèles prévoient que 40 à 70 % des espèces recensées pourraient disparaître de la surface du globe [1], [2].

-Conséquences sur l'homme : Le GIEC prévoit des conséquences négatives majeures sur l'humanité au XXI^e siècle se traduisant par une baisse des rendements agricoles potentiels dans la plupart des zones tropicales et subtropicale, une diminution des ressources en eau dans la plupart des régions sèches tropicales et subtropicales, une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes (pluies torrentielles, tempêtes, sécheresses), une augmentation des feux de forêt durant des étés plus chauds...

L'augmentation actuellement observée des quantités de gaz à effet de serre, comme le CO₂, contribue à renforcer l'effet de serre. Il a été prouvé par l'étude isotopique du carbone dans l'air que cette augmentation des quantités de gaz à effet de serre est due pour plus de la moitié à la combustion de matière carbonée fossile, l'autre partie étant due essentiellement aux déboisements massifs.

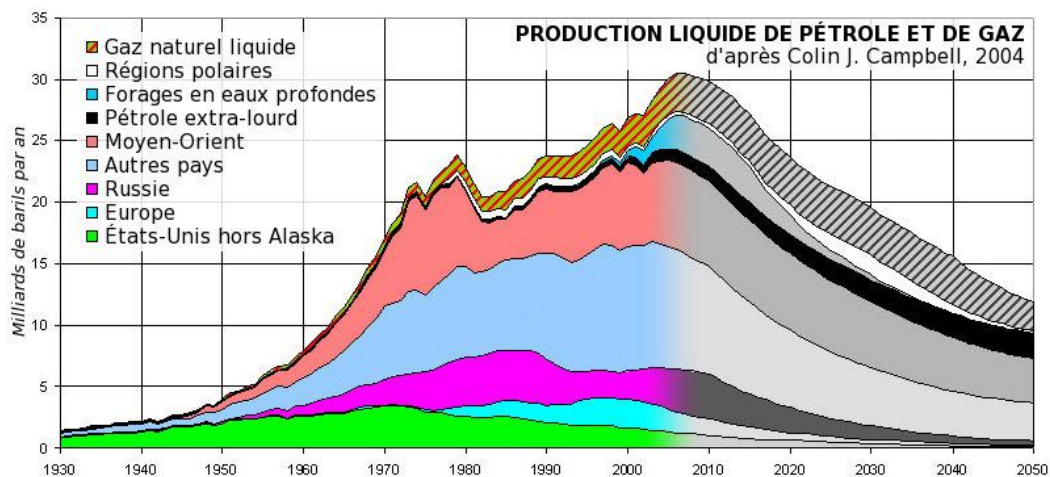


Figure 2- Evolution et prédiction de la production mondiale de pétrole et de gaz (1930-2050) [3]

La problématique énergétique mondiale est due non seulement aux dégagements de CO₂ par la combustion des énergies fossiles, mais aussi à la diminution de la production mondiale des énergies fossiles. La Figure 2 montre que, pour les différents forages pétroliers, les courbes atteignent un pic entre les années 2006 et 2015. Les énergies fossiles sont en fait une ressource non renouvelable dont les découvertes prouvées sont en perpétuelle décroissance depuis quelques décennies. Une production décroissante engendre une diminution de la consommation et une augmentation des prix. Or, la

croissance démographique et l'augmentation des besoins énergétiques rendent la diminution de la consommation une mission difficile, d'où la crise énergétique.

Face à ces problématiques la diminution de la pression de l'homme sur son environnement devient une nécessité urgente à mettre en place. La France s'est engagée à partir du protocole de Kyoto à réduire ses émissions ; et, au-delà de ce protocole, à diviser par quatre ses émissions à l'horizon de l'année 2050.

Le secteur du bâtiment est au centre de ce défi, notamment en France où il représente 43% des consommations énergétiques et 25% des émissions de gaz à effet de serre. Dans les pays industrialisés, les bâtiments consomment une partie importante de l'énergie utilisée par la société et, en conséquence, ils sont source d'une partie non négligeable de la pollution. Cette énergie est l'objet de nombreux usages: chauffage et/ou refroidissement, ventilation, eau chaude sanitaire, éclairage, cuisson et autres appareils électroménagers... Dans les climats tempérés et froids, la plus grande part de l'énergie utilisée par un bâtiment sert au chauffage.

Depuis le premier choc pétrolier de 1974, les efforts se multiplient afin de réduire les consommations énergétiques dans ce secteur; les réglementations thermiques se succèdent l'une après l'autre afin de réduire de plus en plus les consommations liées au chauffage des bâtiments en France.

Le flux de chaleur généré dans le système de chauffage aboutit inévitablement à l'extérieur par différentes voies plus ou moins directes. Une des solutions les plus adaptées à la réduction des consommations de chauffage dans le bâtiment est l'isolation thermique qui permet de diminuer les déperditions thermiques vers l'extérieur et par la suite les besoins de chauffage.

Cependant, contrairement au bâti moderne qui ne présente pas de contraintes vis-à-vis des techniques d'isolation et du choix des matériaux, le bâti ancien vit avec son environnement grâce à un équilibre fragile qui ne doit pas être perturbé. Une mauvaise intervention sur ce bâti risque de le déstabiliser, d'engendrer des problèmes graves dans sa structure, et d'impliquer des résultats contraires à ceux attendus. Sa connaissance est donc nécessaire en amont de toute intervention.

Le parc de logements dans le Nord Pas de Calais se caractérise par une forte présence d'un habitat individuel ancien ouvrier (en courées, habitat de typologie relativement homogène issu de l'industrialisation du début 19^{ème} siècle). L'amélioration de ses caractéristiques thermiques constitue une problématique différente de celle du bâti récent. Il s'agit d'un habitat ancien souvent indécemment, voire insalubre dont la qualité énergétique est médiocre.

Cet habitat est majoritairement occupé par des populations modestes ou en situation précaire. Cette précarité se trouve renforcée par l'augmentation des dépenses énergétiques provoquant une augmentation des impayés, voire une mise en danger des occupants par l'utilisation de moyens de chauffage inadaptés (chauffage d'appoint inadapté).

Les problèmes posés par la réhabilitation et l'amélioration du parc privé existant s'articulent autour de trois thématiques :

La problématique technique :

La problématique technique est due aux contraintes techniques et architecturales qui limitent parfois quelques types d'intervention sur le bâti ancien existant dans la métropole Lilloise.

a.) Les contraintes techniques spécifiques du bâti :

- faible surface des logements nécessitant la mise en œuvre de techniques adaptées d'isolation,
- petite surface des parcelles et forte densité des surfaces bâties ne permettant pas facilement la mise en œuvre d'énergies alternatives,
- faible niveau de confort et existence de pathologies lourdes (hors caractéristiques thermiques) nécessitant des investissements d'amélioration du confort jugés prioritaires.

b.) Les contraintes architecturales et urbaines du fait de l'implantation de cet habitat en zone urbaine entraînant des surcoûts.

La problématique liée à l'occupation :

- Difficultés d'appropriation par les occupants d'équipements sophistiqués,
- Une occupation continue du logement rendant plus difficile une intervention en site occupé.

La problématique financière :

Elle est caractérisée par une capacité d'investissement limitée qu'il s'agisse des propriétaires occupants à faibles revenus mais aussi des propriétaires bailleurs dont les investissements portant sur l'amélioration des performances énergétiques de leur logement ne se traduit pas par un retour sur l'investissement réalisé.

L'un des principaux leviers pour l'amélioration des performances énergétiques des logements existants est d'agir sur l'enveloppe par une isolation efficace et durable.

L'objectif de cette thèse est d'étudier le bâtiment ancien résidentiel dans la ville de Lille et de lui proposer une isolation écologique performante.

Dans le premier chapitre de cette thèse on fera une analyse bibliographique permettant l'insertion de notre problématique dans un contexte plus vaste, celui du bâti ancien et de l'isolation thermique écologique.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des différentes typologies de bâtiments existant dans la ville de Lille, elles peuvent être classées dans trois grandes familles : la maison de courée, la maison de ville et la maison bourgeoise ; on regardera leurs caractéristiques, leurs spécificités, leurs constantes (similarités) et leurs variantes.

Dans le troisième chapitre, on étudiera une paroi caractéristique de ces typologies selon plusieurs méthodes analytiques, numériques et l'intérêt de chacune des méthodes. Un mur expérimental instrumenté sera soumis à différentes sollicitations afin de valider les modèles théoriques présentés. On utilisera tout d'abord la méthode analytique issue de la résolution de l'équation de chaleur et permettant de trouver une équation analytique explicite des variations spatio-temporelles de la température ; cette méthode permettra la détermination des propriétés thermiques du mur à partir des données expérimentales. Dans un deuxième temps on étudiera le transfert thermique dans ce mur en régime harmonique et en régime quelconque. Les résultats théoriques seront confrontés aux résultats expérimentaux.

Dans un quatrième chapitre, les différents matériaux isolants seront caractérisés thermiquement puis appliqués au mur selon différentes configurations (par l'intérieur et l'extérieur) afin de déterminer les avantages et les inconvénients de chaque type d'isolation du point de vue thermique. Ensuite, et après l'étude du critère thermique, on comparera les autres critères (environnementaux, économiques et hygrométriques) pour justifier et consolider le choix du matériau.

Une fois l'étude au niveau de la paroi terminée, on passera à l'échelle du bâtiment dans le cinquième chapitre. Pour chaque typologie on étudiera les consommations énergétiques avant et après isolation à l'aide du logiciel PLEIADES-COMFIE dédié à la Simulation Thermique Dynamique (STD) des bâtiments.

Chapitre I: Analyse bibliographique

I.1 Introduction

Le parc de logements et des bâtiments tertiaires représente environ 3,5 milliards de mètres carrés chauffés se répartissant de la façon suivante : 75% de cette surface est affectée aux logements, le restant au bâtiment tertiaire.

L'énergie est consommée pour les 2/3 dans les logements et pour 1/3 dans les bâtiments tertiaires. La part des émissions de CO₂ suit une répartition identique.

Le secteur des logements en particulier présente un potentiel non négligeable d'économies d'énergie surtout au niveau du chauffage qui constitue une part importante des factures énergétiques en France. Dans cette partie on abordera les dépenses énergétiques dans ce secteur et la notion de confort thermique qui est à la base des consommations liées au chauffage. De plus, on présentera les différentes réglementations thermiques liées à ce secteur en s'attardant sur les exigences thermiques et les labels liés aux bâtiments résidentiels anciens.

Parmi les 16,1 millions de logements construits avant 1975, 9 millions environ l'ont été avant 1948, c'est à dire avant le développement massif de modes de constructions industrialisés.

Une partie de ce parc a pu conserver, grâce à des rénovations respectueuses de ses caractéristiques originelles, une forte valeur patrimoniale. Il constitue alors un témoignage, parfois unique, d'un habitat vernaculaire et d'une conception traditionnelle.

Sa performance thermique est encore mal connue ou de façon parcellaire. Cependant, dispose de qualité thermique intrinsèque (performance thermique et confort d'été) qu'il convient d'étudier pour mieux les prendre en compte et les valoriser par des rénovations adaptées.

I.1.1 Le secteur logement

La contrainte de réduction par 4 des émissions de CO₂ du secteur du bâtiment à l'horizon 2050 fixée par les orientations de la politique énergétique, se traduira par l'obligation d'une diminution par 6 (voir plus) des émissions ramenées au m², compte tenu de l'augmentation du parc de bâtiments et l'augmentation de la surface habitable par habitant qui est passée de 31 m² en 1984 à 40 m² en 2006 [4]. Ceci nécessiterait de parvenir, sur le parc, à une consommation moyenne d'énergie primaire inférieure à 70 kWh par an et par m² chauffé ou climatisé, dont environ 35 kWh pour le chauffage ou la climatisation et la production d'eau chaude sanitaire.

Le nombre de résidences principales en 2050 sera approximativement de 39,449 millions (Figure I-1). Donc, il faudra construire entre 2010 et 2050 plus de 10 millions de logements en France si l'on considère que les logements actuels conserveront leur habitabilité jusqu'en 2050. D'où la nécessité, en plus de prévoir la construction de ces

nouveaux logements, de lancer une campagne de réhabilitation des bâtiments existants afin de les adapter aux conditions de confort et aux modes de vie contemporains, ainsi qu'aux normes relatives à l'électricité, l'incendie, l'évacuation des eaux usées...

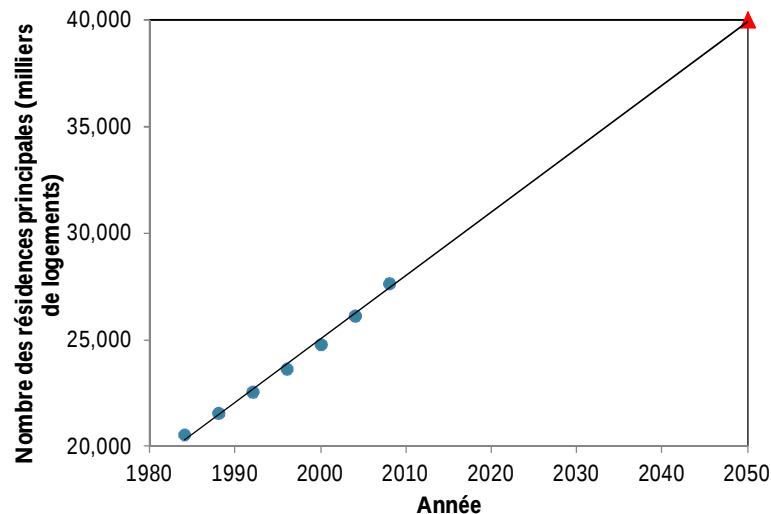


Figure I-1- Nombre de résidences principales en France [4]

D'autre part, la réhabilitation permet aussi de répondre à l'engagement du gouvernement français de diviser par quatre ses émissions entre 2010 et 2050, ce qui est connu sous le nom de « Facteur 4 ». Ainsi, pour atteindre les objectifs fixés, il faut améliorer la performance énergétique aussi bien dans le bâti neuf que dans le bâti existant.

I.1.1.a Dépenses énergétiques

L'énergie consommée pour le chauffage constitue une part importante des factures énergétiques en France (70 %) et notamment à Lille, une ville dans le Nord de la France caractérisée par son climat relativement froid par rapport aux autres villes françaises.

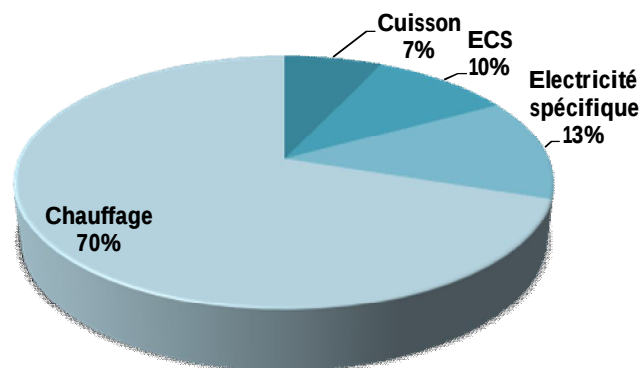


Figure I-2- Part des usages dans la consommation énergétique finale des logements en France [5]

Après la propre peau et les vêtements, l'enveloppe du bâtiment constitue une troisième peau qui joue un rôle important dans le confort thermique des habitants et influe énormément sur leur santé ; d'où la notion de bio construction intégrant à la fois des dimensions de confort thermique, sonore, lumière, qualité d'air intérieur...

Une habitation écologique réussie est le résultat d'un équilibre entre efficacité énergétique et faible impact environnemental, d'un équilibre entre des techniques low-tech se basant sur des processus naturels (apports solaires gratuits, techniques bioclimatiques...), et des compléments high-tech pour optimiser l'autonomie énergétique (chauffage, ventilation, pare-vapeur...).

I.1.1.b Confort thermique

Le confort thermique est un terme vague et ambigu puisque la notion confort en elle-même est subjective et varie entre les individus selon l'âge, le sexe, l'emplacement géographique... A titre d'exemple la zone de confort des Anglais se situe entre 14,5°C et 21°C, celle des Américains entre 20°C et 26°C et celle des habitants des régions tropicales entre 23°C et 29,5°C [6]. Cependant, on peut le définir comme étant un sentiment de bien-être satisfait par l'environnement thermique. Il dépend de 6 paramètres [7]:

- Le métabolisme : c'est la production de chaleur interne permettant de maintenir la température du corps autour de 37°C.
- L'habillement : il représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.
- La température de l'air ambiant : les deux objectifs principaux sont de maintenir la température de l'air intérieur stable face aux écarts de température extérieure, et de créer une certaine homogénéité de température dans l'espace.
- La température des parois : Les parois froides entraînent des déperditions thermiques du corps humains par rayonnement avec ces parois ce qui crée une sensation d'inconfort thermique et oblige à élever la température de l'air pour compenser cet inconfort.
- Les mouvements de l'air : En hiver, la température de l'air intérieur étant inférieure à celle de la peau (33°C), l'air en mouvement permet d'augmenter les déperditions thermiques par convection au niveau de la peau, d'où l'intérêt de diminuer les courants d'air ; au contraire en été on a intérêt à créer des courants d'air pour rafraichir la maison.
- L'humidité relative de l'air : l'humidité est due principalement à l'occupation humaine, l'activité des habitants et l'humidité extérieure. Une ventilation adaptée permet de résoudre ce problème. L'inconfort n'apparaît que pour une humidité relative inférieure à 30% ou supérieure à 70%.

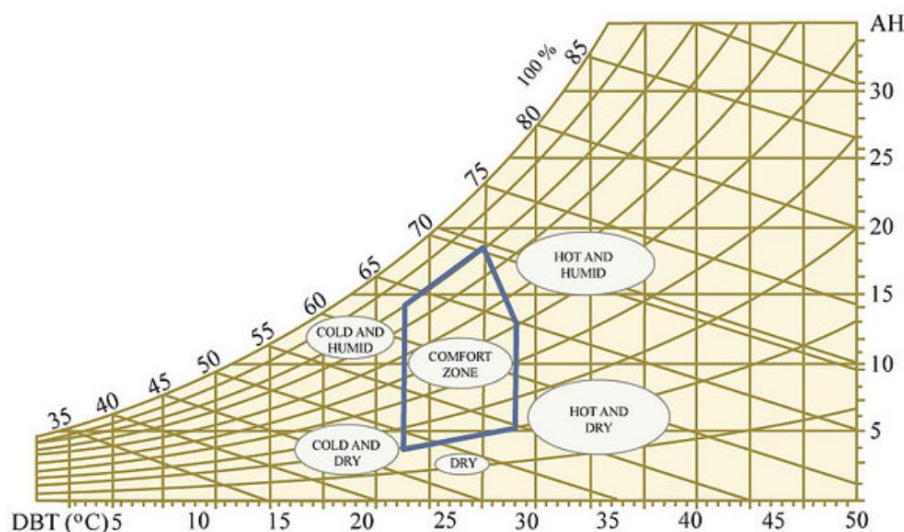


Figure I-3- Plage de confort thermique [8]

Le diagramme représenté dans la Figure I-3 permet de définir une plage de confort température-humidité.

I.1.2 Le cadre réglementaire et les labels

I.1.2.a Evolution de la réglementation thermique française

En 1974, et suite aux chocs pétroliers, la première réglementation thermique apparaît pour les logements neufs ; l'isolation devient alors non seulement une nécessité, mais une obligation à respecter. Depuis 1974, les Pouvoirs Publics n'ont cessé d'ajuster les exigences, au rythme des réglementations thermiques successives : 1982, 1988, 2000, 2005 et 2012.

Dans la réglementation thermique RT 2005 [9], le projet est comparé à un bâtiment de référence qui est le jumeau du projet du point de vue géométrique mais ayant des caractéristiques thermiques de ses composants fixés à une valeur de référence définie réglementairement.

Depuis novembre 2007, la réglementation thermique dans l'existant encadre les travaux que les particuliers entreprennent dans leur logement. Elle n'oblige pas à les réaliser mais fixe des performances à respecter, en particulier pour diminuer les besoins en énergie d'un logement en l'isolant.

Globalement, la RT 2012 ne concerne pas spécifiquement les bâtiments anciens, mais pose de nouveaux objectifs à l'horizon 2020 en termes urbains et paysagers. Ces objectifs concernent donc indirectement le bâti ancien. Le domaine d'application de la RT 2012 ne change pas par rapport à la RT 2005 ; elle ne s'applique donc pas :

- aux constructions provisoires prévues pour une durée d'utilisation de moins de deux ans ;

- aux bâtiments et parties de bâtiment dont la température normale d'utilisation est inférieure ou égale à 12°C ;
- aux bâtiments ou parties de bâtiment chauffés ou refroidis pour un usage dédié à un procédé industriel ;
- aux bâtiments agricoles ou d'élevage ;
- aux bâtiments situés dans les départements d'outre-mer.
- aux bâtiments ou parties de bâtiment destinés à rester ouverts sur l'extérieur en fonctionnement habituel.

Cependant, il existe des différences entre la RT 2005 et la RT 2012 se traduisant par une nouveauté majeure : la conception bioclimatique du logement (accès à l'éclairage naturel, surfaces vitrées orientées au sud...) qui doit pourvoir naturellement à une partie des besoins énergétiques du bâtiment. Les majeures différences entre la RT 2005 et la RT 2012 sont résumées dans le Tableau I-1.

	RT2005	RT2012
Exigences	Bâtiment de référence, $C < C_{ref}$	Abandon du bâtiment de référence, valeur fixée et modulée. $C < C_{max}$
	U_{bat}	$B_{bio} < B_{biomax}$ valeur fixée et modulée
	$T_{ic} < T_{ic\ ref}$	Même système pour le moment.
	Garde fou par composant (enveloppe et système)	Abandon sauf exception (Traitement ponts thermiques ; perméabilité; surface vitrée; facteur solaire; ratio d'ouverture baie)
Type d'usage	16 types d'usage	37 types d'usage (crèche-garderie, cité U,...)
Météo	8 Zones Climatiques	Mêmes zones, fichiers révisés par météo France.

Tableau I-1- Comparaison entre la RT2005 et la RT2012

La réglementation appliquée aux bâtiments existants construits avant 1948 est nommée réglementation thermique « élément par élément ». Lorsqu'un maître d'ouvrage décide de remplacer/installer un élément d'isolation, un équipement de chauffage, de production d'eau chaude, de refroidissement, de ventilation ou un équipement d'éclairage (ce dernier poste ne concerne que les bâtiments tertiaires), il doit installer des produits de performance supérieure aux caractéristiques minimales mentionnées dans l'arrêté du 3 mai 2007.

Les exigences sur les résistances thermique minimales des parois définies par cet arrêté et servant pour les typologies de maisons individuelles anciennes de Lille (zone H1) peuvent être résumées dans le Tableau I-2.

Parois	Résistance thermique minimale (m ² .K/W)
Murs en contact avec l'extérieur et rampants de toitures de pente supérieure à 60°	2,3
Murs en contact avec un volume non chauffé	2
Toitures terrasses	2,5
Planchers de combles perdus	4,5
Rampants de toiture de pente inférieure à 60°	4
Planchers bas donnant sur l'extérieur ou sur un parking collectif	2,3
Planchers bas donnant sur un volume non chauffé	2

Tableau I-2- Exigences sur les résistances thermiques (m².W/K) des parois (RT2005 élément par élément) [10]

I.1.2.b Les labels en France

L'utilisation des labels par les maîtres d'ouvrage est un levier très important pour le développement de technologies innovantes, et en rupture par rapport aux techniques d'usage à l'heure actuelle dans le monde de la construction. Ils sont délivrés dans le cadre d'une certification portant également sur la qualité globale du bâtiment, par des organismes certificateurs privés ayant passé une convention spéciale avec le ministère en charge de la construction, qui les autorise à délivrer ce label.

-Le label « haute performance énergétique rénovation » s'applique uniquement aux bâtiments achevés après le 1er janvier 1948. Il atteste que le bâtiment respecte un niveau de performance énergétique élevé ainsi qu'un niveau minimal de confort en été. C'est aussi un mode de preuve permettant de justifier d'un niveau de consommation d'énergie, qui peut notamment être utilisé pour obtenir des aides comme l'éco-prêt à taux zéro ou l'éco-prêt logement social.

D'après l'arrêté du 29 septembre 2009 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique rénovation », pour les bâtiments à usage d'habitation ce label comporte deux niveaux :

Label	Condition 1	Condition 2
Haute performance énergétique rénovation, HPE rénovation 2009	$E \leq 150(a+b)$	La température intérieure conventionnelle atteinte en été du bâtiment respecte les exigences de l'article 12 de l'arrêté du 13 juin 2008
Bâtiment basse consommation énergétique rénovation, effinergie rénovation 2009	$E \leq 80(a+b)$	La température intérieure conventionnelle atteinte en été du bâtiment respecte les exigences de l'article 12 de l'arrêté du 13 juin 2008

Tableau I-3- Labels pour les bâtiments existants construits avant 1948

E étant la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage et les auxiliaires de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire et de ventilation, telles que définies à l'article 9 de l'arrêté du 13 juin 2008.

Le coefficient a dépend de la zone climatique et b de l'altitude. (Pour le cas de Lille, zone H1a, et altitude moyenne 25m, $a=1,3$ et $b=0$.)

Le label BBC Effinergie Rénovation a été élargi aux logements construits avant 1948, sous la terminologie Effinergie Rénovation, sans pour autant être inscrit dans un arrêté. Si seul le nom affiche une variante, il utilise le même référentiel. Donc au final, les mêmes critères seront demandés pour toutes les maisons anciennes construites depuis plus de 5 ans, mais dans un cas le label est nommé BBC-Effinergie Rénovation (constructions postérieures à 1948) et dans l'autre Effinergie Rénovation (constructions antérieures à 1948).

I.2 Le bâti ancien

Le bâti ancien connaît de plus en plus un regain d'intérêt en tant qu'élément essentiel du parc des logements surtout qu'il constitue une partie non négligeable du parc de logements existants et offre un potentiel d'économies d'énergie important.

Cependant, il faut avoir un certain recul par rapport à ce type de bâtiment avant d'intervenir, surtout qu'il présente des spécificités qui le différencient des bâtiments contemporains d'où la nécessité de bien le comprendre et de connaître les risques et problèmes qui le menacent.

I.2.1 Définition du bâti ancien

La définition propre de bâti ancien varie selon les références : certains considèrent les bâtiments antérieurs à la première réglementation thermique de 1975 comme bâtiments anciens [11], [12], d'autres considèrent les bâtiments anciens comme étant ceux datant d'avant 1948 [13]; cette date correspondant à la date de début de la reconstruction après la deuxième guerre mondiale.

Cependant, il est important de distinguer les constructions d'avant 1948 des autres constructions issues de la reconstruction après la deuxième guerre mondiale et antérieures à la première réglementation thermique. En effet, suite à la deuxième guerre mondiale les gigantesques besoins de reconstruction ont conduit à une logique de reconstruction rapide et à moindre coût. Les problématiques de dépenses énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre ne se posant pas à cette époque, la tendance vers le choix de matériaux reproductibles en grande quantité dominait sur les critères énergétiques, environnementaux et sanitaires. On est passé ainsi d'une architecture qui s'appliquait à prendre en compte l'environnement climatique, utilisant des ressources et des matériaux locaux à une architecture industrialisée, chauffée et éclairée

artificiellement, déconnectée du milieu environnant et employant de nouveaux matériaux manufacturés.

On peut classer le parc de logements français en trois catégories, chacune représentant près du tiers du parc existant avec des performances variables qu'on peut distinguer dans la Figure I-4:

- Les maisons construites avant 1948
- Les maisons construites entre 1948 et 1975
- Les maisons construites après 1975

Le niveau de performance des bâtiments d'avant 1948 est à peu près similaire à celui des immeubles construits selon la réglementation thermique de 2000. Il correspond à l'étiquette énergétique de C à D (de 91 à 230 kWh/m²/an) contre F (331 à 450) pour les bâtiments d'après-guerre et d'avant-choc pétrolier [14]. Cependant, ces valeurs valables pour certains bâtiments à l'échelle nationale, ne sont pas nécessairement valables pour les typologies qui seront étudiées caractérisées par un grand inconfort thermique et des déperditions énergétiques trop élevées.

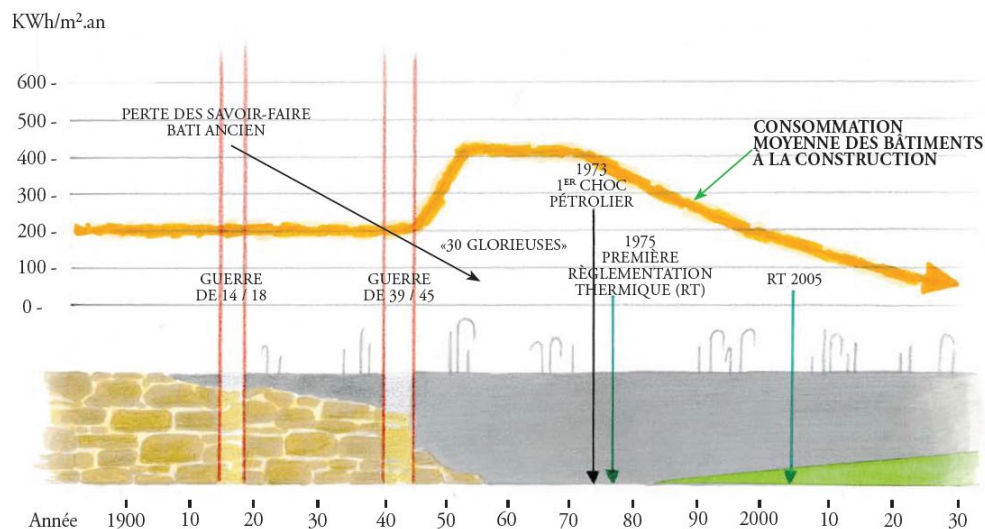


Figure I-4- Consommation énergétique moyennes des bâtiments selon leurs dates de construction [15]

Le graphique ci-dessus montre que les savoir-faire du bâti ancien ont fait de ce bâtiment une entité plus performante que les constructions qui ont suivi, cependant avec l'arrivée du premier choc pétrolier et les réglementations thermiques qui en sont découlées, les performances énergétiques du bâtiment se sont améliorées et devenues inférieures à celles du bâti ancien.

Dans ce qui suit, le terme « bâtiments anciens » fera référence aux bâtiments construits avant 1948.

Il est à noter que les performances du bâti ancien dépendent des exigences thermiques attendues, cependant, il n'est pas très juste de comparer ce type de bâtiments qui a été construit pour répondre à un certain niveau d'exigences de l'époque, aux bâtiments plus récents faits pour répondre aux exigences de confort contemporaines auxquelles nous sommes désormais habitués. En d'autres termes, on ne peut pas s'attendre à ce que la voiture de deux chevaux de 1960 roule à 200 km/h.

De ce fait, et si l'on applique dans le monde du bâtiment le principe de la sélection naturelle qui correspond à un tri des individus les plus aptes à survivre ou à se reproduire, on voit clairement que ces bâtiments sont en risque d'extinction. La mutation de ces bâtiments doit donc avoir lieu afin de les adapter à l'environnement contemporain.

I.2.2 Spécificités du bâti ancien

Le bâti ancien est très diversifié et varie selon les régions vue sa dépendance des conditions géologiques locales, il est constitué de matériaux naturels peu transformés et le plus souvent issus du périmètre proche.

Ce type de bâtiment a des spécificités au niveau du comportement hygrothermique qui le différencient des constructions modernes :

I.2.2.a Interaction avec son environnement

En raison des caractéristiques bioclimatiques (notamment : forte inertie, forme compacte, implantation qui intègre les spécificités du contexte climatique local,...) les bâtiments anciens offrent une possibilité d'une gestion thermique en relation avec le climat extérieur. Les caractéristiques d'implantation du bâti ancien peuvent être distinguées selon le milieu considéré (urbain ou rural, zone climatique).

En milieu urbain ancien, la forme la plus courante est celle de l'îlot fermé, qui s'est développé dans les villes françaises sous l'influence haussmannienne.

Les conditions d'émergence du bâti urbain sont de moins liées à une économie strictement locale que le bâti rural et bénéficient d'un système d'échange marchand de plus en plus étendu et diversifié : approvisionnement de matériaux plus performants, main d'œuvre plus qualifiée, système constructif plus élaboré.

Cette forme urbaine présente plusieurs caractéristiques ayant des conséquences sur le comportement thermique du bâtiment :

- Des masques bâtis ou végétaux : les allées plantées (feuillage caduc) des avenues haussmanniennes limitent les apports solaires en été, du moins pour les étages inférieurs.
- Une mitoyenneté des pignons importante : cette mitoyenneté des constructions permet de réduire les surfaces déperditives du logement.

- Une distinction climatique entre la rue et le cœur d'îlot : des écarts de température sensibles (+ ou - 4°C) sont observés entre ces deux faces de l'immeuble [16].

I.2.2.b Le comportement des occupants

Contrairement aux bâtiments neufs où la contribution de l'occupant à la gestion thermique du bâtiment est faible, le bâti ancien implique les occupants dans la gestion thermique de leur logement. Ainsi, le mode de gestion du chauffage peut suivre le scénario suivant, plusieurs fois recensé auprès des habitants du panel :

- fixer une température de consigne entre 19 et 21°C pendant l'occupation en journée ;
- réduire le chauffage (voire le couper) en période nocturne ou en période d'absence.

Grâce notamment au phénomène d'inertie qui permet de stocker la chaleur (produite par le chauffage ou provenant des apports solaires) puis de la restituer (pendant les périodes sans production), le confort thermique du logement est assuré pendant toute la journée.

En confort thermique d'été également, les caractéristiques bioclimatiques des bâtiments anciens (masques et autres protections solaires, inertie, transversalité du plan,...) permettent à l'occupant de réaliser des gestes simples, favorables au confort :

- rafraîchissement naturel du logement pendant la nuit par ouverture des fenêtres;
- fermeture de tous les volets la journée en période d'inoccupation (afin de limiter les apports solaires) ;
- fermeture des fenêtres en journée (afin de conserver la fraîcheur emmagasinée dans le logement).

I.2.2.c Mode constructif particulier

Les modes constructifs anciens sont très divers selon la région, le climat, les techniques et les procédés locaux, et apportent tous une réponse spécifique aux exigences climatiques locales. Cependant, ces bâtiments présentent aussi des ressemblances au niveau de leur mode constructif [16]:

- Ils sont compacts : Ces formes compactes limitent naturellement les surfaces d'échange avec l'extérieur et favorisent donc le comportement d'hiver ;
- Ils ont une structure lourde : le système structurel du bâti ancien multiplie généralement des maçonneries porteuses lourdes ayant une forte inertie thermique, répartie entre façades et refends intérieurs ;
- Leurs planchers sont en bois relativement isolants.

I.2.2.d Grande inertie thermique

La présence d'éléments lourds à l'intérieur des constructions anciennes (refends en brique ou en pierre, planchers lourds...) favorise le phénomène d'inertie thermique. L'inertie intervient dès lors que les excitations d'un système sont variables dans le temps. Plus l'inertie d'une paroi est élevée, plus celle-ci est capable de stocker et de restituer des quantités importantes de chaleur en hiver ou de fraîcheur en été, plus elle met de temps à s'échauffer ou à se refroidir.

Ce phénomène d'inertie est essentiel en été mais également en hiver ou en demi-saison.

En été, le phénomène d'inertie mesuré sur les bâtiments du panel permet d'obtenir un décalage des courbes de température entre l'intérieur et l'extérieur. Grâce à ce déphasage, le bâtiment conserve des conditions de confort d'été très satisfaisantes, tout au long de la journée.

- -En hiver, il permet de stocker et de réguler les apports gratuits dont bénéficie éventuellement le logement. Il autorise également une gestion intermittente du système de chauffage. Ainsi, en période d'absence, alors que le chauffage peut être réduit, les éléments inertes diffusent la chaleur emmagasinée et permettent de conserver une température de confort satisfaisante.

- En mi-saison, le phénomène d'inertie saisonnière (accumulation de la chaleur de la saison précédente) associé aux apports gratuits permet de retarder la mise en route du système de chauffage.

I.2.2.e Sensibilité à l'humidité

Dans les constructions modernes les parois sont généralement étanches. Leurs fondations et les matériaux qui les constituent sont secs et protégés de l'humidité. Les matériaux sont homogènes et juxtaposés.

Dans les constructions anciennes, les parois possèdent souvent une forte sensibilité à l'humidité due à la nature même des matériaux employés et aux dispositifs constructifs spécifiques (comme l'absence de systèmes d'évacuations des eaux pluviales) ; on dit que les parois de bâti ancien sont respirantes.

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

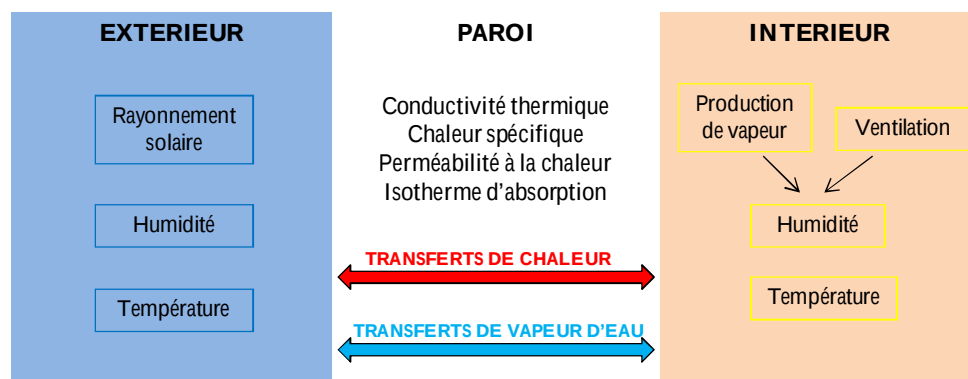


Figure I-5- Phénomènes physiques dans les parois respirantes [17]

Face à cette grande sensibilité à l'eau, le phénomène de respiration de l'enveloppe est très important dans le bâti ancien. Une grande attention doit alors être portée sur les enduits (extérieurs et intérieurs).

L'humidité ayant pénétré dans la paroi doit pouvoir s'évacuer vers l'extérieur, sous forme liquide ou vapeur d'eau, sous peine de s'accumuler dans le mur et d'engendrer des pathologies [16].

I.2.3 Risques et problèmes

Le bâti ancien est durable : les constructions anciennes ont franchi les siècles (la durée de vie moyenne d'un bâtiment aujourd'hui est estimée aujourd'hui par le CSTB à 75 ans), parfois sans véritable entretien; leur durabilité doit être appréciée à cette échelle de temps.

Les techniques et savoir-faire applicables sur les constructions neuves ne sont pas nécessairement applicables sur le bâti ancien qui présente une nature complexe et une stabilité délicate qu'il importe de maintenir ; il ne faut pas donc se précipiter quand il s'agit de travaux sur un bâti ancien.

Avant de faire n'importe quelle intervention il faut tout d'abord se rassurer qu'elle permette l'amélioration du confort des occupants, la réduction des consommations d'énergie, la contribution à la pérennité du bâtiment, la mise en œuvre de choix respectueux pour l'environnement et le respect de la valeur patrimoniale du bâti. Parmi les risques les plus fréquents rencontrés dans les bâtiments anciens on cite les risques liés à l'humidité, les pathologies structurelles, l'effet de la paroi froide et les ponts thermiques :

I.2.3.a Humidité

La présence d'humidité dans de nombreuses maisons traditionnelles peut les rendre insalubres en contaminant tout ce qui s'y trouve (meubles, vêtements, livres, provisions...). L'humidité affecte aussi les matériaux de construction en les dégradant,

remettant ainsi en cause la pérennité de la maison. L'humidité a de plus une incidence sur le confort thermique : les parois humides saturées d'eau perdent leur capacité isolante et deviennent plus déperditives.

Les problèmes d'humidité dans les résidences se produisent généralement dans les saisons où la température extérieure et la pression de vapeur sont faibles et qu'il y a beaucoup de sources de vapeur à l'intérieur (cuisson, le blanchiment du linge, la douche, la respiration, la transpiration, les machines à laver et sèche-linge, le lave-vaisselle...). Toutes ces sources se combinent pour faire qu'à l'intérieur la pression de vapeur soit beaucoup plus élevée qu'à l'extérieur et que la vapeur a tendance à migrer vers l'extérieur grâce à l'enveloppe du bâtiment. On distingue cinq sources d'humidité dans le bâtiment [18] :

- Les précipitations dont une partie peut s'infiltrer à travers le revêtement extérieur.
- L'eau en provenance du sol qui s'infiltre par capillarité à travers les fondations.
- L'humidité accidentelle (fuites de canalisations, défaut des gouttières...)
- L'humidité contenue dans les matériaux (bétons, mortiers, bois...)
- La vapeur d'eau présente dans l'air susceptible de se condenser dans les parois.

Certains procédés contemporains pour améliorer les performances thermiques de ces murs anciens peuvent conduire à des aberrations. En effet, si les échanges de masse sont perturbés ils peuvent être la cause de graves désordres hygrométriques.

I.2.3.b Pathologies structurelles

Le bâti ancien tend vers l'accroissement de sa vulnérabilité non seulement pour l'insuffisance de son entretien, mais surtout à causes des mauvaises interventions qui tendent à le fragiliser.

Par exemple, le rez-de-chaussée qui servait autrefois d'étable ou de remise et possédait des ouvertures basses et étroites, est aujourd'hui déstabilisé et affaibli par les grandes percées qui ont été réalisées pour les besoins d'un commerce ou de garage.

Généralement, les structures maçonnées sont soumises à plusieurs facteurs extérieurs et intérieurs qui les rendent vulnérables. Le temps, l'espace (lieu, environnement...) et les matériaux de construction sont parmi les facteurs déterminants pour la survie de ces structures.

La structure est souvent soumise à un danger susceptible de constituer une menace pour sa stabilité d'ensemble ou celle de l'un de ses constituants structuraux [19].

Les pathologies dans le bâti ancien peuvent être dues aux agressions du milieu environnant (l'eau, l'humidité, le gonflement et le retrait du sol...) ainsi qu'au vieillissement et au manque d'entretien.

Les principales formes pathologiques possibles dans le bâti ancien sont les fissures : Il s'agit en effet d'un défaut classique présent quasiment dans toutes les structures. Les fissures les plus graves sont dues à une instabilité de la structure (désordres et déformations dans les éléments porteurs de la structure : murs, poutres et planchers) ou à une instabilité du terrain. La fissuration peut aussi être due aux dilatations et rétrécissements successifs des matériaux du bâtiment sous l'effet de la température et l'humidité. Ces déformations peuvent atteindre quelques mm/m dans certains cas extrêmes ce qui pourrait nuire à la structure [20].

I.2.3.c Effet de la paroi froide

Les parois froides entraînent des déperditions thermiques du corps humain par rayonnement avec ces parois ce qui crée une sensation d'inconfort thermique et oblige à élever la température de l'air pour compenser cet inconfort.

La température ressentie peut être calculée approximativement en fonction de la température des parois et la température de l'air par la formule suivante [6] :

$$T_{\text{ressentie}} \approx \frac{T_{\text{air moyenne}} + T_{\text{paroi moyenne}}}{2} \quad (\text{I-1})$$

I.2.3.d Ponts thermiques

Un pont thermique est une zone ponctuelle ou linéaire qui, dans l'enveloppe d'un bâtiment, présente une variation de résistance thermique (à la jonction de deux parois en général). Un pont thermique est créé s'il y a changement de la géométrie de l'enveloppe ou s'il y a changement de matériaux et ou de résistance thermique [21], [22]. Il existe deux types de ponts thermiques :

-Les ponts thermiques linéiques ψ : Ils sont caractérisés par un coefficient linéique ψ exprimé en W/(m.K). La déperdition en W/K à travers un pont thermique linéaire se calcule en multipliant le coefficient linéique par son linéaire exprimé en mètre.

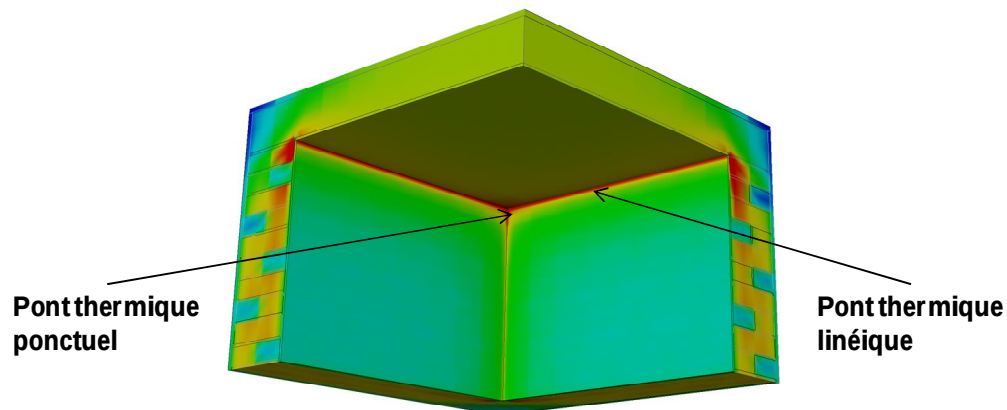


Figure I-6- Exemple de ponts thermiques linéiques et ponctuel

-Les ponts thermiques ponctuels χ : Ils sont caractérisés par un coefficient ponctuel χ exprimé en W/K. Le coefficient ponctuel exprime la déperdition en W/K à travers le pont thermique en question.

Les ponts thermiques sont la conséquence d'une conception inadéquate entraînant des discontinuités de l'isolation ou aussi la conséquence d'erreurs d'exécutions. Outre les déperditions thermiques, les ponts thermiques peuvent entraîner des problèmes de condensation. Au niveau des ponts thermiques la température de la surface intérieure est plus basse que celle des éléments environnants. L'air intérieur, arrivé à ces endroits, se refroidit et la température qu'il atteint au voisinage de ces surfaces peut se trouver en dessous du point de rosée, ce qui provoque la condensation au niveau de ces surfaces (Figure I-7).

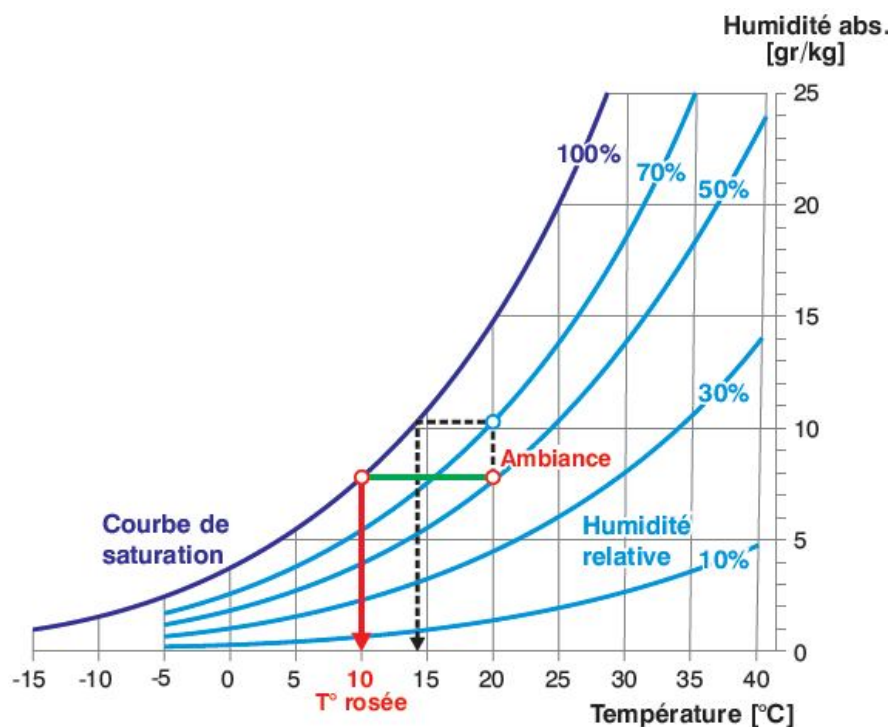


Figure I-7- Diagramme de Mollier et condensation [23]

L'accumulation d'humidité pourrait être un terrain propice pour la formation de moisissures si les conditions suivantes sont réunies : quantité d'oxygène suffisante, température entre 5°C et 25°C et fond nourissant approprié (sucres, graisse, cellulose...). Une isolation performante doit donc traiter les ponts thermiques de sorte à ne pas créer des discontinuités dans l'isolation et adopter des techniques d'isolations permettant d'empêcher la création d'éventuelles déperditions thermiques linéiques ou ponctuelles dans l'enveloppe.

I.2.4 Réhabilitation et rénovation

De manière générale, la rénovation d'un bâtiment ancien concorde avec l'apparition de désordres graves, tels que des fuites dans la toiture, des fissures dans les façades dégradées, ou des moisissures à l'intérieur. La rénovation intervient donc souvent trop tard et de manière trop ponctuelle, sans faire réflexion globale cherchant à croître la durée de vie des différents éléments de construction, augmenter le confort, améliorer le climat ambiant, réduire les nuisances sonores, faire une bonne sélection des matériaux de construction, réduire les frais énergétiques et les charges...

La réhabilitation se distingue de la rénovation par le fait que la réhabilitation concerne des travaux extrêmement lourds, notamment de gros œuvre, tandis que la rénovation consiste à remettre en état un logement sans intervention majeure sur le gros œuvre [12].

I.3 L'isolation thermique

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. On retrouve de l'isolation thermique dans divers secteurs (bâtiment, industrie, automobile...).

L'isolation d'un bâtiment permet de diminuer les échanges de chaleur entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur, et ainsi diminuer les besoins de chauffage et, le cas échéant, de climatisation. Elle concerne principalement l'isolation des murs extérieurs, du toit, et du plancher bas ; avec des différentes techniques de mise en œuvre pour chaque cas. On s'intéressera dans la suite à l'isolation des murs extérieurs qui présentent une complexité dans l'abord et surtout dans le bâti ancien. On présentera ensuite les différents types d'isolants connus sur le marché puis on introduira la notion d'isolant écologique.

I.3.1 Généralités

Le mot isolation vient du latin insula, « île » avec le sens de « séparé ». Depuis l'antiquité les êtres humains ont démontré la nécessité de protection contre la rudesse du climat, ils se sont servis de matières organiques comme prototype naturel pour l'isolation thermique. Les exemples comprennent les fourrures des animaux, les plumes des oiseaux, le coton, la paille. Depuis des milliers d'années les maisons ont été conçues pour être le mieux adaptées au climat de leur emplacement, dans les climats froids on se contentait d'une zone chaude dans la maison constituée par la pièce à vivre autour du feu. Cependant il a fallu attendre l'avènement de la révolution industrielle de la fin du XIX^e siècle pour voir naître l'application commerciale de la thermique des isolants à grande échelle. Outre le rôle structural et protecteur, les parois d'un bâtiment sont une interface entre un climat extérieur en fluctuation et une ambiance intérieure souhaitée la plus proche possible des conditions de confort [6], [23].

De nos jours, avec les contraintes imposées par le changement climatique et la hausse du prix d'énergie dans le monde, l'isolation thermique devient de plus en plus une nécessité.

En effet, l'isolation thermique permet de réduire les déperditions (ou gains) thermiques à travers les parois et donc les besoins de chauffage (ou de refroidissement), donc les factures énergétiques qui en découlent. De plus l'isolation permet d'améliorer le confort thermique à l'intérieur des maisons.

Un bon isolant est un matériau de faible densité ayant :

- le moins de contact possible entre les particules pour diminuer la conduction ;
- des cellules poreuses les plus petites que possibles pour empêcher le mouvement de l'air dans le matériau et par suite la convection
- et le plus grand nombre de pores possible pour diminuer le rayonnement dans le matériau.

Par définition, on appelle isolant thermique un matériau ayant une résistance thermique $R \geq 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ et une conductivité thermique $\lambda \leq 0,065 \text{ W/m.K}$ [6].

I.3.2 L'isolation thermique des murs extérieurs

Les murs extérieurs sont probablement les parois les plus complexes à aborder quand il s'agit d'améliorer leur qualité thermique [18]:

- Ils constituent de grandes surfaces en contact avec l'extérieur.
- Ils jouent généralement un rôle structurel important.
- Ils sont couramment percés de baies.
- La dynamique de leur comportement hygrothermique est complexe (capacité thermique, transfert et stockage d'humidité...) et doit être considérée pour assurer le confort et éviter les désordres.
- Les prescriptions urbanistiques et patrimoniales restreignent les possibilités d'intervention.

Un mur extérieur existant peut être isolé principalement de deux façons, de l'intérieur et de l'extérieur. Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients de l'isolation par l'intérieur par rapport à l'isolation par l'extérieur :

Avantages	Inconvénients
-Aspect extérieur maintenu -Réalisation sans échafaudages -Grande diversité de choix au niveau des isolants -Chantier à l'abri des intempéries -Réalisation possible pièce par pièce : phasage du chantier et des dépenses -Moindre coût par rapport à l'isolation par l'extérieur -Pas de permis d'urbanisme à introduire -Pas de gêne occasionnée pour les occupants au cours de la réalisation des travaux d'isolation	-Diminution de la surface habitable -Finitions intérieures (et éventuellement installations électriques ou de chauffage) à déplacer ou remplacer -Augmentation des sollicitations hygrothermiques dans le mur : risque de condensation interne, de gel, de dilatations de la maçonnerie et d'efflorescences de sels -Ponts thermiques difficiles à résoudre : risque de condensation superficielle et de formation de moisissures -Diminution de l'inertie thermique: risque de surchauffe

Tableau I-4- Avantages et inconvénients de l'isolation par l'intérieur [18]

Bien que l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) apparaisse comme « la solution la moins bonne » à cause de ses inconvénients et des risques hygrothermiques et mécaniques qu'elle engendre, elle représente souvent la seule solution possible en rénovation. En effet, en France l'isolation par l'intérieur est souvent choisie en rénovation, d'une part parce que l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) n'est pas adaptée au bâti ancien pour des raisons de qualité architecturale, d'autre part, parce que l'isolant placé par l'extérieur constitue une emprise sur l'espace public qui n'est pas toujours autorisée [18].

I.3.3 Les différents types d'isolants

Les isolants peuvent être classés dans des familles selon leurs origines ; on distingue les familles suivantes [6], [24], [25]:

I.3.3.a Les isolants synthétiques

Ces matériaux, fréquemment utilisés en raison de leur excellent pouvoir isolant, sont obtenus après transformation du pétrole brut et ont une empreinte environnementale élevée durant le processus de production. Les isolants synthétiques sont des matériaux d'isolation thermique, les principaux isolants synthétiques sont le polystyrène extrudé, le polystyrène expansé et le polyuréthane.

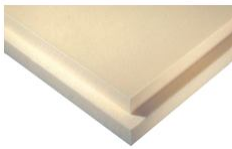
<u>-Le polystyrène expansé :</u> ce matériau est fabriqué à partir d'hydrocarbures expansés à la vapeur d'eau et au pentane. En vrac (billes) ou panneaux, il est très employé pour son coût assez bas et sa mise en œuvre aisée, mais il reste incompatible avec une approche écologique (mauvais bilan carbone, énergie grise élevée, matière première limitée, difficilement recyclable). De plus, son comportement en cas d'incendie fait de lui un matériau non conseillé à l'intérieur du bâtiment.	
<u>-Le polystyrène extrudé :</u> La résistance mécanique élevée de ce matériau en panneaux le destine à être utilisé dans le cas des isolations enterrées sous forte charge (dalle, toiture terrasse...).	
<u>-Les polyuréthanes :</u> Les mousses de polyuréthanes (PUR) sont des mousses dures peu compressibles et ayant de bonnes qualités isolantes. Elles sont largement employées pour leurs qualités mécaniques et leur fort pouvoir isolant. Cependant, elles sont polluantes, dangereuses, et totalement incompatibles avec une approche écologique.	

Tableau I-5- Les isolants synthétiques

I.3.3.b Les isolants minéraux

Ces isolants sont issus de matières premières minérales (silice, argile, roches volcaniques...) qui sont généralement transformées en fibres fines, rouleaux, panneaux ou granules en leur incorporant des additifs. Bien que les matières premières soient souvent abondantes, les processus de fabrication basés sur la cuisson à haute température sont énergivores et producteurs de CO₂. Les caractéristiques des matériaux dépendent de leur texturation et leur densité. Le recyclage des matériaux dépend de la nature des produits et des additifs utilisés.

<u>-Les laines minérales :</u> Les laines de verre et de roche sont les plus utilisées dans le bâtiment ; les laines de verres sont obtenues à partir de la fusion de sable siliceux et/ou de verre recyclé, tandis que les laines de roche sont obtenues à partir de roches volcaniques (basalte). Elles existent en panneaux, rouleaux ou en vrac et sont utilisées dans toutes les situations qui ne nécessitent pas une forte résistance à la compression. Les laines minérales ne sont pas un bon choix en construction écologique.	
---	---

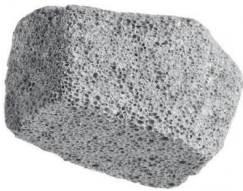
<u>-Le verre cellulaire :</u> il est obtenu à partir des matières premières de verre fondues à haute température auxquelles est ajoutée de la poudre de carbone. Ce matériau est résistant au feu et à l'humidité et est incompressible. Compte tenu de sa haute qualité technique, il peut parfois apporter des solutions ponctuelles en éco construction (milieu humide et/ou à forte contrainte mécanique), cependant son coût élevé et bilan environnemental médiocre défavorisent son utilisation.	
<u>-La perlite et la vermiculite expansées :</u> elles sont fabriquées à partir de roches chauffées à haute température et se présentent sous forme de granules. Leur médiocre bilan environnemental limite leur utilisation aux cas où leurs qualités spécifiques sont nécessaires (fluidité pour le remplissage d'espaces étroits).	

Tableau I-6- Les isolants minéraux

I.3.3.c Les isolants végétaux

Ces isolants sont les plus couramment employés en construction écologique et leur utilisation est en croissance rapide vus les avantages qu'ils présentent : ce sont des matériaux renouvelables et à faible impact environnemental pouvant être produits localement à partir de matière première peu chère et ne présentent pas de dangers sanitaires pour les habitants.

<u>-Les fibres de bois :</u> Elles sont obtenues par défibrage de chutes de bois résineux et existent en vrac ou sous forme de panneaux de diverses densités. Leur bilan carbone est très bon et leur énergie grise varie de moyenne à élevée selon la densité du produit. Ce matériau présente de nombreuses qualités : matière première renouvelable, réutilisable ou valorisable en fin de vie, bon régulateur hygroscopique, bonne stabilité dans le temps, bonne contribution au confort d'été et bonnes performances phoniques.	
<u>-Le liège :</u> Il provient de l'écorce du chêne-liège qui pousse dans les régions méditerranéennes. Il présente d'excellentes qualités techniques mais son prix relativement élevé et la limitation de la ressource incitent à le réserver aux emplois pour lesquels les autres isolants «écologiques» sont techniquement inadaptés (isolation enterrée ou en sols).	

<u>-Le chanvre :</u> Le chanvre est une plante donnant des fibres qui peuvent être utilisées en vrac (chènevotte en vrac) ou en panneaux ou rouleaux (laine de chanvre). Il se caractérise par son caractère putrescible en cas d'humidité prolongée, ses performances acoustiques intéressantes et sa réutilisation ou valorisation en fin de vie. Son excellent bilan environnemental fait de lui un exemple de l'éco construction.	
<u>-Le lin :</u> La France est aujourd'hui le premier producteur mondial de lin. En vrac ou en panneaux semi-rigides, le lin est un matériau à bon bilan environnemental ayant un bilan carbone neutre et une énergie grise moyenne à élevée selon la densité. Comme le chanvre, il se caractérise par son caractère putrescible en cas d'humidité prolongée, ses performances acoustiques intéressantes et sa réutilisation ou valorisation en fin de vie.	
<u>-Les pailles :</u> Conditionnées en petites bottes, elles possèdent un excellent bilan environnemental et un faible coût. Cependant les grandes épaisseurs de ces isolants restent un des verrous majeurs de leur utilisation surtout en réhabilitation.	
<u>-Les roseaux :</u> Ils sont utilisés depuis la préhistoire comme isolants thermiques. Ces matériaux se caractérisent par leur résistance à l'humidité, leur très bonne durabilité, leur inflammabilité (nécessité d'un parement coupe-feu), un très bon bilan carbone et une très faible énergie grise.	

Tableau I-7- Les isolants végétaux

I.3.3.d Les isolants issus du recyclage

La récupération des déchets (papiers, tissus et autres...) grâce à un système mieux organisé de collectes sélectives permet aujourd'hui la création de véritables filières organisées pour ces types d'isolants. Les isolants les plus courants de cette catégorie sont :

-<u>La ouate de cellulose</u> : Issue du recyclage du papier et se trouve sous forme de panneaux, rouleaux, elle est parmi les matériaux d'isolation présentant les meilleurs performances environnementales avec le moindre coût. La ouate de cellulose est traitée au sel de bore pour la rendre résistante au feu et insensible aux champignons ; cependant, ce matériau peut entraîner nausées, irritations cutanées, essoufflement, maux de tête et de graves lésions des organes. Ses principales caractéristiques sont sa bonne stabilité, sa bonne contribution au confort d'été, ses performances acoustiques intéressantes, ses performances en tant que régulateur hygrothermique, son très bon bilan carbone et son énergie grise faible pour le vrac mais élevée pour les panneaux.	
-<u>Le textile recyclé (Métisse)</u> : l'isolant est produit à base des vêtements non réutilisables. Il est composé de 70 % de coton, 15 % de laine et acrylique, et 15 % de fibres polyester. Il possède un bon rapport performance/impact écologique/prix. Disponible sous forme de rouleaux ou panneaux semi-rigides, le textile recyclé est issu de la transformation des tissus usagés. Sensible au feu, non consommable par les rongeurs, performant acoustiquement et bon régulateur hygrothermique, il peut être recyclable ou réutilisable en fin de vie.	

Tableau I-8- Les isolants issus du recyclage

I.3.3.e Les isolants d'origine animale

En théorie, tous les poils et plumes des animaux pourraient être utilisés comme isolants ; cependant, dans le contexte économique, la ressource doit être suffisamment abondante et organisée. C'est le cas de laine de mouton et des plumes de canards :

-<u>La laine de mouton</u> : En vrac, rouleaux ou panneaux semi-rigides, la laine de mouton est un isolant à faible empreinte environnementale. Elle peut absorber 33% de son poids de vapeur d'eau ce qui fait d'elle un excellent régulateur hygroscopique, elle est sensible au feu, non consommable par les rongeurs et offre des performances acoustiques intéressantes. Sa durabilité est assurée par les antimites.	
---	---

-Les plumes de canard : Cet isolant se compose de 70% de plumes, 10% de laine de mouton et 20% de fibres thermo-fusibles. Entièrement recyclable et renouvelable, il est issu d'un produit non valorisé et consomme très peu d'énergie lors de sa fabrication. Les performances de ce matériau à long terme sont méconnues vu le manque d'expérience concernant ce matériau.



Tableau I-9- Les isolants d'origine animale

I.3.4 L'isolation écologique

Il n'existe pas de définition officielle d'un matériau écologique cependant il existe quelques critères qui permettent de qualifier un isolant comme écologique :

- la réduction efficace des consommations énergétiques : pour être concurrent et meilleur que les autres isolants classiques, un isolant écologique doit avoir un bon pouvoir isolant et des caractéristiques thermiques lui permettant de réduire efficacement les consommations liées au chauffage et/ou à la climatisation.
- la durabilité : si en théorie tous les matériaux ont une durabilité assurée, les conditions de vie dans l'ouvrage les soumettent souvent à des conditions non planifiées (tassement, détérioration par les rongeurs, insectes, humidité...)
- l'aspect sanitaire : un isolant écologique n'est pas nocif pour la santé, il ne va pas dégager de substances chimiques ou allergisantes.
- la faible empreinte écologique : un isolant écologique peut être recyclé ou réutilisé, il est issu de ressources renouvelables, et ne contient pas de matériaux nocifs pour l'environnement.

On peut définir les matériaux écologiques suivant différentes approches :

- Une approche « ingénierale » ou industrielle basée sur les principes de l'éco-conception de produits et services, permettant d'introduire les éco-produits comme étant la résultante de démarches scientifiques de caractérisation d'impacts (analyses en cycle de vie) et de conception de produits qui intègrent l'environnement en amont (éco-design).
- Une approche « négativiste » de non reconnaissance de la thématique, en tout cas dans le secteur de la construction.
- Une approche solidaire de type « économique » issue du mouvement des technologies alternatives et de la « green economy », en considérant un minimum d'emplois directs et indirects à proximité des zones de chantier.
- Une approche purement environnementaliste de type « écologiste », qui considère les matériaux écologiques comme étant des matériaux naturels qui ont peu ou pas subi des transformations de leur état primaire brut (bois, paille, terre...)

- Une approche de type « pragmatique », synthèse des approches 1-3-4, basée sur l'accessibilité d'une information pertinente mais vulgarisée pour la cible «client» [26].

I.3.5 La certification des isolants

La nécessité d'économiser l'énergie a entraîné un développement considérable de l'emploi des isolants dans le bâtiment en même temps qu'une grande diversification de ces emplois et de la gamme de produits mis à la disposition des utilisateurs.

L'économie générale de la construction implique un choix judicieux mais difficile, afin d'éviter l'emploi de produits non adaptés, pour une application.

La certification ACERMI (Association pour la CERTification des Matériaux Isolants) place la concurrence entre produits sur des bases techniques communes, permet aux utilisateurs d'exercer leur choix de façon simple et dans les conditions optimales d'économie et leur apporte sans vérification de leur part l'assurance que le produit certifié possède les caractéristiques annoncées.

Pour choisir le produit isolant selon son application dans l'ouvrage, la certification ACERMI comporte les niveaux de caractéristiques selon les normes européennes ou selon le classement ISOLE qui donne l'aptitude à l'emploi du produit [24].

I Propriétés mécaniques en compression avec 5 niveaux : I1 à I5

S Comportement aux mouvements différentiels avec 5 niveaux : S1 à S5.

O Comportement à l'eau avec 3 niveaux : O1 à O3.

L Propriétés mécaniques utiles en cohésion et flexion avec 4 niveaux : L1 à L4.

E Perméance à la vapeur d'eau avec 5 niveaux : E1 à E5.

Le profil d'usage ISOLE et la résistance thermique RD indiqués sur l'étiquette informative du produit, permettent de les comparer aux valeurs minimales requises pour l'emploi d'un isolant dans un usage spécifique [27].

I.4 Critères de choix d'un isolant performant

Un isolant performant doit répondre à un cahier de charge qui impose des critères hygrothermiques (faible épaisseur, bonne réaction à l'humidité et bonne inertie thermique) ainsi que d'autres critères environnementaux et sanitaires, acoustiques et économiques. L'isolant doit être aussi adapté et être mis en œuvre de façon simple et efficace.

I.4.1 Critères hygrothermiques

I.4.1.a Epaisseur minimale

Dans les maisons lilloises où le prix du mètre carré vaut plus de 2700 Euros, la surface habitable a une valeur précieuse, l'épaisseur devient donc un indicateur primordial dans le choix de l'isolant. De plus, les contraintes spatiales dans certains cas exigent une faible épaisseur d'isolant surtout dans les maisons de courées ayant une faible surface d'où l'intérêt de ce critère.

A titre d'exemple, l'isolation par l'intérieur d'une maison de 100 m² (10 x 10) sans mitoyenneté par 10 cm d'isolant aboutit à une perte de 4 m². Or l'épaisseur de l'isolant dépend de 2 facteurs, la résistance finale recherchée et la conductivité thermique de l'isolant, comme le montre la formule ci-dessous :

$$e_{(isolant)} = (R_{finale} - R_{initiale}) \times \lambda_{isol}$$

Pour une résistance thermique fixée, l'isolant le plus mince est donc celui qui a la plus faible conductivité ; or, parmi les isolants thermiques de types fibreux, les conductivités thermiques des matériaux à l'état sec sont très voisines [0,035 à 0,045 W/m.K], ce qui réduit l'importance de ce critère par rapport aux autres critères dans le choix du matériau isolant.

I.4.1.b Réaction à l'humidité

Les isolants sont des matériaux poreux ayant la capacité de contenir et d'échanger de l'humidité (stockage) selon les conditions ambiantes dans lesquelles ils sont plongés.

La teneur volumique en eau d'un matériau évolue principalement en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle il est plongé. Elle est notée « w » et s'exprime en kg/m³ (ou en % de masse). A 0 % d'humidité relative elle est toujours égale à 0 kg/m³ et elle évolue doucement jusqu'à 80 % ou 90 %, voire plus selon les matériaux (leur composition, leur porosité...). ; c'est la zone hygroscopique, où l'eau est principalement adsorbée. Au-delà de cette humidité relative, et jusqu'à la saturation (100 %), on entre dans la zone capillaire. La teneur volumique en eau augmente alors beaucoup plus vite et peut atteindre des valeurs élevées. À 100 % d'humidité relative, on atteint la « saturation libre » (w_r), où les pores du matériau ne sont pas encore forcément complètement remplis d'eau. La teneur en eau peut encore augmenter si le matériau est plongé dans l'eau : longtemps, sous vide ou sous pression. C'est la « sursaturation ».

En pratique, il est assez rare d'atteindre la teneur en eau maximale (w_{max}) où tous les pores sont remplis d'eau. Les illustrations ci-dessous expriment ces notions [18].

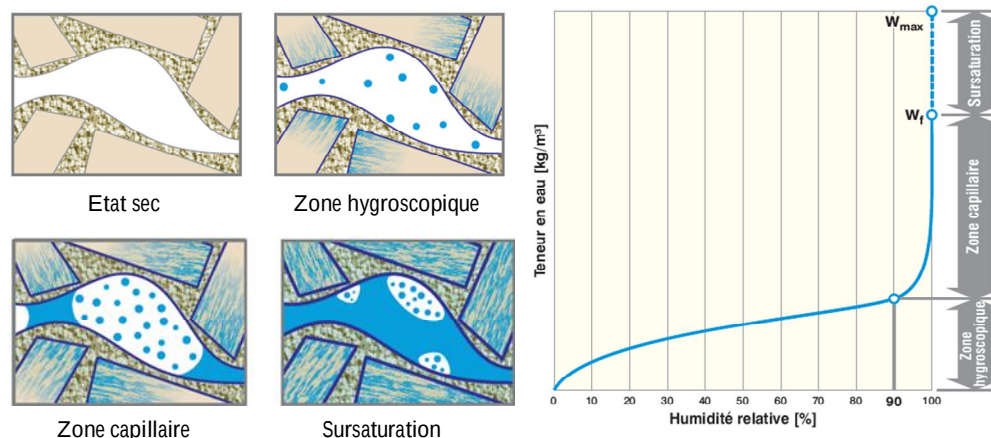


Figure I-8- Teneur en eau et courbe de rétention d'humidité [18]

La teneur en eau est représentée par des courbes d'équilibre dans des conditions isothermes (les isothermes d'adsorption désorption) permettant de caractériser l'aptitude au stockage de chaque matériau. Ces courbes sont essentielles pour évaluer la sensibilité des matériaux à l'eau, surtout que l'eau liquide ayant une conductivité thermique trente fois supérieure à celle de l'air sec immobile ($\lambda_{\text{eau}} = 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_{\text{air}} = 0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), sa présence au sein du milieu poreux modifie la conductivité thermique globale du matériau [28].

I.4.1.c Inertie thermique

Un système d'isolation par l'intérieur rend la masse thermique du mur existant inaccessible aux échanges avec l'intérieur ; en effet, ce sont les premiers centimètres de matériaux qui ont le plus d'effet sur l'inertie. En diminuant l'inertie des locaux, le risque de surchauffe augmente. La réduction de l'inertie peut être atténuée en étant attentif à garder la masse thermique des parois intérieures accessibles, en choisissant judicieusement les matériaux et en adaptant la stratégie de ventilation : sur-ventilation durant la nuit et ouverture des fenêtres permettant de rafraîchir la température ambiante et de conserver l'air frais pendant la journée.

Dans les cas où l'occupation est continue et où l'on cherche à garantir une température homogène, il est utile de valoriser la masse thermique des parois intérieures, comme les dalles lourdes ou les murs intérieurs en maçonnerie, pour garantir un niveau d'inertie suffisant au local malgré la pose d'une isolation par l'intérieur. Les parois exposées au rayonnement direct du soleil sont celles qui ont le plus d'impact à ce niveau-là : le sol près des fenêtres, les cloisons intérieures directement exposées...

Le choix des matériaux peut avoir un effet important sur l'inertie thermique des locaux. Selon leur capacité thermique, leur effusivité et leur diffusivité, les matériaux ont des comportements différents face au rayonnement solaire et à la chaleur. L'inertie d'un local peut être améliorée en privilégiant des isolants et les finitions dont la diffusivité est

basse et l'effusivité relativement élevée (enduits à l'argile, à la chaux, mélange chaux-chanvre).

Les matériaux à base de fibres organiques semblent avoir des caractéristiques particulières du point de vue de l'inertie thermique. Les échanges d'humidité entre la paroi et l'ambiance intérieure peuvent provoquer des effets thermiques de chaleur latente non négligeables.

I.4.2 Autres critères

I.4.2.a Critères environnementaux et sanitaires

Les dix catégories d'impacts environnementaux identifiées comme pertinentes et indispensables pour évaluer la contribution de tous les produits de construction à la qualité environnementale de l'ouvrage sont les suivantes:

- la consommation de ressources énergétiques
- l'indicateur épuisement de ressources naturelles
- la consommation d'eau
- la production de déchets solides
- le changement de climat
- l'acidification atmosphérique
- la pollution de l'air
- la pollution de l'eau
- la destruction de la couche d'ozone
- la formation d'ozone photochimique

D'où la nécessité d'une approche multicritère pour évaluer l'impact environnemental d'un produit de construction.

Depuis le 6 décembre 2004, INIES (INformation sur les Impacts Environnementaux et Sanitaires) est la base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction. Elle regroupe des Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES) des produits de construction fournis par les fabricants.

Un risque sanitaire est défini comme étant le croisement d'un danger potentiel, lié directement ou indirectement aux activités de l'homme, et d'une exposition de ce dernier, pouvant représenter une nuisance pour sa propre santé. Il s'agit ici de toxicité humaine, c'est à dire d'expositions possibles à des polluants (composés organiques volatils, radon, fibres, microorganismes, odeurs) pouvant être inhalés ou avalés. Notons que la laine de verre et la laine de roche sont aujourd'hui majoritairement employés dans l'isolation des murs et des toitures bien que les microfibres qui les constituent

représentent un danger potentiel lors de la pose et la dépose sur chantier, et aussi pour les habitants si ces laines ne sont pas enfermées dans des emballages hermétiques [29].

Les risques sanitaires se distinguent des impacts environnementaux par le fait qu'ils sont très souvent circonscrits à des échelles relativement locales, pour le moment, alors que les impacts environnementaux peuvent être à la fois très localisés, mais également très diffus [30].

I.4.2.b Performances acoustiques

L'oreille humaine est sensible aux sons dont les fréquences sont comprises entre 16 Hz et 20000 Hz.

L'acoustique du bâtiment ne considère que l'intervalle 50 Hz à 5000 Hz, partagé en bandes d'octave (chaque fréquence est le double de la précédente)

Le niveau sonore est exprimé sur cette échelle en décibels (dB).

Le niveau d'intensité acoustique est défini par : $L = 10 \log (I / I_0)$ en décibel (dB)

$I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ étant l'intensité acoustique de référence (ou seuil d'audibilité)

0 dB est le seuil d'audibilité, en dessous duquel l'oreille humaine ne perçoit plus rien. Un niveau sonore de 140 dB est le seuil de la douleur.

Transmission par une paroi (indice R) : La performance des éléments surfaciques (parois opaques telles que murs de façades et toitures, fenêtres...) s'exprime par un indice d'affaiblissement acoustique R, mesuré en laboratoire selon la norme EN ISO 140 par bandes de fréquences entre les valeurs 100 et 3150 Hz, chaque bande étant de 1/3 d'octave (16 valeurs).

Parmi les isolants thermiques connus sur le marché il existe des matériaux qui ont un intérêt acoustique et d'autres dont les performances acoustiques sont faibles. Parmi les meilleurs isolants acoustiques on cite la laine de verre, la laine de roche, la laine de mouton, la ouate de cellulose, la laine de chanvre, la laine de lin et le polyester recyclé [31].

I.4.2.c Prix

Le prix est parmi les critères les plus importants dans le choix de l'isolant. Ce facteur fluctue en fonction du temps selon les conditions du marché ; à titre d'exemple les matériaux qualifiés d'écologiques voient leurs prix baisser ces dernières années.

La comparaison des prix est délicate ; l'unité de référence pour la comparaison doit être choisie judicieusement : certains utilisent le volume, d'autres la masse, d'autres fixent une résistance cible à atteindre et comparent les prix du m^2 d'isolant. Il est à noter que les coûts des travaux s'ajoutent aux prix des isolants, donc il faut prendre ce critère en considération puisque certains isolants moins chers que d'autres nécessitent des travaux de mise en œuvre plus importants et donc des coûts supplémentaires.

I.5 Synthèse des travaux sur la réhabilitation des bâtiments anciens

L'étude des performances thermiques du bâtiment ancien est un sujet d'actualité, les préoccupations sont d'améliorer les performances thermiques du bâtiment neuf en premier lieu et d'acquérir une expérience dans les techniques et les solutions possibles. Cependant, et afin de répondre aux exigences de consommations énergétiques à l'échelle nationale, des études de performances énergétiques de bâtiments anciens commencent à voir le jour surtout, ces dix dernières années. Plusieurs études sur les bâtiments anciens ont été réalisées à l'échelle nationale.

« Maisons Paysannes de France » est une association ayant pour but de promouvoir la maison paysanne traditionnelle, en favorisant son entretien et sa restauration tout en respectant l'identité propre de chaque région et dans l'esprit de sauvegarder son caractère écologique. Elle participe à la maîtrise d'œuvre de plusieurs projets visant la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment ancien et notamment les projets BATAN [16] et ATHEBA [15]:

- BATAN (BATiments ANciens) est une étude scientifique qui consiste à relever les consommations énergétiques en lien avec le comportement de la construction ancienne et celui des habitants. Elle a pour objectif d'étudier les phénomènes physiques qui caractérisent le comportement thermique du bâti ancien en ayant une approche typologique et une campagne d'instrumentation in situ approfondie afin d'élaborer un nouveau modèle de calcul adapté à ces typologies et d'identifier les réels enjeux en termes de réhabilitation énergétique.

Dans un premier temps, un panel d'étude comportant 10 bâtiments anciens et un bâtiment de référence contemporain a été défini. Afin d'illustrer au mieux les divers modes constructifs régionaux, les logements retenus suivent une répartition géographique qui permet de couvrir l'habitat vernaculaire le plus répandu avec des critères de sélection définis avec l'association Maisons Paysannes de France (Figure I-9). Ensuite des données sont recueillies pour chaque bâtiment, elles concernent l'environnement et l'implantation, l'organisation intérieure, le mode constructif, l'enveloppe, les ouvertures, les équipements techniques et les occupants. Enfin, des simulations thermiques sont faites à l'aide de trois logiciels (3CL, ClimaWin et ECPRO).

Les résultats montrent un écart important entre les consommations réelles et les consommations simulées pour tous les bâtiments anciens du panel ; à l'inverse, pour le logement témoin, les consommations simulées se rapprochent beaucoup plus des consommations réelles.

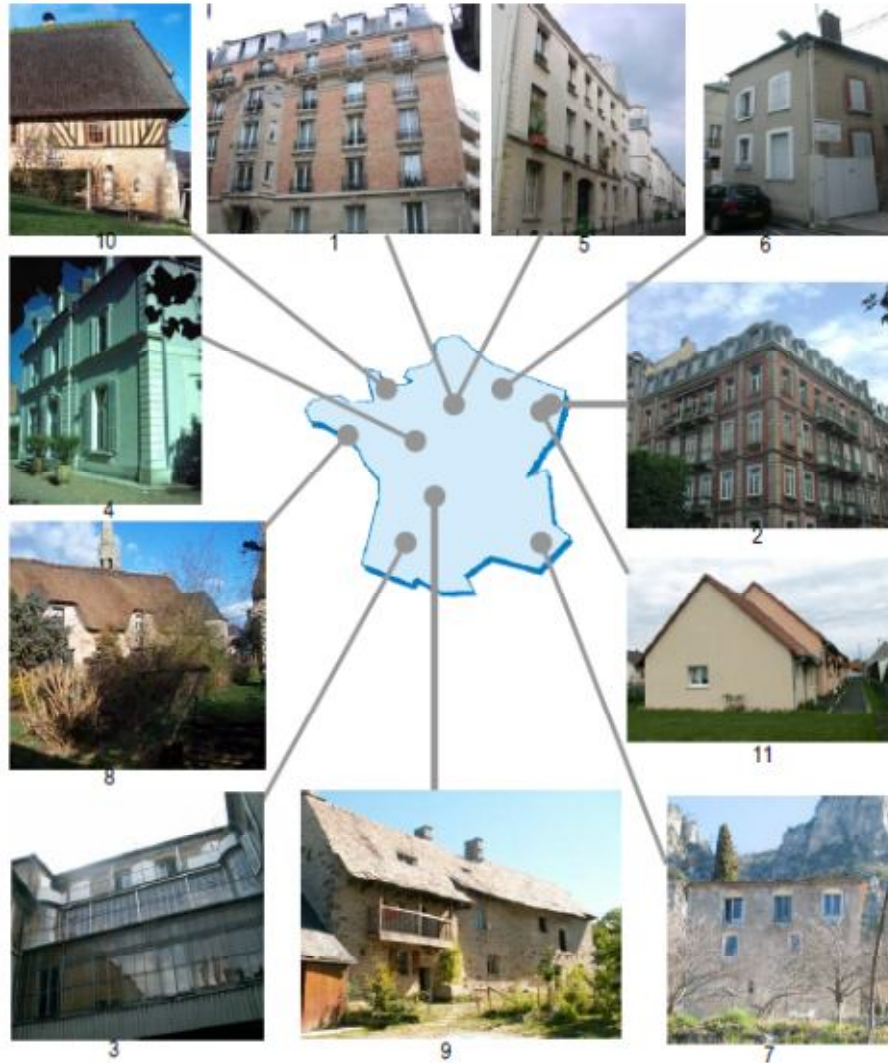


Figure I-9- Répartition géographique du panel d'étude [16]

Cette difficulté générale de modélisation du comportement des bâtiments anciens peut s'expliquer par plusieurs phénomènes : en effet, les bâtiments anciens ont un comportement thermique dynamique en forte corrélation avec les variations extérieures ; en plus les modèles de calcul utilisés présentent certains manquements quant à la prise en compte des nombreuses caractéristiques spécifiques du bâti ancien (modes constructifs, organisation spatiale, modes d'occupation et de chauffage, propriétés particulières des matériaux anciens dont l'inertie).

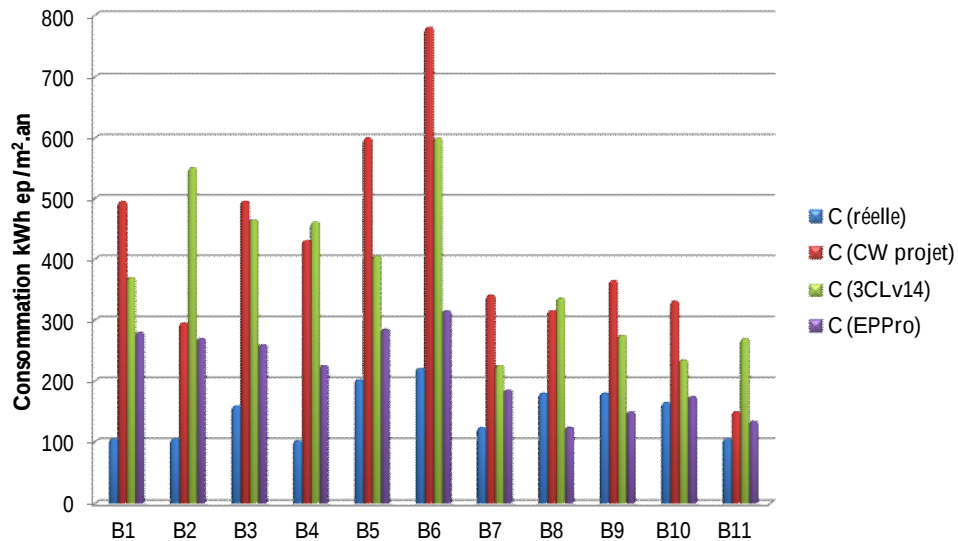


Figure I-10- Comparaison entre les consommations réelles et les consommations simulées [16]

-ATHEBA est un projet visant à Diffuser les connaissances sur le sujet de l'Amélioration THERmique des Bâtiments Anciens Via des « fiches conseils » à destination du grand public.



Figure I-11- Comparaison entre le fonctionnement hygrométrique d'un mur ancien non isolé et celui d'un mur isolé [15]

Il comprend 13 fiches classées en trois catégories : Les trois premières concernent la compréhension du bâti ancien et ses spécificités thermiques et hygrométriques.

Ensuite, la quatrième concerne les politiques publiques en vigueur, les obligations et aides, et les DPE.

	BATIMENTS NEUFS	BATIMENTS EXISTANTS	
	Je construis	Je fais des travaux	Je mets en vente ou en location
REGLEMENTER	Etudes de faisabilité RT (neuf)	RT existant "par élément" RT existant "globale"	_____
SENSIBILISER	DPE construction	_____	DPE vente DPE location
INCITER	Labels HPE (neuf) Bonus de COS Aides financières	Labels HPE rénovation Bonus de COS Aides financières	_____

Figure I-12- Différents dispositifs mis en place pour réduire les consommations énergétiques des bâtiments [15]

Finalement, les neuf dernières fiches concernent les interventions à réaliser et celles à éviter, notamment au niveau de la ventilation, le chauffage, les abords, les murs, les ouvertures, les planchers et l'organisation de l'espace.

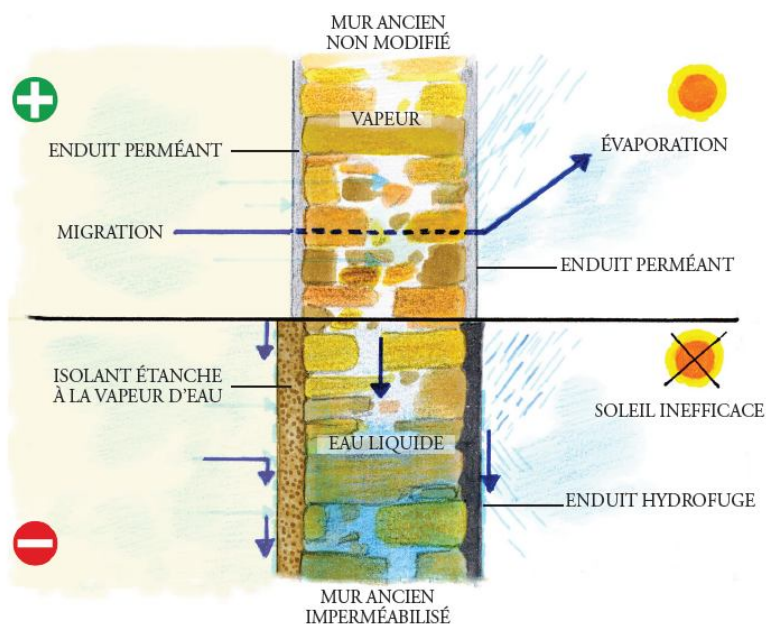


Figure I-13- Bonnes et mauvaises interventions sur les murs anciens [15]

D'autres études et ouvrages traitent le sujet de la maison ancienne et sa réhabilitation d'un point de vue général et plutôt structural qu'énergétique en s'intéressant aux différentes causes de pathologies dans ces bâtiments et les bonnes interventions qui peuvent être faites [32], [20].

L'isolation des murs anciens en brique est traitée dans le guide ISOLIN [18] qui présente les risques majeurs liés à l'isolation par l'intérieur et propose des stratégies de

conception et de réalisation d'isolation par l'intérieur. Les murs des logements wallons sont des murs massifs en briques pleines semblables aux murs que l'on peut trouver dans les maisons anciennes lilloises. A la fin du guide un outil a été développé afin de permettre aux concepteurs d'un système d'isolation par l'intérieur de faire un choix raisonné en tenant compte des risques liés à une configuration particulière en analysant tant les phénomènes de stockage et de et de transfert de chaleur que ceux liés à l'humidité.

De plus, Le projet URPACT [33], financé par l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise d'Energie) et la Région Nord-Pas-de-Calais, concerne la création d'un outil à usage des professionnels des PACT de la région qui permet de simuler différents scénarios de réhabilitation de l'habitat dans une perspective d'amélioration du confort, de pérennité, et des performances environnementales et énergétiques du logement. Cet outil prendra en compte les caractéristiques techniques et thermiques du bâti, le coût global de la réhabilitation (coûts d'investissement, de fonctionnement, de maintenance), mais aussi les modes de vie des habitants et leur capacité d'évolution.

L'enjeu est d'améliorer de façon significative la performance énergétique et le confort du parc privé (non institutionnel) ancien ouvrier par la mise au point d'outils de sensibilisation à destination des occupants destinés à favoriser le bon usage des équipements et le développement d'éco-gestes d'une part, et la création d'outils d'aides à la décision facilement utilisables par les professionnels dans leurs missions de préconisations de projets de réhabilitation et de choix de travaux auprès des propriétaires bailleurs ou occupants d'autre part.

L'enjeu est de faire des propositions et de démontrer leur bien fondé au travers de propositions sur trois typologies de logements (courée, ouvrière et ville) du Nord-Pas de Calais. En d'autres termes, il s'agit de concevoir et d'expérimenter des outils de diagnostic et de simulation et de formuler des précisions en vue d'engager de manière massive des travaux de rénovation énergétique dans l'habitat ouvrier de la région Nord Pas de Calais.

Les livrables de ce projet sont les suivants :

- la présentation d'un outil et d'une démarche de diagnostic détaillant les matériels de mesure, les grilles de collecte des informations techniques et sur les occupants, les procédures à respecter pour les mesures et la collecte des informations ;
- la présentation d'un outil de simulation comportant un énoncé des principes (croisement types de scenario, caractéristiques du bâti, comportement des occupants des logements...) et le modèle statistique permettant la simulation des résultats en terme d'énergie consommée à partir des données issues du diagnostic et du choix des scenarios ;
- un livret d'information et de sensibilisation des occupants des logements sur les attitudes à adopter pour réaliser des économies d'énergie ;

- un document présentant une analyse des enjeux et des préconisations en vue de l'amélioration de la performance énergétique de l'habitat ouvrier en tenant compte des spécificités (formes du bâti, niveau de ressources des propriétaires et/ou des locataires...), et ce, notamment grâce à un rapport synthétisant les différents scénarios de réhabilitation.

Dans ce chapitre, on a analysé le contexte et les enjeux de la problématique énergétique des bâtiments anciens. Après une présentation du secteur logement, son contexte énergétique, et son cadre réglementaire en insistant sur le bâti ancien défini comme étant celui construit avant 1948. On a présenté ses spécificités et les risques et problèmes auxquels il est assujéti. On a présenté aussi les différents isolants usuels pour les critères de choix d'un isolant. Enfin, on a synthétisé les principaux travaux sur la réhabilitation thermique des maisons anciennes, notamment le projet BATAN, le projet ATHEBA et le projet URPACT.

Notre travail s'inscrit dans cette même optique avec une approche thermique plus élaborée. Après une analyse typologique des maisons anciennes lilloises, on étudiera de façon approfondie le transfert thermique dans un mur en brique caractéristique de ces typologies. Ensuite on comparera cinq différents matériaux isolants afin d'identifier la configuration et le(s) matériau(x) le(s) plus intéressant(s). Enfin on fera des simulations thermiques dynamiques à l'échelle du bâtiment pour les différentes typologies dans le but de valider les résultats obtenus à l'échelle du mur, de comparer les performances énergétiques des différentes typologies et de quantifier les économies d'énergie possibles pour différents bouquets de travaux d'isolation pour ces typologies.

Chapitre II: Typologie de bâtiments à Lille

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on cherche à classer les maisons anciennes de la ville de Lille en diverses familles typologiques permettant ainsi d'identifier leurs ressemblances et leurs variantes et de faire un choix adéquat de types représentatifs de la région Nord-Pas-de-Calais dont les performances énergétiques seront étudiées dans le dernier chapitre.

Ce chapitre commence par une étude de contexte dans laquelle on fait un aperçu historique de la période durant laquelle le bâti étudié fut construit et on analyse le parc de logements existants à Lille. Ensuite, une étude bibliographique des différentes études typologiques des habitats de la région nous permet de ressortir notre propre typologie formée de quatre grandes familles de maisons anciennes : la maison de courée, la maison ouvrière, la maison de ville et la maison bourgeoise. On souligne aussi les variantes dans ces typologies et les constantes, entre autres entre autres les murs extérieurs en briques d'épaisseur 34 cm identiques pour les différentes typologies.

On conclut ce chapitre avec les spécificités architecturales et les limites d'évolution de ce type de bâti d'une part, et les spécificités énergétiques et notamment la précarité énergétique.

II.2 Présentation du contexte Lillois

II.2.1 Aperçu historique

Pour bien comprendre le bâtiment ancien à Lille, il faut tout d'abord revoir l'époque et les circonstances dans lesquelles il a été bâti.

Le mot Lille en flamand signifie île en français ; or, vue la situation géographique de Lille (au Nord-ouest les anglais, au nord-est les germaniques, au sud les français et à l'est les belges), les Lillois n'ont jamais été isolés dans leur « île » à l'abri des grands courants politiques, économiques et culturels. Lille partage avec Strasbourg la particularité d'avoir été rattachée tardivement à la France.

A la fin du XIX^e siècle la main d'œuvre était abondante et peu chère. Toute la famille allait travailler si elle le pouvait. Les enfants sont mis à l'usine à l'âge de 12 ans, où ils œuvreaient comme les femmes dix heures par jour contre douze pour les hommes [34].

Dû à cette forte immigration, les ouvriers n'avaient pas de quoi se loger dans des conditions décentes, ils habitaient des courées indigentes et insalubres.

La ville de Lille connut cependant au XIX^e siècle de grandes transformations visant à lui donner le visage d'une cité moderne. Le mouvement s'amorça en 1858 quand toutes les autorités sont convaincues que Lille étouffe dans son enceinte.

Durant la première guerre mondiale, Lille a subi un bombardement intensif de la part des Allemands. En octobre 1914, 900 maisons furent détruites et Lille tomba aux mains des impériaux [34].

Après la guerre, les Lillois commencèrent à reconstruire leur cité et, si possible, de l'embellir encore. L'esprit bâtisseur inspira nettement les actions des deux maires des années 20 et 30, Delory et Salengro, les nouveaux quartiers commencent alors à se densifier.

En 1940, la guerre à nouveau surprit les bâtisseurs lillois en plein effort de reconstruction... Après la guerre, la reconstruction économique allait pouvoir s'engager. Après 1945, le caractère agreste de Lille disparut nettement (des 18 fermes existants encore en 1911, 7 subsistaient en 1953). Dix ans après la libération, Lille était encore bien industrialisée : sur les 88000 actifs, les textiles employaient 14000, la métallurgie et la mécanique 6500 et le bâtiment 6000 [34].

Cette population ouvrière du XXe siècle fut sans doute aussi nécessaire que celle du siècle précédent. Ce fut surtout pour elle que l'on s'attacha à faire disparaître les courées pour les remplacer par un habitat social vertical.

Ce nouveau type de logements gagna les faubourgs et la banlieue où l'on relogea nombre de vieux Lillois.

Aujourd'hui, Lille s'étale sur 34,83 km² et compte plus de 225000 habitants sur une altitude moyenne de 25 m [35], elle est située dans le nord de la France, au centre du département du Nord (59) et à proximité de la Belgique.

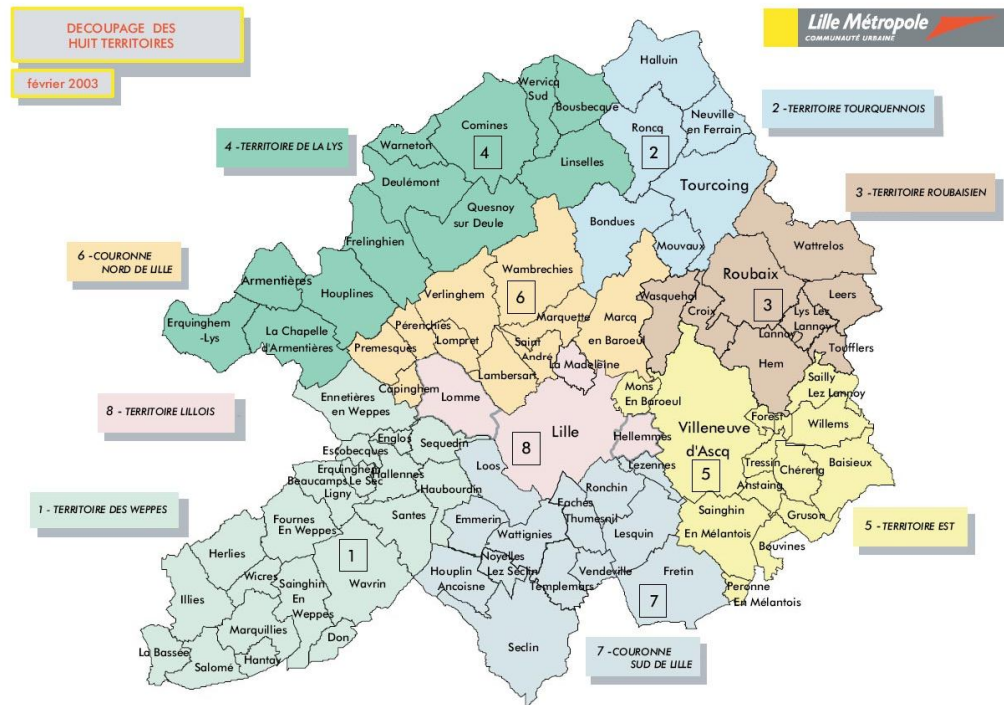


Figure II-1- Carte de Lille Métropole [35]

II.2.2 Analyse du parc de logements existants à Lille

II.2.2.a Occupation du parc de logements à Lille

Parmi les logements recensés à Lille, près de 86% sont des résidences principales, 13% des logements vacants et 1% des logements secondaires [4].

Les maisons individuelles constituent près de 69% du parc de logements dans le département du Nord, contre 56% en France métropolitaine [4] ; ceci montre l'importance que constitue la maison individuelle dans le Nord par rapport aux autres départements Français.

Les personnes isolées (vivant seules) de moins de 30 ans habitent essentiellement en locatif. En locatif privé (70%) pour la plupart, les autres en locatif HLM (22%). Très peu sont propriétaires occupants (6,8%) [36].

Les jeunes couples sont encore pour beaucoup en locatif (77%), mais déjà 21% sont propriétaires. Aussitôt qu'ils ont des enfants, la propriété occupante devient le statut dominant: 56% pour les plus jeunes jusqu'à 73% pour les plus âgés. 24% des jeunes couples avec enfants habitent encore en HLM, mais ils ne sont plus que 17% lorsque les enfants ont grandi. Le parc locatif privé finit par ne jouer qu'un rôle marginal dans l'accueil de ce type de ménages (9% pour les plus âgés). A partir de 65 ans, on observe un regain d'attractivité pour le parc HLM (23%) qui se confirme et s'amplifie au-delà de 80 ans (28%) alors que la part du parc locatif privé reste faible (9%, puis 11%) pour les ménages âgés [36].

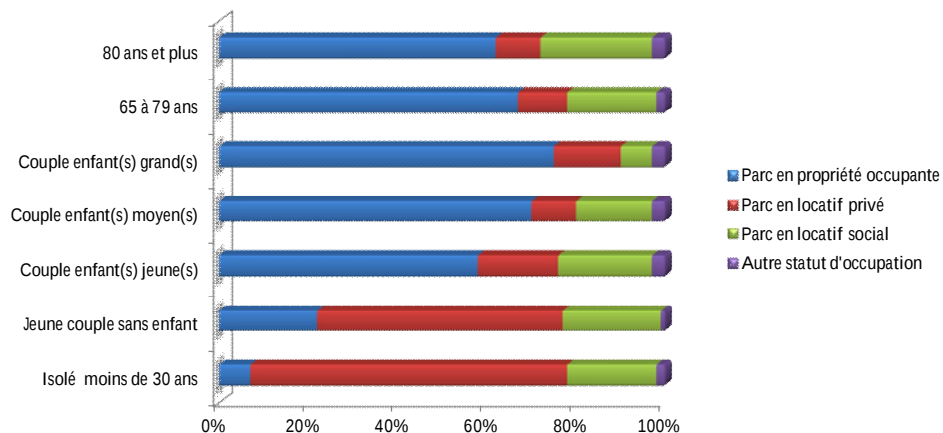


Figure II-2- Distribution des types d'occupations par tranches d'âge dans la métropole lilloise [36]

II.2.2.b Précarité énergétique du parc de logements anciens à Lille

Plus de la moitié des logements privés ont été construits avant 1948 [37]. L'importance des dépenses d'énergie pour le logement est fortement liée à l'âge du logement en Nord-Pas-de-Calais comme pour l'ensemble de la France métropolitaine : plus de 20% des ménages vivant dans un logement construit avant 1948 sont en précarité énergétique alors qu'ils sont moins de 8% parmi les ménages habitant dans un logement achevé

après 1989 [38]. Ainsi, dans la région, les logements construits avant 1948 sont proportionnellement plus nombreux qu'en moyenne nationale et représentent ainsi plus de la moitié des logements habités par des ménages en précarité énergétique. C'est pourquoi, avec ses partenaires, la Ville de Lille a mis en place une politique volontariste en faveur de l'amélioration des conditions de vie dans l'habitat ancien.

En partant du constat que 30% des déperditions d'une maison non ou mal isolée s'effectuent par la toiture, 25% par les façades, 13 % par les vitres [39], une étude a été réalisée par Mr. Thierry Thieffry par thermographie aérienne sur la ville de Lille sur le parc de logements lillois existants, selon le type de logement (immeuble ou maison individuelle) et la date de construction [40]. Son étude confirme aussi que les logements existants construits avant 1948 constituent près de 50% du parc (Figure II-3) et que les constructions anciennes et surtout celles construites avant 1948 constituent la plus grande part des constructions précaires énergétiquement (Figure II-4).

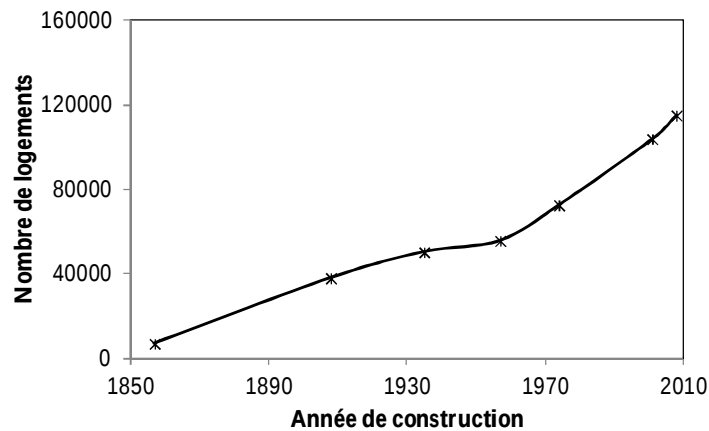


Figure II-3- Effectifs cumulés des logements existants à Lille par année de construction [40]

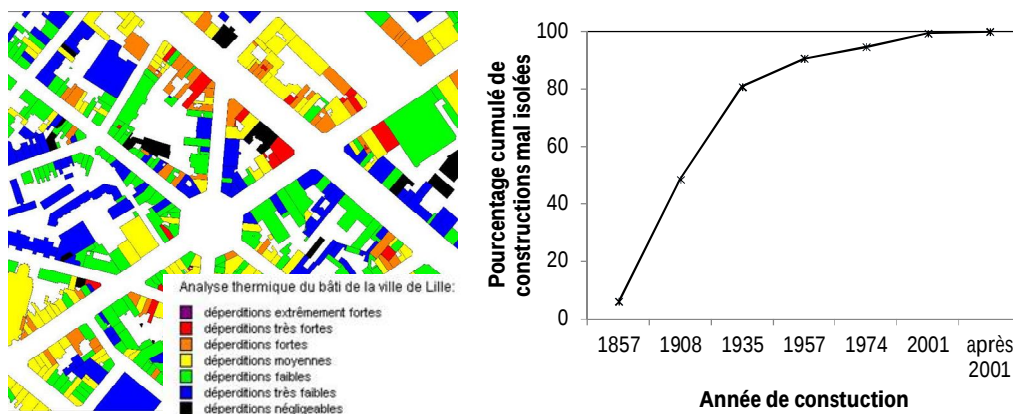


Figure II-4- Habitat mal isolé cumulé à Lille en pourcentage par année de construction [40]

Ces études nous amènent tout d'abord à nous rendre compte du cachet historique de la ville qu'il faudra préserver. En plus, montrent bien l'importance et le potentiel d'économies d'énergie qu'offrent les maisons individuelles anciennes à l'échelle de la ville de Lille.

II.3 Aperçu bibliographique sur les typologies du bâti ancien au Nord

Le bâti urbain de Lille s'inscrit dans un contexte régional qui présente une homogénéité exceptionnelle d'où l'intérêt de le classer sous forme typologique et d'aborder l'étude détaillée de chaque type.

II.3.1 Généralités sur les typologies

Une méthode d'approche du bâti ancien consiste à mettre en évidence les différents types de maisons et à les classer en ensembles homogènes. Cette méthode est particulièrement adaptée à la région du Nord où les maisons se distinguent par leur remarquable cohésion dans leur distribution et dans leur système constructif.

On passe d'un type à un autre en ajoutant une ou plusieurs fonctions supplémentaires.

La classification du bâti ancien par type se révèle être une méthode efficace pour pouvoir proposer des solutions de réhabilitation ; en effet, elle permet de dégager les caractéristiques structurelles et fonctionnelles des différents types dont on peut déduire les capacités d'évolution et de généraliser des expériences particulières de réhabilitation à un type ou une famille de types.

Une typologie de bâtiments est un ensemble de bâtiments choisis parce qu'ils sont très communs dans le pays considéré. Les bâtiments types définis peuvent être utiles dans plusieurs applications [41], [42]:

- pour évaluer les potentiels d'économie d'énergie possibles par l'application de mesures de rénovation.
- pour faire une évaluation énergétique des différents types de bâtiments.
- pour modéliser la performance énergétique du parc immobilier à l'échelle locale, régionale ou nationale.

Les critères de sélection de types de bâtiments peuvent être la date de construction, le nombre de niveaux, la morphologie extérieure, le nombre de pièces...

II.3.2 Etudes déjà faites sur le parc Lillois

Plusieurs études sont faites sur les typologies des habitations anciennes à Lille selon différentes approches.

Dans l'étude « Morphologie, structure urbaine et typologie de l'habitat » [43], l'habitat de la métropole lilloise est divisé en sept grandes familles : l'habitat discontinu individuel,

l'habitat discontinu collectif, l'habitat continu individuel, l'habitat continu collectif, l'habitat hétérogène (de type lotissement) individuel, l'habitat hétérogène collectif, et les cas particuliers. Ces sept familles sont divisées en sous-familles selon l'année de construction et le nombre de niveaux.

L'étude « Patrimoine Urbain Remarquable du Nord – Typologies » [44] divise les édifices du département du Nord en trois catégories : les édifices liés à l'habitat, les édifices liés à l'activité (édifices industriels, commerciaux et tertiaires), et les équipements du territoire urbain (bâtiments religieux, scolaires sportifs, culturels, médicaux, administratifs...). L'habitat lui-même est divisé en quatre familles qui sont la maison de ville, la grande demeure, la maison de cité et l'habitat collectif. Le passage d'une typologie à une autre se fait en faisant varier le nombre de travées ou de niveaux ou en ajoutant une surélévation au rez-de-chaussée.

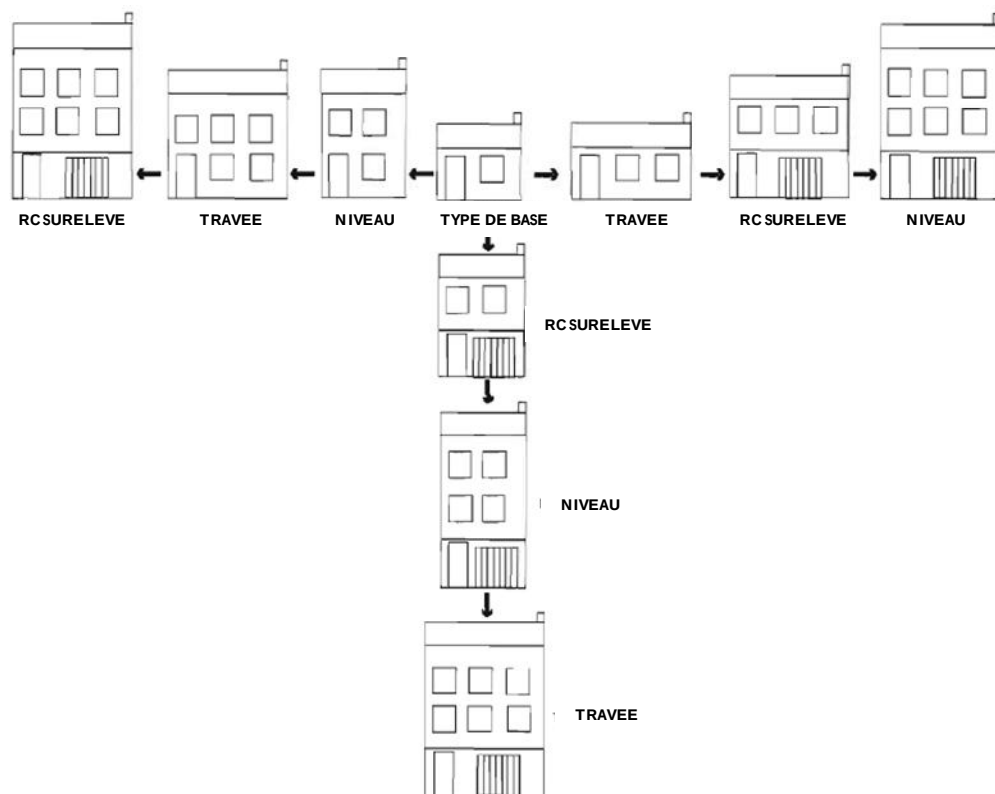


Figure II-5- Croisement des différents critères faisant naître les différents types de maisons individuelles [44]

Une approche similaire est proposée par l'étude « Le bâti ancien en Flandre-Artois. Connaissance de l'habitat existant », [45] qui définit sept types de logements anciens individuels différents en partant d'une forme élémentaire (type 1) puis en agrégeant niveaux, travées ou profondeur.

Cette dernière méthode a été reprise par le guide de rénovation de la ville de Lille [37] (Figure II-6) qui a repris la même typologie en classant les sept types en trois familles

principales : la maison de courée (types 1 et 2), la maison de ville (types 3,4 et 5) et la maison bourgeoise (types 6 et 7).

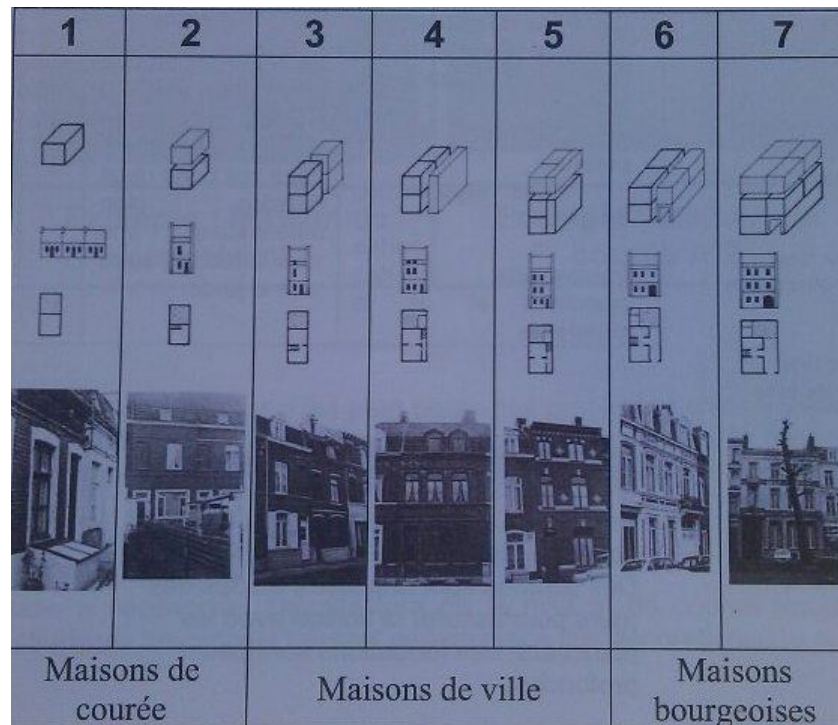


Figure II-6- Répartition des 3 grandes familles de typologies [37]

« Energies-Demain » [46] distinguent plus de vingt familles architecturales dans le parc du Nord-Pas-de-Calais résumées dans le Tableau II-1. On observe que le parc de cette région se démarque par sa faible proportion de logements collectifs et par la forte présence d'habitats du type « habitat Ouvrier ».

Cette typologie est présente dans les gros bourgs ruraux et dans les zones urbaines. Ces constructions sont très fréquemment alignées en bande, mitoyennes sur leur deux pignons. Leur morphologie va d'un Rez-de-chaussée (RDC) + combles à RDC +1 étage + combles. Leur paroi est majoritairement constituée de brique et les ouvertures représentent généralement environ 20% des deux faces libres.

	Typologie	Nombre de logements	Part	Moyenne en France
Collectif	Barres	10392	0,6%	1,1%
	Collectif	89770	5,6%	8,4%
	Collectif bourgeois	2957	0,2%	0,4%
	Eclectique	9140	0,6%	1,6%
	Grand collectif	81826	5,1%	6,2%
	Habitat intermédiaire	5827	0,4%	0,7%
	Hausmannien	4882	0,3%	1,4%
	Immeuble années 30	904	0,1%	0,2%
	Habitation à bon marché	2816	0,2%	0,3%
	Immeuble de bourg	15156	0,9%	2,8%
	Immeuble de logement	15044	0,9%	1,5%
Individuel	Maison bourgeoise	12757	0,8%	1,1%
	Maison de bourg	206395	12,8%	11,3%
	Maison rurale	15913	1,0%	4,2%
	Pastiche	30343	1,9%	2,4%
	Pavillon	28076	1,7%	2,2%
	Habitat ouvrier	496333	30,8%	11,7%
	Pavillon préfabriqué	69713	4,3%	3,2%
	Pavillon traditionnel	353157	21,9%	24,4%
	Petit collectif	98382	6,1%	11,5%
	Villa éclectique	62796	3,9%	3,3%
	Total général	1612579	100,0%	100%

Tableau II-1- Répartition du parc du Nord-Pas-de-Calais en différentes typologies architecturales selon le modèle Enerter [46]

II.4 La typologie adoptée

II.4.1 Les types de maisons identifiés

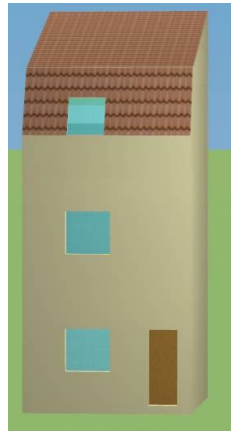
Sur l'ensemble de l'habitat Lillois, 4 typologies principales peuvent être identifiées :

- Maison de courée
- Maison ouvrière
- Maison de ville

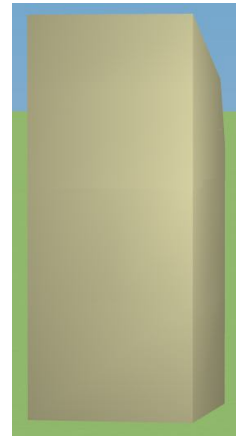
- Maison Bourgeoise

II.4.1.a La maison de courée

Spécifique d'une classe sociale qui se développe à partir du XIXe siècle avec la première révolution industrielle, cette forme d'habitat répond à la nécessité d'implanter la main d'œuvre à proximité des lieux de production. Les maisons de courées présentent une série de petites maisons accolées (R+C ou R+1+C), répétitives et sans confort, situées à l'intérieur d'un îlot et orientées vers une cour collective qui sert aussi de passage et de localisation des installations sanitaires de base (point d'eau eau, latrines). Etroite de façade, la maison de courée dépasse rarement un rez-de-chaussée et deux étages et bénéficie d'une cour, rarement d'un jardin qui peut se réduire à sa plus simple expression, un espace ouvert de quelques mètres carrés. Elle présente la plupart du temps 3 mitoyennetés, ce qui constitue une caractéristique particulière pour l'étude thermique [47].



Face sur rue



Face arrière

Figure II-7- Maison de courée vue 3D (3 mitoyennetés)

C'est une construction de base économique rarement isolée dans le contexte urbain et souvent associée à d'autres selon des principes multiples qui sont avant tout des principes d'économie de construction et de rentabilité d'utilisation du sol. Ce type d'habitat va de pair avec une grande promiscuité entre les familles, favorisant les conflits de voisinage. Leur faible profondeur est un handicap majeur à la rénovation car elle limite fortement leur capacité d'évolution.



Figure II-8- Photo d'une rue composée de maisons de courées

La particularité de la maison de courée est qu'elle ne possède des fenêtres que sur la façade avant. La surface habitable pour une maison de courée varie entre 40 et 70 m².

Le bâtiment qui servira d'exemple dans cette étude (chapitre V) évolue sur 3 étages sans comble aménageable ni cave et sa surface habitable est de 62,5 m² (Annexe Annexe 1).

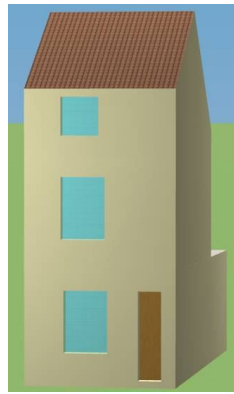
II.4.1.b La maison de ville et la maison ouvrière

Les maisons ouvrières et de ville sont relativement proches les une des autres. Leurs tailles respectives sont semblables. Elles comportent toutes les deux un salon, une salle à manger et une cuisine séparés au rez-de-chaussée. Ces bâtiments présentent en général deux mitoyennetés et par conséquent deux façades extérieures [47].

La différence est notable au niveau de l'empâtement des deux types de bâtiments. En effet la maison de ville présente une largeur de façade supérieure d'un mètre à celle de la maison ouvrière. De plus les extensions sont différentes. Ces dernières occupent la totalité de la largeur pour les maisons ouvrières alors que pour les maisons de ville elles ne les occupent que partiellement. On peut également remarquer que les toitures sont différentes sur ces deux typologies : une de type traditionnel pour la maison de ville avec combles aménageables et des combles à la Mansart pour la maison ouvrière (combles non aménageables). Au niveau des surfaces habitables des cas étudiés (chapitre V), la maison de ville est à 123,5 m², tandis que la maison ouvrière comptabilise 99,6 m².

a.) La maison ouvrière

Elle apparaît à partir de 1850 dans les faubourgs des grandes villes et dans les bourgs des campagnes où s'installent les usines. Dans l'ensemble, c'est une architecture simple et fonctionnelle. Elle est répétitive car construite en séries de maisons identiques et contiguës, elle utilise la production industrialisée de la brique, de la tuile mécanique. La surface habitable de la maison ouvrière varie entre 60 et 90 m² (Annexe Annexe 1).



Face sur rue



Face arrière

Figure II-9- Maison ouvrière vue 3D



Figure II-10- Rue bornée par des maisons ouvrières

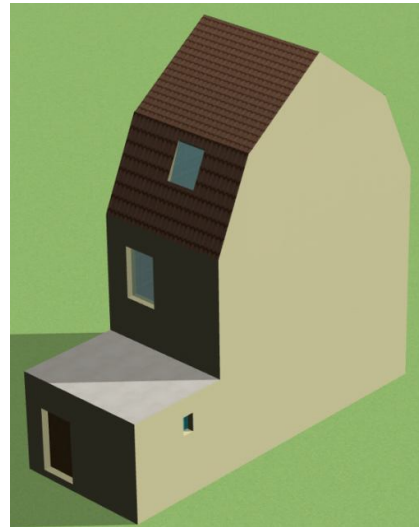
b.) La maison de ville

La maison de ville ressemble fortement à la maison ouvrière. En effet, elle possède souvent aussi une extension. La grande différence se fait au niveau de la surface habitable: pour la maison de ville, elle est comprise entre 90 et 130 m².

Les maisons de ville en mitoyenneté sur rue forment l'essentiel du corps urbain des villes d'Europe du Nord-Ouest et tracent les axes de la ville, rues, avenues, boulevards, et délimitent ainsi les îlots urbains. Maison de tradition familiale R+1+C ou R+2+C, elle se situe en blocage entre deux maisons contiguës sur une trame parcellaire étroite (4 à 7 mètres) et allongée (10 à 20 mètres et plus). Sa répétitivité dans les ensembles des maisons crée les rangs et rangées caractéristiques de l'Europe du Nord-Ouest.



Face sur rue



Face arrière

Figure II-11- Maison de ville vue 3D

Les maisons de ville présentent souvent une distribution identique : une porte d'entrée et un couloir latéral, puis, en enfilade, la salle à manger, la cuisine et la véranda donnant sur le jardin. A l'étage, une ou deux chambres et une salle de bain en appendice sur l'espace de la cuisine. Au deuxième étage, s'il existe, on trouve deux chambres, puis un grenier. La maison est souvent en partie excavée, l'emplacement de la cave variant selon la date de construction et les moyens techniques mis en œuvre ; et ne possède en général de garage (Annexe Annexe 1).

L'espace est toujours suffisant pour adapter ces maisons, même les plus anciennes, aux normes du confort actuel (sanitaire, chauffage, isolation...)



Figure II-12- Photo d'une maison de ville

II.4.1.c La maison bourgeoise

La maison bourgeoise borde boulevards et avenues. A la différence des autres typologies, elle intègre souvent une porte cochère et un passage carrossable intérieur sur lequel se greffait l'entrée du corps du logis. Elle offre de plus grandes surfaces (que la maison de courée et la maison de ville) [47].



Face sur rue



Face arrière

Figure II-13- Maison bourgeoise vue 3D

Sur un plan architectural elle se distingue par un travail esthétique très élaboré des façades et la présence de balcons et d'ornements intérieurs et extérieurs ce qui rend délicat la mise en œuvre d'une isolation efficace. La façade est assez large permettant d'accueillir trois ouvertures par étage. Elle possède également des ouvertures type chien assis à son dernier étage. Comme la maison ouvrière et la maison de ville, la maison bourgeoise présente aussi deux mitoyennetés et une extension côté cour. Le bâtiment modélisé (chapitre V) a une surface de 138m².



Figure II-14- Photo d'une maison bourgeoise

II.4.2 Constantes et variantes des typologies

II.4.2.a Les constantes

Le système constructif du bâti ancien présente des ressemblances communes pour toutes les typologies se caractérisant par des murs refends porteurs, des façades en briques et une portée transversale des planchers et de la charpente.

De plus, l'implantation en bordure de rue des maisons lilloises avec deux façades bien différenciées (une vers la rue et l'autre vers la cour ou le jardin) est un caractère commun aux divers types présentés.

La constitution de l'ilot par l'assemblage de maisons le long des rues délimite deux types d'espaces extérieurs différents :

D'un côté du bâti, l'espace public de la rue. La façade extérieure témoigne du statut social de ses occupants. Les fenêtres correspondent généralement aux belles pièces de la maison (salon, grande chambre)

De l'autre côté du bâti, l'espace privé du cœur de l'ilot. La cour est souvent encombrée d'annexes : cuisine, véranda, W.C.

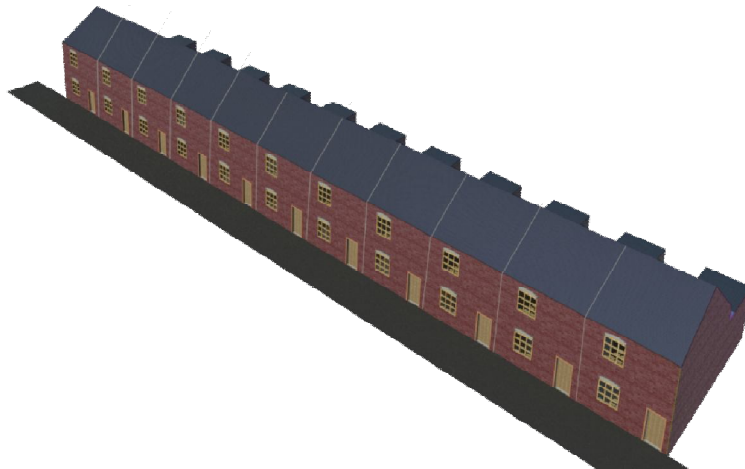


Figure II-15- Maisons en bandes caractéristiques du Nord de la France

II.4.2.b Les variantes

En plus des constantes communes pour toutes les typologies, des variantes existent au sein d'une même typologie, une partie de ces variantes est purement architecturale et donc d'influence secondaire sur les déperditions thermiques du bâtiment (ornements extérieurs, aspect intérieur, couleur de la brique...). D'autres variantes ont un rôle plus considérable sur l'aspect énergétique d'où la nécessité de les prendre en considération dans l'évaluation dans la modélisation énergétique de ces typologies.

Ces variantes sont :

-Le nombre de niveaux : cette variante influe sur les surfaces latérales du bâtiment et le volume chauffé, plus il y a d'étages, moins le bâtiment est compact, et donc plus il est déperditif.

-L'aménagement des combles : les combles sont une source de déperdition très importante dans le bâtiment, dans le cas d'une maison non isolée ils peuvent constituer près de 30% des déperditions totales de la maison. Cependant, les combles sont aménagés dans certains cas, d'où la nécessité de bien isoler la toiture afin de diminuer les déperditions par ces parois. Dans d'autres cas les combles sont non aménagés et dans ce cas ils constituent une zone tampon qui diminue les échanges entre l'étage inférieur et l'extérieur.

-La mitoyenneté : les maisons du Nord sont construites en bandes ce qui crée une mitoyenneté entre elles ; on rencontre souvent une ou deux mitoyennetés et dans certains cas trois. Ce facteur a une grande influence sur les déperditions thermiques puisque le mur mitoyen n'est pas déperditif vu qu'il sépare deux zones de même températures. Ainsi une différence notable peut être observée par exemple entre une maison individuelle ayant ses quatre murs donnant sur l'environnement extérieur, et un appartement faisant partie d'un immeuble collectif et étant entouré de plusieurs logements également chauffés. Ce dernier peut n'avoir qu'une seule de ses parois donnant sur l'extérieur.

-La surface habitable : dans une même typologie la surface peut varier entre deux logements même s'ils ont le même nombre d'étages. L'emprise au sol (nombre de travées et profondeur) peut varier entre les différents bâtiments [45].

Toutes ces variantes doivent être prises en compte pour une évaluation fine du comportement thermique dynamique des différentes typologies.

II.5 Les spécificités

II.5.1 Spécificités architecturales

II.5.1.a Eléments caractéristiques

La structure du bâti ancien lillois est constituée de murs porteurs en briques qui sont en premier lieu des murs de pignons et éventuellement les murs de façade et de refend. Les séparatifs entre maisons sont souvent moins épais que les murs extérieurs.

Les murs sont constitués de brique, matériau traditionnel depuis le XVII^e siècle ; l'utilisation de brique de couleur est fréquente même dans les constructions modestes.

Les fenêtres reproduisent un modèle traditionnel comportant le plus souvent deux ouvrants et une imposte fixe vitrée. Du fait de la présence de pièces habitables au rez-de-chaussée, les fenêtres sont équipées de fermetures en bois (volets battants le plus souvent munis de persiennes ou volets roulants à lames de bois) ; par contre, on constate l'absence quasiment générale de fermetures aux étages.

Les portes d'entrée, pleines ou vitrées, représentent toujours une imposte vitrée pour l'éclairage du couloir.

Les escaliers se caractérisent par une largeur de passage très faible le plus souvent égale à 65 cm (cette valeur est entre 90 et 120 cm pour les habitations actuelles) ; de plus la circulation est rendue de plus en plus délicate à cause de la faible largeur des marches [45].

Le plancher bas est sur terre plein, il est constitué d'une couche de 16 cm de béton hourdis de terre cuite.

Les planchers intermédiaires sont généralement en bois, les solives franchissant sans appui intermédiaire la distance entre deux murs porteurs. Les solives supportent des lames de bois (sapin). L'espace entre les solives est comblé par de l'argile et des gravais qui permettaient une isolation acoustique et un contreventement du plancher.

Les plafonds sont constitués d'un enduit de plâtre sur des lames de bois.

L'extension rajoutée en arrière de la maison est le plus souvent constituée de murs en parpaings creux et d'une toiture en zinc.

La cave, si elle existe, est réalisée en murs de briques épais, le sol est pavé en briques et le plancher haut est le plus souvent en tuile de terre cuite.

II.5.1.b Marge d'évolution et de modification du patrimoine bâti

Les modifications du patrimoine bâti correspondent aux divers changements, transformations, mutations, évolutions ... qui affectent celui-ci. On peut distinguer deux grands types de modifications : les modifications architecturales et les modifications fonctionnelles. Les premières touchent surtout au bâtiment en lui-même, son apparence (style, matériaux, ouvertures ...), alors que les secondes touchent aux fonctions qu'abritent le bâtiment.

Les modifications apportées au bâti ont lieu depuis que celui-ci existe. Cependant, toute modification n'est pas synonyme d'altération, détérioration... L'évolution du bâti peut donc aussi avoir des aspects positifs.

L'évolution du bâti est une phase nécessaire dans la vie d'un bâtiment. En effet, sans adaptation, il y a un risque de désaffectation du bâtiment, car le bâtiment créé pour des besoins spécifiques à une certaine époque, doit pouvoir satisfaire les nouveaux besoins de son propriétaire. Sans cela, une rupture peut apparaître si le bâtiment n'est plus adapté, s'il est en décalage avec son environnement économique, social, et culturel. Pour qu'il y ait conservation d'un bâtiment, ce dernier doit avoir une fonction utile à la société. Les modifications du patrimoine bâti en milieu urbain sont donc essentiellement le fruit du développement de nouveaux modes de vie, nouveaux produits et nouvelles réglementations [48] :

- La démocratisation de la voiture : adjonction d'un garage sur le côté de la maison, s'il y a de la place.
- Le besoin de plus de confort : insonorisation du bâtiment, la luminosité, le confort thermique, l'augmentation de l'espace.

- L'apparition des matériaux faciles d'entretien, peu coûteux comme le PVC et la fonte.
- Les réglementations en vigueur: réglementation thermique, sécurité incendie...
- La disparition de certaines activités, pratiques, qui ne sont plus en lien avec les usages actuels (obsolescence ...) : disparition (démolition) ou reconversion des bâtiments à usages agricoles, industriels, artisanaux..., suppression de pièces inutiles aux occupants dans certaines habitations.

Il est donc compréhensible que ces anciennes maisons soient modifiées afin qu'elles soient adaptées aux besoins et envies des propriétaires. En revanche, ces modifications doivent rester compatibles avec la préservation et la valorisation des caractéristiques patrimoniales et régionales du bâtiment, ce qui n'est pas toujours le cas.

En effet, de « mauvaises » modifications, dues principalement à l'ignorance et la non-sensibilisation des propriétaires dans ce domaine, déprécient souvent le bâti d'un point de vue esthétique et même parfois structurel.

Mais toute modification n'est pas négative. En effet, si elles sont de qualités, celles-ci peuvent participer à la réadaptation, à la requalification du bâti ancien.

On peut distinguer des modifications réversibles et des modifications irréversibles : les modifications réversibles ne modifient pas profondément le bâti (adjonction ou modifications d'ornements, modifications de menuiseries, matériaux de couvertures...). Dans ce cas il est possible de revenir à l'état d'origine facilement.



Figure II-16- Perte de l'homogénéité du rang (une rupture y est introduite), perte de la qualité esthétique de la façade

Les modifications irréversibles modifient généralement profondément le bâti et rendent impossibles ou très coûteux les travaux permettant de revenir à l'état d'origine: ce sont essentiellement des modifications qui touchent au gros-œuvre.

Une ambiance bâtie se lit comme un tout. C'est l'ensemble des nuances, des accords entre les matériaux, des formes et juxtapositions, des détails de construction ... qui fait qu'une rue nous semble équilibrée, unie et agréable. La façade dialogue vraiment avec la rue. C'est pourquoi, une rénovation de façade doit être réalisée en respectant certaines règles, pour un projet de qualité.

La façade sur rue étant d'intérêt public, le particulier doit y suivre les prescriptions mises en place en faveur de la protection du patrimoine bâti privé. La façade arrière relève, quand à elle, plus de l'intérêt particulier et s'avère "libre" [48].

Dans tous les cas il existe des règles à respecter comme la conservation des éléments d'origine (éléments décoratifs, menuiseries) et l'interdiction de modifier tout ce qui touche au gros œuvre (transformation des proportions des ouvertures, mise en place de matériaux de parements...)

II.5.2 Spécificités énergétiques

II.5.2.a La précarité énergétique

En France, un amendement visant à inscrire dans le cadre de la loi la notion de précarité énergétique a été adopté lors de l'examen du Grenelle II. Selon ce texte, « Est en précarité énergétique au titre de la présente loi, une personne qui éprouve dans son logement des difficultés particulières à disposer de la fourniture d'énergie nécessaire à la satisfaction de ses besoins élémentaires en raison notamment de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat » [38]. Selon cette définition, trois facteurs principaux influent sur la précarité énergétique d'un ménage : son niveau de ressource, le coût de l'énergie mais aussi la qualité du logement en matière de performance énergétique.

La définition précédente ne détermine toutefois pas de critères permettant de définir de manière non équivoque si un ménage se trouve ou non en précarité énergétique. C'est pourquoi, dans la révision en cours de la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments, la définition suivante est proposée : « Situation dans laquelle un ménage est obligé de dépenser plus du dixième de ses revenus pour régler les factures lui permettant de chauffer son domicile selon une norme acceptable, fondée sur les niveaux recommandés par l'Organisation mondiale de la Santé » [38].

A partir de l'enquête logement, le nombre de ménages du Nord – Pas de Calais dépensant plus de 10% de leur revenu dans la consommation d'énergie peut être estimé à un peu plus de 260 000. Ainsi, 16% des ménages de la région peuvent être considérés en situation de précarité énergétique tandis que cette proportion est de 13% en moyenne nationale. La plus grande importance des ménages en précarité énergétique n'est pas surprenante dans une région où le revenu moyen est plus faible (-10%) tandis que la consommation d'énergie est plus élevée (+6%) [38].

Les espaces les plus touchés par la précarité énergétique sont les espaces ruraux et périurbains : dans le Nord-Pas-de-Calais comme en France métropolitaine, plus de 20% des ménages vivant dans les espaces ruraux ou périurbains consacrent plus de 10% de

leurs ressources à des dépenses d'énergie pour leur logement. Toutefois le Nord-Pas-de-Calais se caractérise par un poids important des ménages vivant dans de grands espaces urbains parmi les ménages en précarité énergétique : près de 70% des ménages en précarité énergétique vivent dans des unités urbaines de plus de 20000 habitants contre 44% pour l'ensemble de la France métropolitaine. Ce poids plus important est à la fois lié au caractère urbain de la région et à une plus grande incidence de la précarité énergétique dans ces espaces.

L'importance des dépenses d'énergie pour le logement est fortement liée à l'âge du logement en Nord-Pas-de-Calais comme pour l'ensemble de la France métropolitaine : plus de 20% des ménages vivant dans un logement construit avant 1948 sont en précarité énergétique alors qu'ils sont moins de 8% parmi les ménages habitant dans un logement achevé après 1989. Ainsi, dans la région, les logements construits avant 1948, proportionnellement plus nombreux qu'en moyenne nationale, représentent ainsi plus de la moitié des logements habités par des ménages en précarité énergétique. Parmi les autres logements, le Nord-Pas-de-Calais se caractérise par un taux d'incidence plus élevé de la précarité énergétique pour les logements construits entre 1949 et 1974 qui s'explique en grande partie par le poids plus important des maisons individuelles construites dans le Nord – Pas de Calais au cours de cette période.

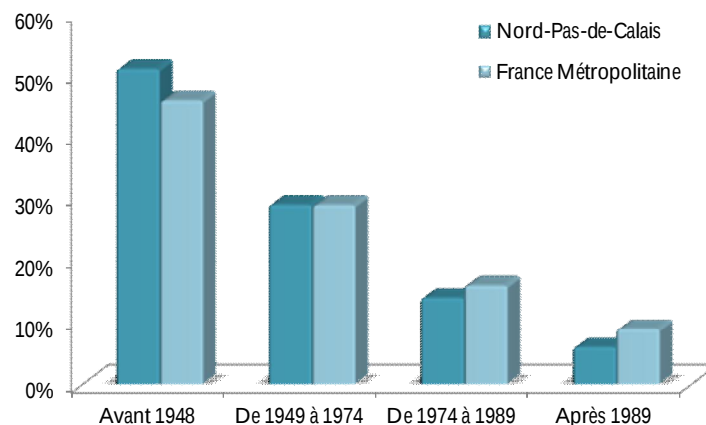


Figure II-17- Répartition des ménages en précarité énergétique en fonction de la date de construction [38]

L'installation de chauffage du logement influe sur la dépendance énergétique du ménage. En particulier, les ménages bénéficiant d'un chauffage collectif sont très peu nombreux à dépenser plus de 10% de leurs ressources dans la dépense d'énergie pour leur logement dans la région comme en moyenne nationale. A l'inverse, la précarité énergétique est plus forte pour les ménages ayant une installation de chaudière individuelle ou ne disposant ni de chauffage central ni de chauffage électrique. Cependant, et quel que soit le mode de chauffage, l'incidence de la précarité énergétique est plus forte dans le Nord-Pas-de-Calais qu'en moyenne nationale.

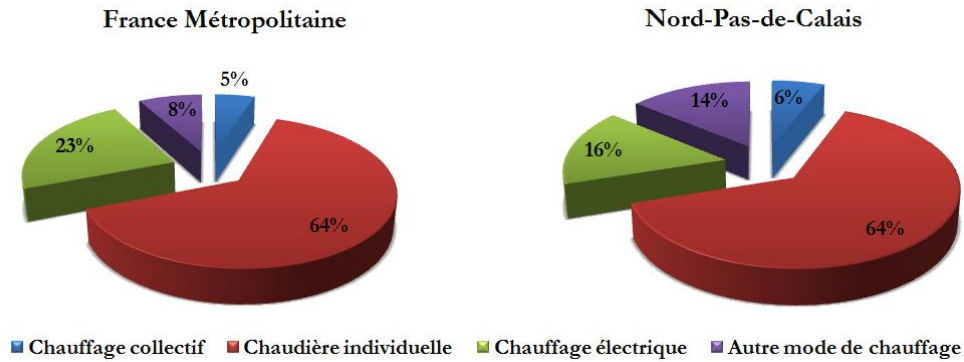


Figure II-18- Répartition des logements en précarité énergétique en fonction du type de chauffage utilisé [4]

En plus de la mauvaise performance thermique des parois opaques dans le bâti ancien, les joints d'étanchéités sont défectueux : les dormants ne sont pas étanches et laissent passer des courants d'air, ainsi que l'absence de joints lors de la pose des menuiseries provoque de nombreuses infiltrations à l'air. Les portes présentent les mêmes défauts que les menuiseries. Ces courants d'air refroidissent les matériaux sur leurs passages. Ces zones sont matérialisées par la température froide en bleu (Figure II-19).

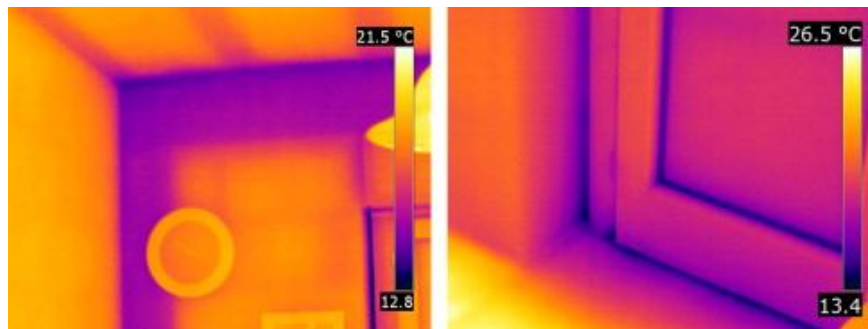


Figure II-19- Repérage des zones froides dans l'enveloppe à l'aide de caméra thermique infrarouge [33]

II.5.3 Réhabilitation énergétique du bâti ancien

La réhabilitation du bâti d'un logement permet de réduire son besoin énergétique. Le besoin de chauffage, exprimé en kWh_{ep}/m²/an dépend de l'âge du logement et de son type. Par exemple, les logements construits avant le premier choc pétrolier (avant 1968) n'étaient pas conçus avec des notions de limitation des besoins de chauffage, la problématique énergétique n'étant pas identifiée à cette époque. De plus, tous les logements n'ont pas les mêmes surfaces déperditives. Ainsi une différence notable peut être observée entre une maison individuelle ayant ses quatre murs donnant sur l'air extérieur, et un appartement faisant partie d'un immeuble collectif et étant entouré de plusieurs logements également chauffés.

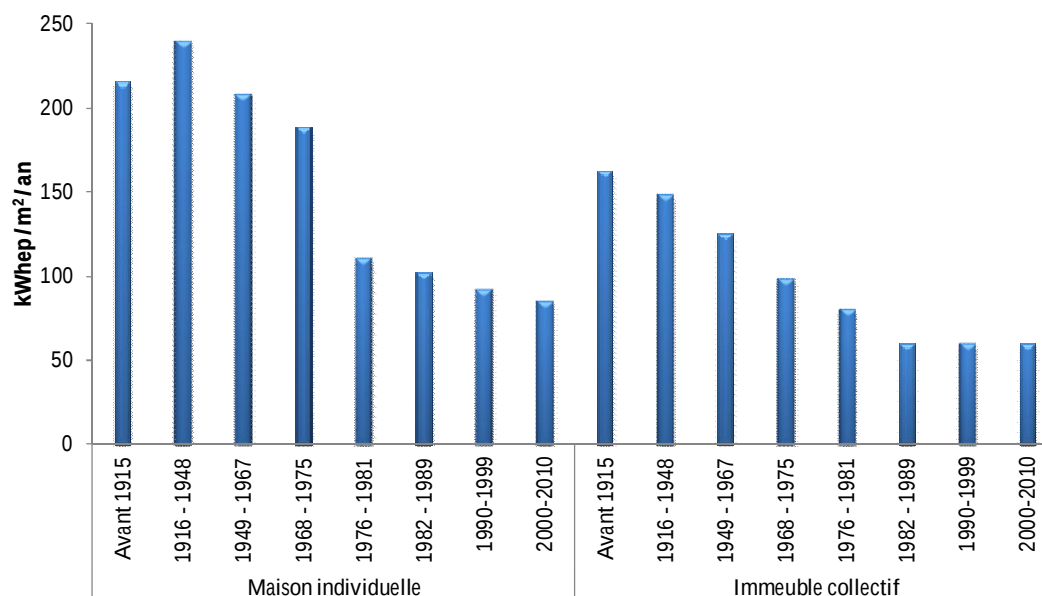


Figure II-20- Besoin de chauffage d'un logement en fonction de son âge et de son type [46]

Une étude d'efficacité énergétique en Nord-Pas-de-Calais a été faite à l'aide d'ENERTER qui est un outil de modélisation utilisé par « Energies Demain » pour les démarches de planification de réhabilitation urbaine. Le modèle ENERTER permet également de reconstituer une répartition des logements par étiquette DPE (Diagnostic de Performance Énergétique).

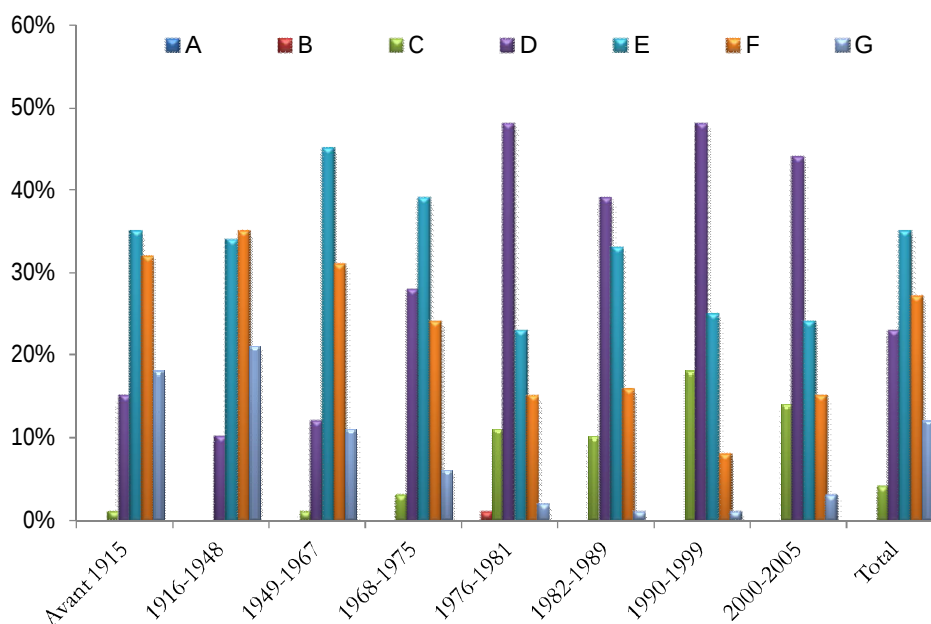


Figure II-21- Répartition des étiquettes énergétiques des logements au Nord-Pas-de-Calais selon leurs dates de construction [46]

Selon « Energies Demain » [46], les gains issus de la réhabilitation thermique sont relativement importants. En effet, selon cette étude, la consommation typique des bâtiments anciens existants est estimée à 223 kWhep/m²/an. Pour vérifier l'ordre de grandeur : en partant d'un rendement moyen de 80% et d'une consommation moyenne d'ECS (Eau Chaude Sanitaire) de 30 kWhep/m²/an; on arrive vers 308 kWhep/m²/an ce qui semble être proche des DPE moyens.

En se basant sur un bouquet comportant les actions suivantes :

- Isolation des murs par l'intérieur
- Isolation des combles
- Pose de double vitrage
- Installation d'une ventilation mécanique
- Isolation du plancher

La consommation après isolation devient : 35 kWhep/m²/an, soit une diminution de 85% [46].

Typologie	Année de construction	Consommation 2050 tendancielle GWhep/an	Consommation 2050 après réhabilitation GWhep/an	Gain %	Gain brut GWhep/an	Part du parc
Maison individuelle	Av. 1948	8124	2481	69%	5643	31,5%
	1949 - 1975	4165	1944	53%	2221	18,6%
	1976 - 2010	2378	1048	56%	1330	18,6%
HLM	Av. 1948	414	135	67%	279	2,0%
	1949 - 1975	1122	480	57%	642	8,9%
	1976 - 2010	827	398	52%	429	10,9%
Autres immeubles collectifs	Av. 1948	266	90	66%	176	2,7%
	1949 - 1975	277	115	58%	162	2,9%
	1976 - 2010	162	85	48%	77	3,9%

Tableau II-2- Gains liés à la mise en œuvre du bouquet de travaux [46]

A l'horizon 2050 les économies d'énergie s'élèvent à près de 11000 GWh/an. Aussi, il est intéressant de souligner qu'un peu plus de 50% du gisement est concentré dans un peu plus de 30% du parc : les maisons individuelles d'avant 1948 [46].

En prenant le coût unitaire du bouquet d'actions (isolation du mur, des combles et du plancher, pose de double vitrage et installation de VMC) à 40 000 euros, nous obtenons un coût d'environ 15 c€/kWh évité (sur une hypothèse d'une durée de vie de 35 ans) ; soit environ trois fois plus que le coût du gaz actuel, et environ 1,5 fois plus que le coût de l'électricité [46]. C'est l'un des problèmes majeurs de l'action pour la rénovation : les taux de retours sur investissements ne sont pas stimulants, sauf dans des scénarios de coûts importants du prix des énergies. A noter néanmoins que des valeurs plus

intéressantes peuvent être obtenues en ciblant des franges de parc bien précises (parc individuel énergivore, ou immeubles collectifs où les coûts d'investissements rapportés au logement sont plus faibles).

Le gisement « réhabilitation du bâti existant » présente donc des gains très importants et l'action sur le bâti des logements existants doit être la principale mesure dans le cadre d'une politique de maîtrise des consommations énergétiques. Toutefois les coûts mis en jeux sont importants et nécessitent un ciblage lors du Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Energie (SRCAE).

Ainsi la définition des points suivant est importante :

- Quel parc à réhabiliter ? (50% du gisement repose sur 30% du parc)
- Quelle est l'ambition des travaux de rénovation suivant le type de parc ciblé ?
- Quel objectif temporel se fixer ? Par exemple quelle étape pour 2020 ?

Ainsi concernant le dernier point, il s'agira de faire attention à ne pas « tuer » le gisement en effectuant de petits travaux de rénovation pour toucher un plus grand nombre de logements. En effet, les coûts seront plus importants si les différents gestes de rénovation thermique sont faits de manière différenciée dans le temps sur un même logement (pas de mutualisation des moyens de travaux). De plus, la gêne occasionnée par les travaux se retrouve multipliée pour les habitants, et ceux-ci auront moins tendance à déclencher des travaux successifs. Un critère de ciblage de parc à rénover, croisant performance thermique initiale du logement et revenu du ménage occupant, pourrait être pertinent.

Cette problématique d'isolation fait surgir plusieurs questions en termes de nature et d'épaisseur d'isolant, configuration d'isolation (intérieur ou extérieur), potentiels d'économies d'énergie... Cependant, l'étude du mur à l'état initial est nécessaire afin de valider la méthode d'analyse thermique du mur d'une part et de comprendre ses spécificités thermiques d'autre part.

Chapitre III: Comportement thermique d'un mur ancien Lillois typique

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement thermique d'un mur de brique de 33,5 cm, typique des façades extérieures des maisons individuelles anciennes de la région Nord-Pas-de-Calais. Pour toutes les typologies de maisons individuelles, on trouve ce type de parois avec une configuration spécifique (partie III.4.1), d'où l'intérêt de l'étudier afin de voir son comportement thermique et de proposer par la suite une isolation performante qui permet de corriger ses défauts de faible résistance thermique sans nuire à ses bienfaits inertiels. Cependant la méthodologie appliquée dans ce chapitre peut être appliquée à n'importe quelle paroi opaque et non pas spécifiquement pour le mur étudié.

Il est évident que la reproduction d'un mur datant parfois de plus d'un siècle s'avère impossible, surtout que les bâtiments dits « anciens » sont régis par un fonctionnement physique relativement méconnu et très différent de celui des bâtiments d'après guerre (apparition de procédés industriels).

Le but de notre travail est de se rapprocher autant que possible de la configuration d'un mur ancien pour étudier ses particularités et pouvoir lui appliquer une isolation thermique compatible avec les contraintes thermiques et architecturales.

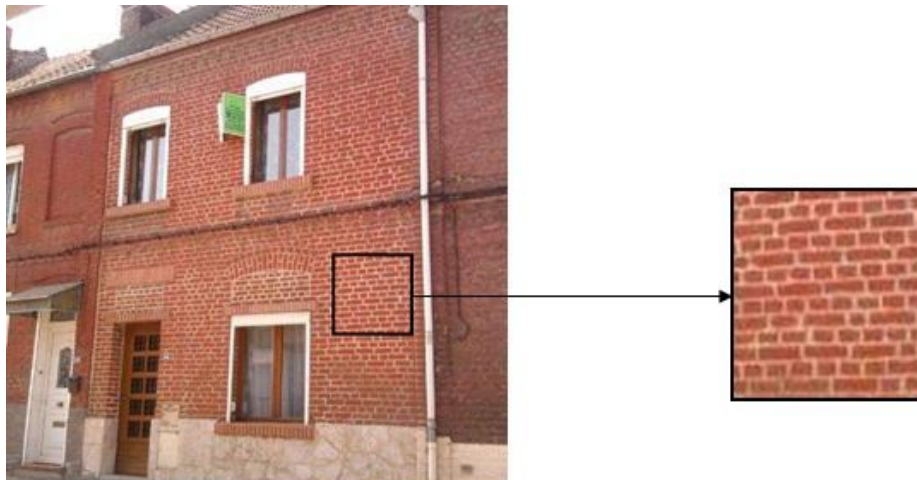


Figure III-1- Façade extérieure d'une construction Lilloise typique (maison de ville)

On étudiera le mur expérimentalement sous différents types de sollicitations dans le but de déterminer ses propriétés thermiques et de comparer les résultats expérimentaux aux résultats numériques et analytiques.

Dans une première partie on déterminera les propriétés thermiques des matériaux constituant le mur, à savoir la brique et le mortier. On s'intéressera à la chaleur massique et la conductivité thermique de chaque matériau.

Puis, dans une deuxième partie, on déterminera les propriétés thermiques équivalentes du mur expérimental à partir de deux types de sollicitations : les sollicitations de température constante et les sollicitations de température harmonique.

Ensuite, on abordera la partie théorique avec ses aspects numériques et analytiques ; on présentera les différentes méthodes d'étude du transfert thermique dynamique unidirectionnel puis on comparera ces différentes méthodes pour le mur en question.

Enfin, l'étude en régime quelconque sera abordée en confrontant les résultats issus d'une méthode théorique (III.5.2 - Présentation générale de la méthode) aux résultats expérimentaux.

III.1.1 Différents modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est une transmission d'énergie thermique d'une région à une autre de température plus faible. On reconnaît classiquement trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

III.1.1.a La conduction

C'est le processus par lequel le transfert de chaleur s'effectue au sein d'un matériau solide. Scientifiquement parlant, c'est le transfert d'énergie cinétique entre les molécules mises en vibration au sein du solide.

III.1.1.b La convection

C'est le transfert de chaleur par déplacement physique des molécules d'un fluide (gaz ou liquide) d'un endroit à un autre. Si ce déplacement de fluide est créé mécaniquement, la convection est dite forcée, si le déplacement est simplement dû aux différences de température, la convection est dite libre. L'échange est représenté par la loi de Newton :

$$\varphi = h.S.(T_f - T_s) \quad \text{(III-1)}$$

Avec h : le coefficient d'échange thermique surfacique exprimé en $W/m^2.K$, S : la surface d'échange entre le solide et le fluide exprimée en m^2 , T_f : la température du fluide en K , et T_s : la température du solide exprimée en K .

III.1.1.c Le rayonnement

Le rayonnement implique le transfert de chaleur à travers les ondes électromagnétiques indépendamment de l'air. L'émissivité présente la capacité d'un corps à émettre l'énergie, elle varie de 0 à 1.

$$\varphi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_p^4 - T_s^4) \quad (\text{III-2})$$

Avec ε : l'émissivité du solide S permettant de mesurer la capacité à absorber et réémettre l'énergie rayonnée ($0 < \varepsilon < 1$), σ : constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), S : la surface d'échange entre le solide et le fluide exprimée en m^2 , T_p : la température du corps avec lequel le solide S fait l'échange radiatif exprimée en K, et T_s : la température du solide exprimée en K.

N.B. : Si T_p est proche de $T_s \Rightarrow T_p^4 - T_s^4 \approx 4 \cdot T_m^3 \cdot (T_p - T_s)$

$$\varphi = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T_m^3 \cdot (T_p - T_s) = h_r \cdot (T_p - T_s) \quad \text{avec} \quad h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T_m^3 \quad (\text{III-3})$$

III.1.1.d Couplage (Convection + rayonnement)

Dans le cas d'un échange couplé convection plus rayonnement nous pouvons écrire [49] :

$$\begin{cases} \varphi_c = h_c (T_s - T_f) \\ \varphi_r = h_r (T_s - T_p) \end{cases} \Rightarrow \varphi_{tot} = h_c (T_s - T_f) + h_r (T_s - T_p) \quad (\text{III-4})$$

En posant $T_m = \frac{h_c T_f + h_r T_p}{h_c + h_r}$ et $h_t = h_c + h_r$;

$$\varphi_{tot} = h_t \cdot (T_s - T_m) \quad (\text{III-5})$$

Avec h le coefficient d'échange superficiel global et T_m la température extérieure équivalente.

N.B. : Etant un corps solide opaque, le transfert de chaleur à l'intérieur d'un mur se limite à la conduction ; cependant, la convection et le rayonnement interviennent souvent dans les conditions aux limites.

III.1.1.e Conditions aux limites

Pour résoudre les équations de transfert de chaleur dans le domaine de l'espace occupé par le corps conducteur de la chaleur, il faut s'imposer une condition initiale (en général, la distribution initiale de la température) et des conditions aux limites à la surface du mur, conditions que l'on classe en trois types principaux [50] :

- 1.) Distribution de température imposée ou condition de Dirichlet ($Bi > 100$);
- 2.) Distribution imposée de densité de flux de chaleur ou condition de Neumann;

- 3.) Relation entre la densité de flux de chaleur à la surface du corps et la température au même endroit. Si cette relation est linéaire, on appelle cette condition la condition de Newton - Fourier.

III.1.2 Conduction unidirectionnelle en régime permanent

En régime permanent on néglige les variations des grandeurs physiques (ici la température) en fonction du temps. Ceci peut être le cas d'un mur étudié dans des conditions extrêmes (température extérieure minimale le long d'une année) ou dans des conditions expérimentales ou bien lorsque le transfert est étudié pour de faibles durées (quelques heures voir moins). L'équation de transfert de chaleur s'écrit alors :

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{III-6})$$

III.1.2.a Cas du mur simple (monocouche)

On considère un mur d'épaisseur e , de conductivité thermique λ et de grandes dimensions transversales dont les faces extrêmes sont à des températures T_1 et T_2 , le profil de température à travers le mur s'écrit :

$$T(x) = T_1 - \frac{x}{e}(T_1 - T_2) \quad (\text{III-7})$$

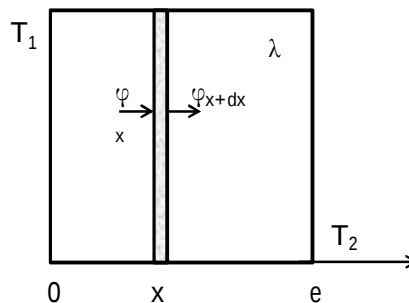
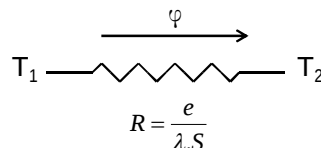


Figure III-2- Transfert thermique unidirectionnel dans une paroi homogène

Le mur peut être représenté par un schéma électrique équivalent :



III.1.2.b Cas du mur multicouches

C'est le cas d'un mur réel constitué de plusieurs couches et où on ne connaît que les températures des fluides T_{f1} et T_{f2} en contact avec les deux faces du mur de surface

latérale S. En réalité, la rugosité des surfaces crée des couches d'air entre les différentes couches du mur créant ainsi une résistance thermique supplémentaire appelée résistance de contact.

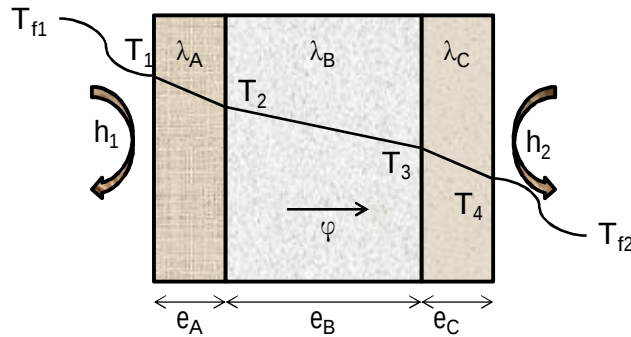
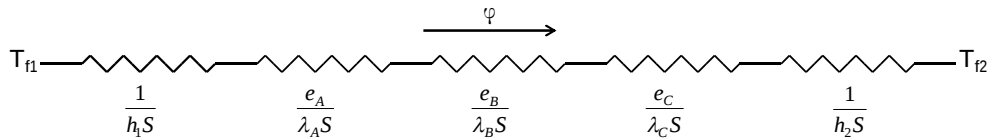


Figure III-3- Transfert thermique en régime permanent dans une paroi multicouche

En régime permanent, le flux de chaleur se conserve lors de la traversée du mur, d'où :

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}} \quad (\text{III-8})$$

Le schéma électrique équivalent de ce système est :



III.1.3 Conduction unidirectionnelle en régime variable

La relation générale du transfert de chaleur pour un flux unidirectionnel sans source de chaleur interne est :

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}; \quad \text{avec } a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{III-9})$$

« a » étant la diffusivité du matériau exprimée en m²/s, elle caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau.

Afin de bien modéliser le mur avec la méthode convenable, il faudra commencer par calculer le nombre de Biot qui est un nombre adimensionnel mesurant le rapport entre la résistance thermique interne du milieu et sa résistance externe.

$$Bi = \frac{h.e}{\lambda} = \frac{e/\lambda}{1/h} = \frac{R_{int}}{R_{ext}} \quad (III-10)$$

- Si $Bi \leq 0,1$, la résistance intérieure est faible par rapport à la résistance extérieure et par suite il y a un faible gradient thermique dans le mur. On peut alors considérer que la température est uniforme à l'intérieur du mur, le mur est dit thermiquement mince.
- Si $Bi \geq 0,1$, la résistance intérieure est grande par rapport à la résistance extérieure et par suite il y a un grand gradient thermique dans le mur, le mur est dit thermiquement épais.

Donc le nombre de Biot nous permet de vérifier si la méthode du gradient nul est applicable, si c'est le cas, la modélisation de la paroi sera simplifiée et se ramène à un circuit 2RC (III.1.3.a). Dans notre cas, le nombre de Biot est supérieur à 0,1. En effet, la résistance thermique du mur est voisine de $0,32 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ [RT2005] ; donc, pour avoir un nombre de Biot inférieur à 0,1 il faut que le coefficient d'échange convectif surfacique moyen soit inférieur à $0,312 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$, ce qui est pratiquement impossible (on sait bien que la valeur de ce coefficient est nettement supérieure à cette valeur). On déterminera les différents paramètres thermiques du dispositif expérimental dans la partie III.3.

III.1.3.a Mur thermiquement mince (Méthode de gradient nul) et méthode nodale

Le transfert de chaleur dans un mur à température uniforme, est une expression contradictoire a priori car il est nécessaire qu'il y ait un gradient thermique pour qu'il y ait transfert de chaleur. Cette approximation du milieu à température uniforme peut néanmoins être justifiée dans le cas où la dimension est petite et la conductivité thermique élevée.

On peut, dans ce cas résoudre l'équation de transfert de chaleur par analogie électrique 2RC (Figure III-4).

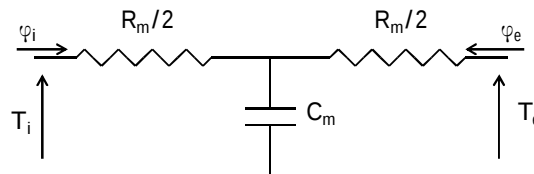


Figure III-4- Schéma électrique analogue d'un mur thermiquement mince

Le cas du mur thermiquement mince correspond à un nombre de Biot faible, cependant, si le nombre de Biot est $> 0,1$, la température au sein du mur n'est pas constante ; on utilise alors la méthode analytique pour le calcul du transfert thermique.

N.B. : Si la longueur d'onde $\lambda_v \gg 4.\pi.e$, le phénomène de propagation peut-être négligé, ceci est équivalent à un nombre de *Biot* > 0.1).

$$\lambda_v = \frac{2\pi}{\beta} \quad \text{avec} \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad (\text{III-11})$$

La méthode nodale consiste à décomposer un mur quelconque en une série de n nœuds ($2n$ résistances et n capacités) de telle sorte que chaque élément en lui même représente un mur mince [51], [52].

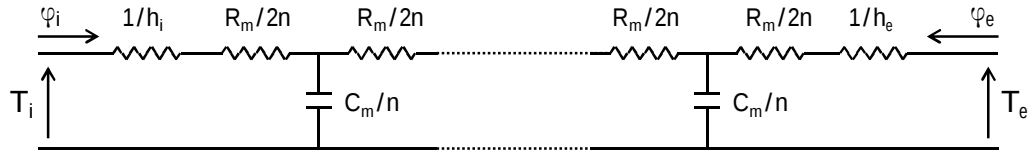


Figure III-5- Modèle du mur par la méthode nodale

III.1.3.b Méthode analytique – Mur semi-infini et mur fini

Un milieu semi-infini est une paroi d'épaisseur suffisamment grande que la perturbation appliquée sur une face ne soit pas ressentie par l'autre face, il est défini comme un solide à résistance interne non négligeable ($Bi \gg 1$). Le milieu fini est un milieu ayant une épaisseur finie, dans ce cas les excitations d'une face sont ressenties par l'autre et il faut donc déterminer les conditions aux limites pour les deux faces du mur. Les transferts de chaleur dans ces deux milieux sont présentés dans la partie (III.1.3).

III.1.3.c Méthode des éléments finis

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles qui représentent analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques ; dans notre cas il s'agit d'un système thermique.

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliqués. Il s'agit donc avant tout de la résolution approchée d'un problème, où l'on cherche une solution approchée à une équation exacte. Dans notre travail on utilisera le logiciel HEAT qui est un logiciel informatique de transfert de chaleur en régime dynamique.

III.1.3.d Méthode des quadripôles

On considère le cas d'un transfert unidirectionnel dans un mur d'épaisseur e .

L'équation de chaleur s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (\text{III-12})$$

En appliquant la transformation de Laplace à l'équation on obtient :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{p}{a} \theta \quad \text{si } T(x,0) = 0 \quad (\text{III-13})$$

Avec $\theta(x, p)$ la transformée de Laplace de $T(x, t)$.

La transformée de Laplace du flux surfacique en un point quelconque du mur s'écrit :

$$\varphi(x, p) = -\lambda \frac{d\theta}{dx}(x, p) \quad (\text{III-14})$$

En résolvant ce système d'équations on aboutit à [53], [54] :

$$\begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ \varphi(0, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(qe) & \frac{1}{\lambda q} \sinh(qe) \\ \lambda q \sinh(qe) & \cosh(qe) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta(e, p) \\ \varphi(e, p) \end{bmatrix} \quad (\text{III-15})$$

$$\text{Avec } q^2 = \frac{p}{a}$$

La matrice M est nommée matrice quadripolaire, son déterminant est égal à 1, elle est donc inversible et la relation réciproque s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \theta(e, p) \\ \varphi(e, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(qe) & -\frac{1}{\lambda q} \sinh(qe) \\ -\lambda q \sinh(qe) & \cosh(qe) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ \varphi(0, p) \end{bmatrix} \quad (\text{III-16})$$

L'échange convectif est donné par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} \theta_\infty \\ \varphi_\infty \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{h} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta(0, p) \\ \varphi(0, p) \end{bmatrix} \quad (\text{III-17})$$

Avec θ_∞ la transformée de Laplace de T_∞ qui est la température de l'ambiance et φ_∞ la transformée de Laplace de : $\varphi_{t,\infty} = h.(T_\infty - T_{x=0})$

De même la résistance de contact entre 2 parois (paroi 1 et paroi 2) peut être représentée par :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III-18})$$

Un mur multicouche (bicouche dans ce cas) peut alors être représenté par le produit des différentes matrices quadripolaires [55]:

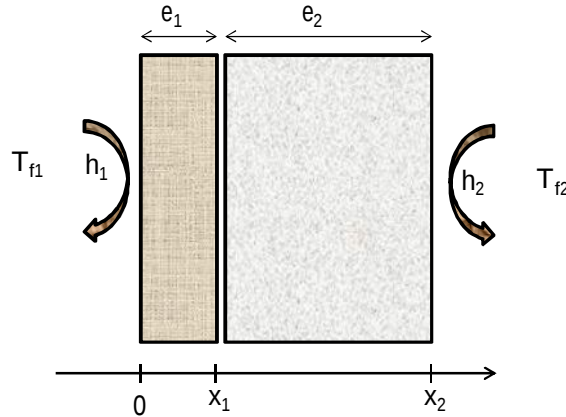


Figure III-6- Transfert thermique en régime transitoire dans une paroi bicouche

$$\begin{bmatrix} \theta_{f1} \\ \varphi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{h_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & R_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{h_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_{f2} \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III-19})$$

Avec $A_i = D_i = \cosh(q_i e_i)$; $C_i = \lambda_i q_i \sinh(q_i e_i)$; $B_i = \frac{\sinh(q_i e_i)}{\lambda_i q_i}$; et $q = \sqrt{\frac{p}{a_i}}$

III.2 Détermination des propriétés thermiques des matériaux (brique et mortier)

Afin de déterminer analytiquement le transfert thermique dans le mur, il est nécessaire de déterminer les propriétés thermiques des matériaux qui le constituent, à savoir la brique et le mortier. La conductivité thermique et la chaleur massique sont les propriétés requises afin de pouvoir déterminer le mode de transfert dans le mur.

III.2.1 Méthodologie expérimentale

Le dispositif expérimental est constitué de deux fluxmètres ayant une surface active de 0,05 x 0,15 m². La mesure de température est réalisée à l'aide de thermocouples de type T. Les sollicitations sont assurées par deux plaques échangeuses en aluminium qui sont reliées à des bains thermostatés. Le déplacement de la plaque supérieure est assuré par une vis sans fin, qui permet également de maintenir le système en place. Les échantillons sont enveloppés d'un mince film étanche et sont recouverts de graisse afin de réduire les résistances de contact fluxmètres/échantillon.

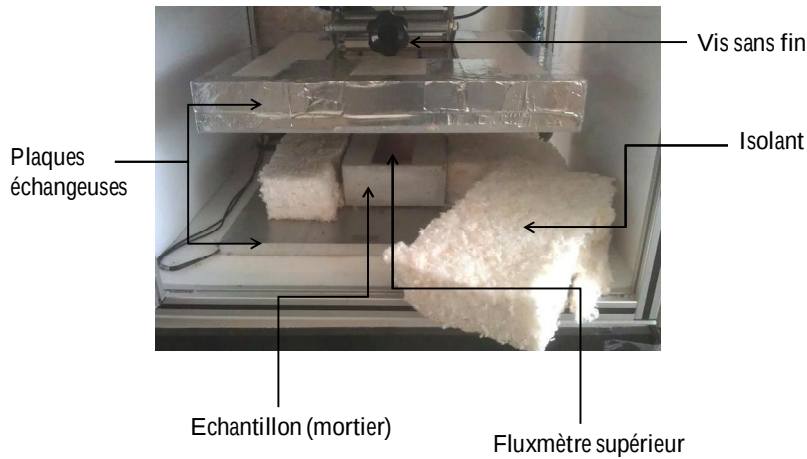
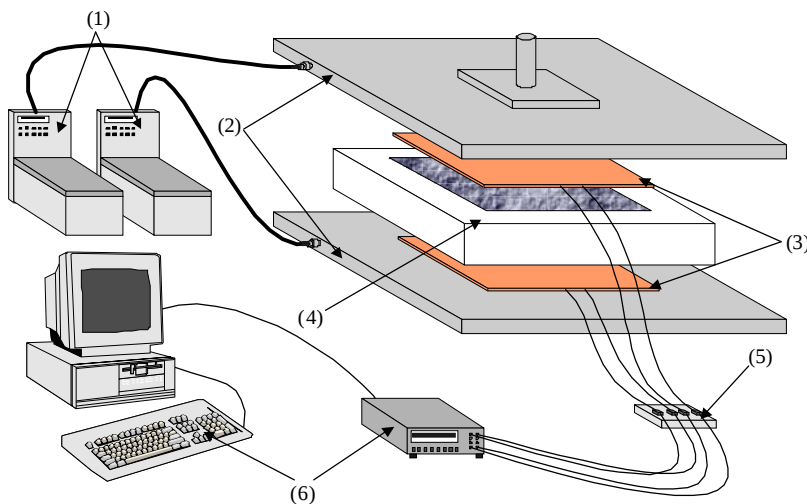


Figure III-7- Dispositif de caractérisation des matériaux

Enfin, l'acquisition automatique des mesures est réalisée par à un micro-ordinateur qui commande un multimètre numérique.



- | | |
|------------------------|---|
| (1) Bains thermostatés | (4) Echantillon et ceinture isolantes |
| (2) Plaques échangeuse | (5) Boîte de jonction et référence de température |
| (3) Fluxmètres | (6) Micro-ordinateur et multimètre |

Figure III-8- Schéma du dispositif expérimental de caractérisation des matériaux

Les matériaux testés sont isolés latéralement par de la laine de mouton afin de diriger le flux dans une seule direction dans le matériau testé et d'éviter les pertes latérales (Figure III-7). Les propriétés qui seront mesurées sont la conductivité thermique « λ » et la chaleur massique « c_p ».

III.2.1.a Détermination de la conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau est directement liée à sa résistance thermique ; cette dernière traduit l'opposition que présente le matériau au passage de la chaleur. La conductivité thermique est donc intuitivement liée à la notion de transfert de chaleur au sein du milieu.

La méthode consiste à soumettre un échantillon d'épaisseur « e » à un gradient de température, de manière à imposer un transfert de flux du côté chaud vers le côté froid.

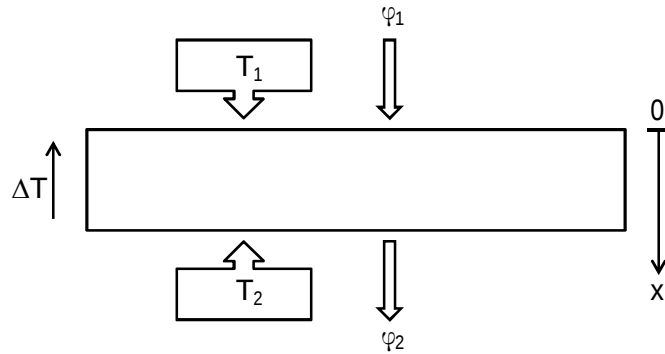


Figure III-9- Système conductif unidirectionnel soumis à un gradient de température ($\theta_1 > \theta_2$)

On mesure simultanément le flux thermique et la température sur les deux faces de l'échantillon. La loi de Fourier appliquée à un système unidirectionnel en régime permanent exprime la relation entre le flux et la différence de températures.

$$\varphi_1 = \frac{\Delta T}{R} \text{ et } \varphi_2 = \frac{\Delta T}{R} \quad (\text{III-20})$$

L'utilisation des grandeurs généralisées $\Sigma\varphi$ et $\Delta\theta$ permet de relier les flux sur les deux faces par la somme des expressions précédentes, telle que :

$$\Sigma\varphi = \frac{2}{R} \Delta T \quad (\text{III-21})$$

L'intérêt de cette méthode réside dans la réduction du temps de mesure par rapport à des méthodes en régime permanent. On montre en effet que la somme des flux se stabilise très rapidement et permet d'effectuer la mesure sans attendre le régime permanent (Figure III-10).

La conductivité thermique est déterminée dès lors que la somme des flux est stable.

$$R = \frac{2\Delta T}{\Sigma\varphi} \text{ et } \lambda = \frac{e}{R} \quad (\text{III-22})$$

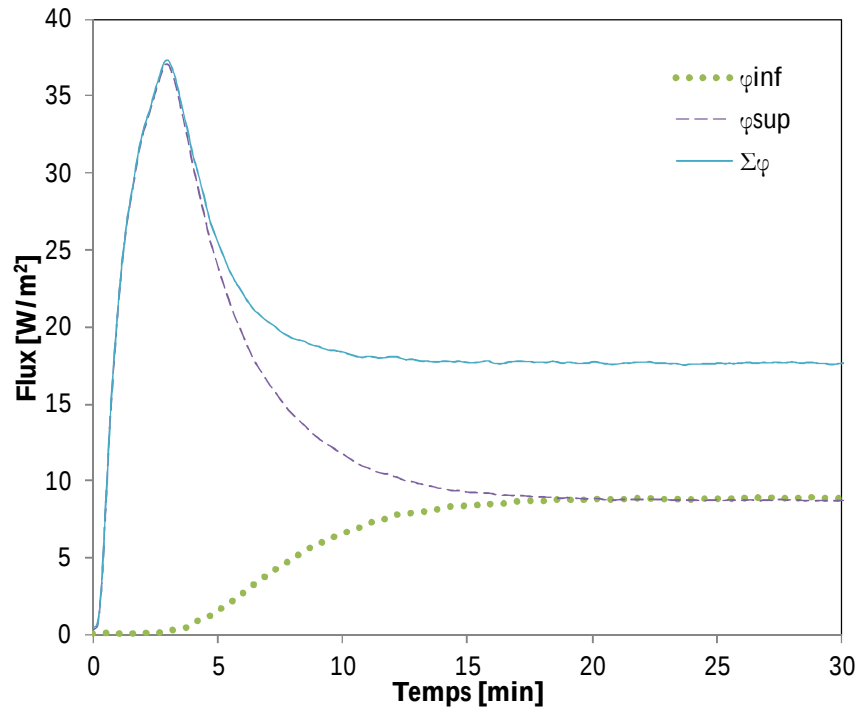


Figure III-10- Evolution des flux au cours de la détermination de la conductivité thermique

III.2.1.b Détermination de la chaleur massique

La chaleur massique traduit la capacité d'un matériau à emmagasiner la chaleur. La méthode consiste à effectuer une étude du bilan d'énergie entre deux états d'équilibre.

A partir d'un état initial ($t_{initial}$), stable, en régime permanent, on impose une variation de température par changement de la consigne sur l'une ou l'autre des faces, ou sur les deux. La température moyenne de l'échantillon ($\Sigma\theta$) va évoluer, ainsi que les flux sur chaque face (Figure III-11). On attend le rétablissement du régime permanent (t_{final}), dans lequel le matériau a retrouvé un nouvel état stable, associé à une nouvelle température moyenne ($\Sigma\theta_{finale}$).

Durant la phase transitoire, l'échantillon stocke ou déstocke une énergie Q sous forme calorifique, selon que sa température augmente ou diminue. Cette énergie est liée à la différence des flux selon la relation :

$$Q = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt \quad (III-23)$$

On peut également la relier aux températures moyennes $\Sigma T_{initiale}$ et ΣT_{finale}

$$Q = C \cdot \frac{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}}{2} \quad (III-24)$$

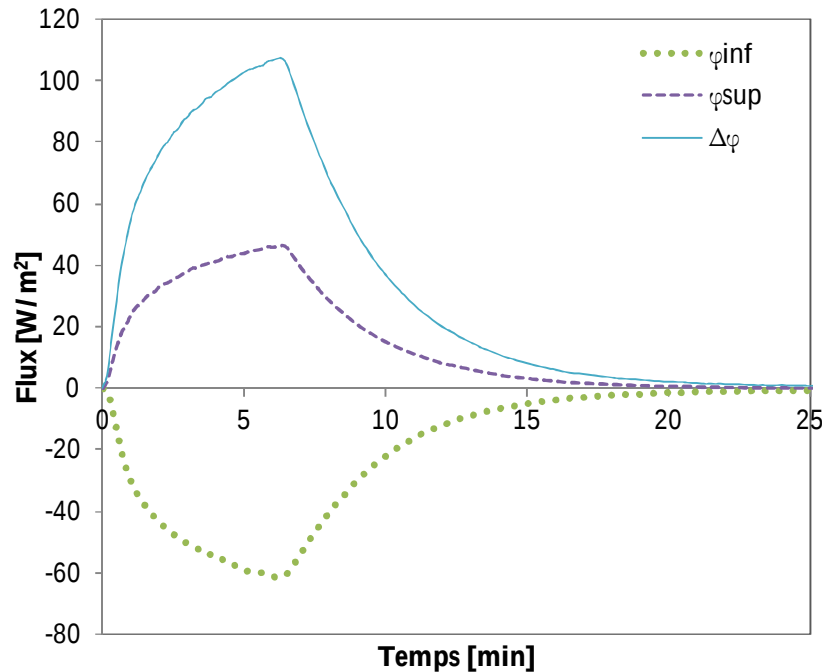


Figure III-11- Evolution des flux au cours de la détermination de la chaleur massique

$\Sigma\theta_{initiale}$ correspond à la somme des températures sur chaque face à l'instant $t_{initial}$. $\Sigma\theta_{finale}$ correspond à la somme des températures sur chaque face à l'instant t_{finale} .

On calcule alors la capacité thermique de l'échantillon :

$$C = 2 \frac{\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt}{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}} \quad (III-25)$$

Connaissant la masse volumique de l'échantillon et son épaisseur, on détermine la chaleur massique selon l'équation (III-26).

$$c_p = \frac{C}{\rho \cdot e} \quad (III-26)$$

III.2.2 Propriétés de la brique

La brique constituant les murs anciens est une brique pleine de terre argileuse cuite au four, elle est également employée comme matériau de parement et donne aux bâtis anciens de la région leur caractère particulier. Les briques utilisées dans les bâtis anciens sont parallélépipédiques de dimension (6 cm x 11 cm x 22 cm). Afin de déterminer les propriétés thermiques de ce matériau, un bloc de brique a été expérimenté.



Figure III-12- Bloc de brique expérimenté

La masse volumique de l'échantillon est : $\rho = \frac{m}{V} = \frac{2,170}{0,06 \times 0,105 \times 0,21} = 1640 \text{ kg} / \text{m}^3$

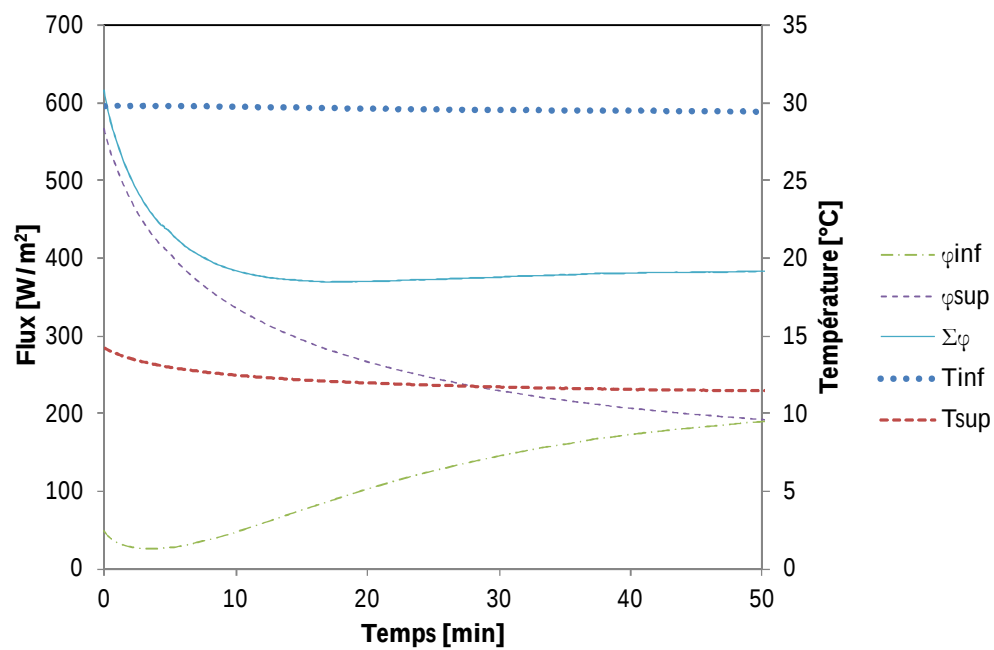


Figure III-13- Détermination de la conductivité thermique de la brique

D'après l'équation (III-22) et la Figure III-13, on peut déterminer la conductivité de la brique :

$$R = \frac{2\Delta T}{\Sigma\varphi} = \frac{2 \times 18,15}{387} = 0,0938 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \Rightarrow \lambda = \frac{e}{R} = \frac{0,065}{0,0938} = 0,69 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$$

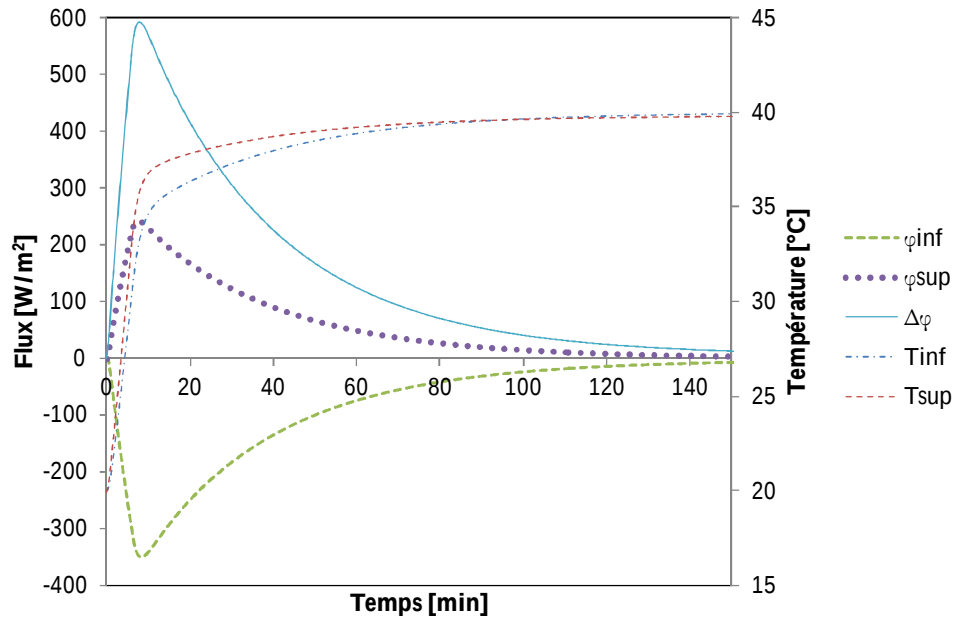


Figure III-14- Détermination de la chaleur massique de la brique

D'après les équations (III-25) et (III-26), et la Figure III-14, on peut déterminer la chaleur massique de la brique:

$$C = 2 \cdot \frac{\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\phi \cdot dt}{\Sigma T_{initial} - \Sigma T_{final}} = \frac{2 \times 1366770}{39,79} = 68699 \text{ J.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_p = \frac{C}{\rho \cdot e} = \frac{68699}{1630 \times 0,06} = 702,5 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

III.2.3 Propriétés du mortier

Le mortier est un mélange de liant (dans le cas du mur expérimental on utilise le ciment) et d'agréats (du sable), et de l'eau. Il est utilisé comme élément de liaison entre les briques. Afin de déterminer les propriétés thermiques de ce matériau, un bloc de mortier de dimensions (7,5 cm x 17 cm x 23 cm) a été moulé.

La masse volumique de l'échantillon est : $\rho = \frac{m}{V} = \frac{5,464}{0,075 \times 0,17 \times 0,23} = 1863 \text{ kg/m}^3$



Figure III-15- Bloc de mortier expérimenté

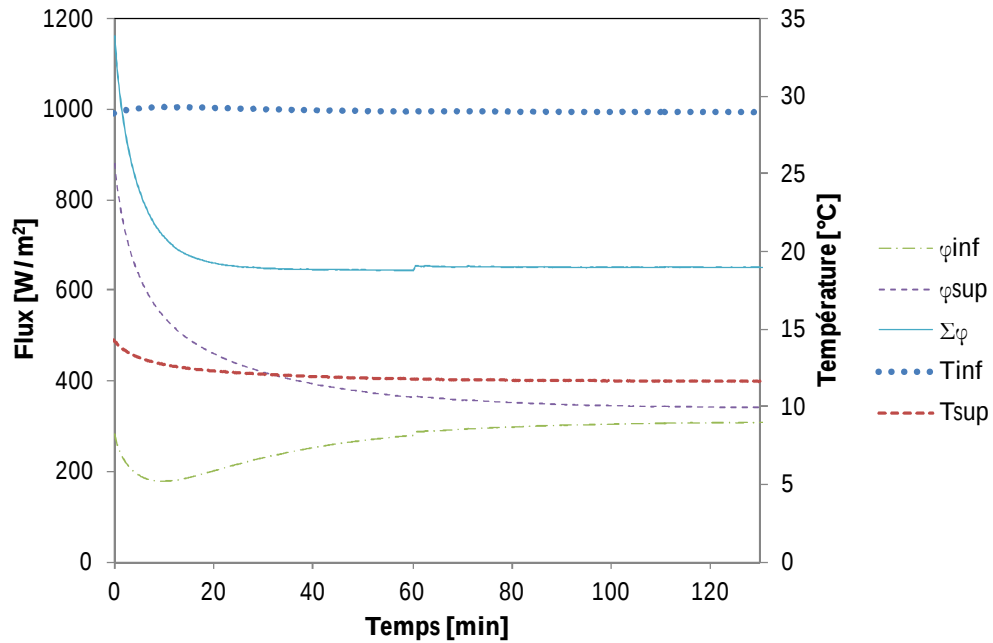


Figure III-16- Détermination de la conductivité thermique du mortier

En se servant de l'équation (III-22) et la Figure III-16, on peut déterminer la conductivité du mortier ; de même, les équations (III-25) et (III-26), et la Figure III-17, permettent de déterminer sa chaleur massique.

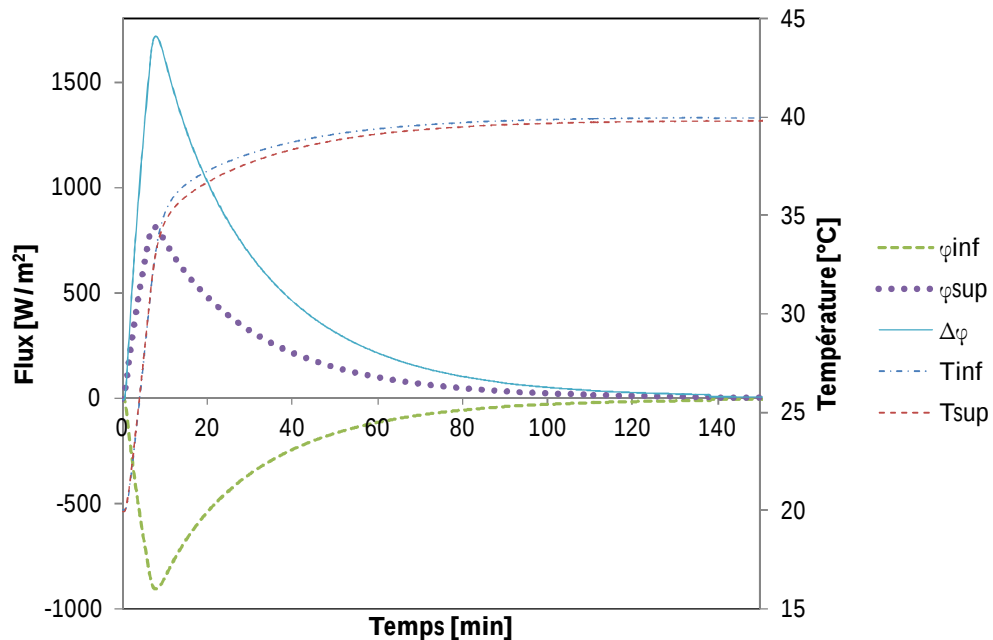


Figure III-17- Détermination de la chaleur massique du mortier

Les propriétés de la brique et du mortier serviront pour le calcul des propriétés thermiques équivalentes du mur, elles sont reportées dans le tableau suivant :

Matériau	Masse volumique (kg.m^{-3})	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Chaleur massique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
Brique	1640	0,69	702,5
Mortier	1863	1,41	1076,5

Tableau III-1- Propriétés thermo physiques de la brique et du mortier

III.3 Caractérisation expérimentale du mur

Pour valider les différents modèles théoriques présentés précédemment, il est pertinent de les comparer aux résultats expérimentaux. Pour ce faire, on a construit un mur en brique semblable à celui qui sera simulé. Les briques sont liées par des joints en mortier.



Figure III-18-Mur en cours de construction

Les thermocouples insérés dans le mur sont au nombre de 14 (7 placés dans la 6^{ème} couche et 7 autres dans la 7^{ème} couche).

x (cm)	0	5,25	11	16,75	22,5	28,25	33,5
Capteur	Mur int.	5; 7; 8	4; 6; 9	3 ; 10	2; 11; 13	1; 12; 14	Mur ext.

Tableau III-2- Disposition des différents capteurs dans le mur

III.3.1 Capteurs et instrumentation :

III.3.1.a Les capteurs de flux :

Un capteur de flux est constitué par la mise en série de cellules thermoélectriques identiques.

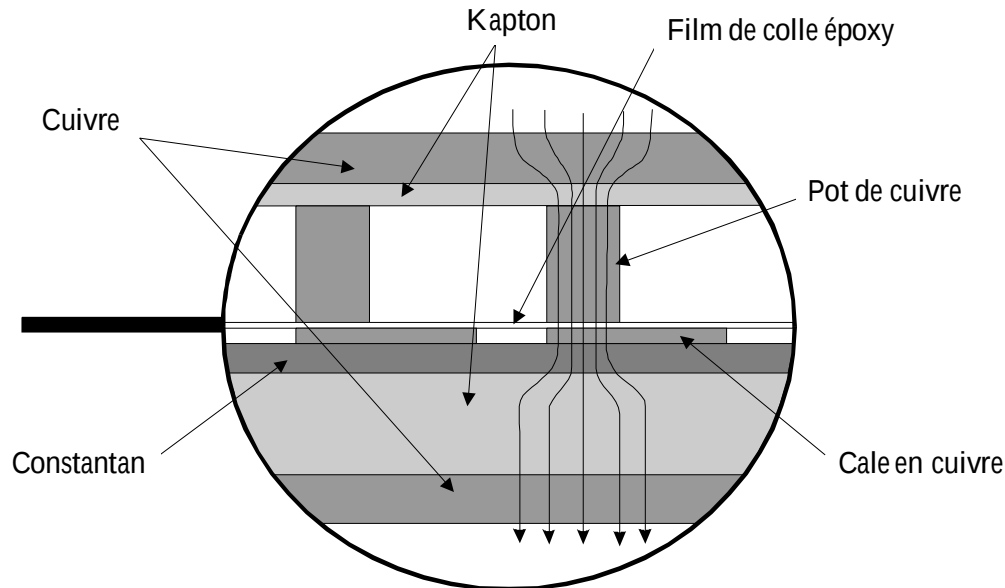


Figure III-19- Coupe d'une cellule de fluxmètre

Le concept repose sur le couplage thermoélectrique dans une couche bimétallique par l'utilisation de circuits imprimés. Le dépôt de plots et de cales de cuivre sur un ruban continu de constantan provoque la constriction des lignes de flux, en leur offrant un passage privilégié compte tenu de la forte conductivité thermique du cuivre. Par effet Seebeck, une force électromotrice est générée aux bornes de la cellule. Elle est directement liée à la valeur du flux traversant la cellule. Les avancées technologiques ont fait évoluer les possibilités de fabrication des fluxmètres permettant ainsi de produire des fluxmètres avec des sensibilités sans cesse accrues. Le principal avantage de ce type de capteur pour les applications est d'avoir une épaisseur très faible (≈ 0.3 mm), qui permet de minimiser la perturbation induite par sa présence et d'obtenir un temps de réponse inférieur à la seconde.

La grandeur délivrée par le fluxmètre est une différence de potentiel directement proportionnelle au flux le traversant. La mesure du flux nécessite de connaître la fonction liant les deux grandeurs. Ceci amène à construire une courbe d'étalonnage. Nous avons choisi une procédure dite « à flux nul » (Figure III-20).

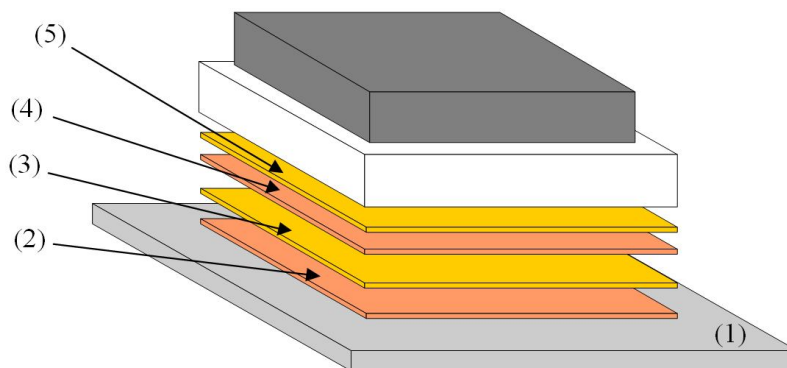


Figure III-20- Dispositif d'étalonnage des fluxmètres à flux nul

Le fluxmètre à étalonner (2) est placé sur un puits thermique (1). La sollicitation en flux est assurée par une résistance chauffante (3) plane de mêmes dimensions que le capteur. Bien qu'un isolant soit disposé sur l'ensemble du système, une partie de la puissance fournie est tout de même dissipée vers le haut sous formes de fuites que l'on détecte grâce au fluxmètre auxiliaire (4). La seconde résistance chauffante (5), pilotée par un régulateur PID, permet alors de compenser ces pertes en annulant le flux qui traverse le fluxmètre auxiliaire.

Lorsque la tension mesurée par ce second capteur est nulle, le fluxmètre à étalonner est traversé par la totalité de la puissance P délivrée par la première résistance. La procédure est répétée pour plusieurs puissances, de manière à couvrir une gamme représentative des valeurs rencontrées classiquement dans les applications du Génie Civil. La Figure III-21 montre un exemple de résultat obtenu lors de l'étalonnage, et permet de vérifier la linéarité de la réponse du capteur sur toute la gamme de puissance testée. Il s'agit d'un fluxmètre de surface $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$, et dont la sensibilité est de $22.9 \text{ mV} / (\text{W}/\text{m}^2)$. On constate que la réponse en tension du fluxmètre est proportionnelle à la densité de flux le traversant.

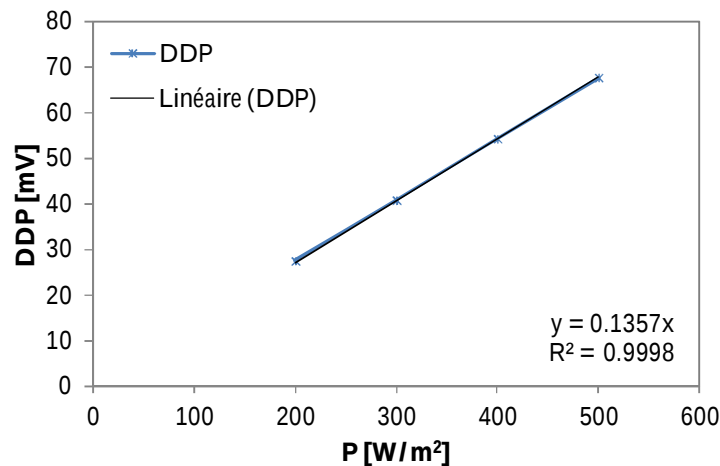


Figure III-21- Réponse en tension en fonction de la densité de flux

III.3.1.b Les capteurs de température :

Les mesures de températures ont été effectuées à l'aide de thermocouples de type T (cuivre-constantan). Le fonctionnement du thermocouple est basé sur l'effet Seebeck. L'effet thermoélectrique résulte de la différence de température aux jonctions de deux métaux différents.

Les deux métaux de natures différentes, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures T_1 et T_2 . Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions, $T_1 - T_2$. Les thermocouples ne mesurent pas une température, mais une différence de température. Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0°C). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur

(température ambiante, par exemple). La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique. Il est donc nécessaire de connaître la réponse du thermocouple utilisé en fonction de la température pour pouvoir relier la différence de potentiel électrique à la différence de température. La mesure passant par la détermination d'une différence de potentiel, sa précision dépend fortement du voltmètre utilisé.

En instrumentation industrielle, on appelle la jonction des deux métaux « soudure chaude » (cuivre et constantan dans notre cas) ; c'est celle qui sera exposée à la température à mesurer. L'autre, appelée « soudure froide », n'est autre que la connexion de la sonde thermocouple avec la centrale d'acquisition. C'est en fait un thermocouple « parasite » dont la différence de potentiel se soustrait à celle de la soudure chaude. Par construction, on placera cette soudure froide dans un milieu calorifugé et surtout équipé d'une régulation de température.

III.3.2 Description du dispositif et de la méthode



Figure III-22- Photo du montage expérimental (mur + caisson) avant assemblage

On mesure aussi la température à l'intérieur de caisson (thermocouple 15), la température de la face intérieure du mur (thermocouple 17), la température de la face extérieure du mur (thermocouple 19), la température de l'air ambiant (thermocouple 20), le flux traversant la face intérieure du mur (fluxmètre 16) et le flux traversant la face extérieure du mur (fluxmètre 18). L'ensemble des capteurs est relié à une centrale d'acquisition GL820 (Figure III-24).

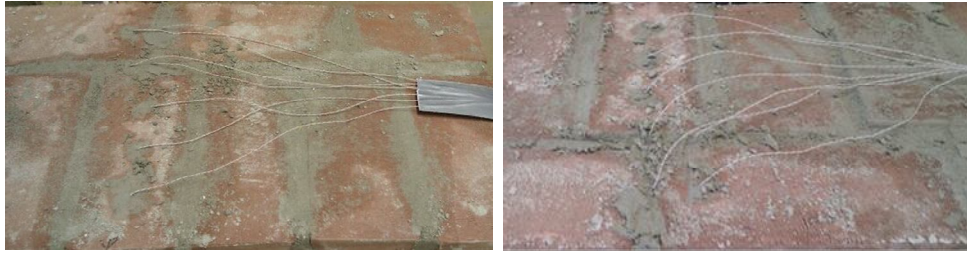


Figure III-23-Disposition des thermocouples dans les couches numéros 6 (à gauche) et 7 (à droite) du mur

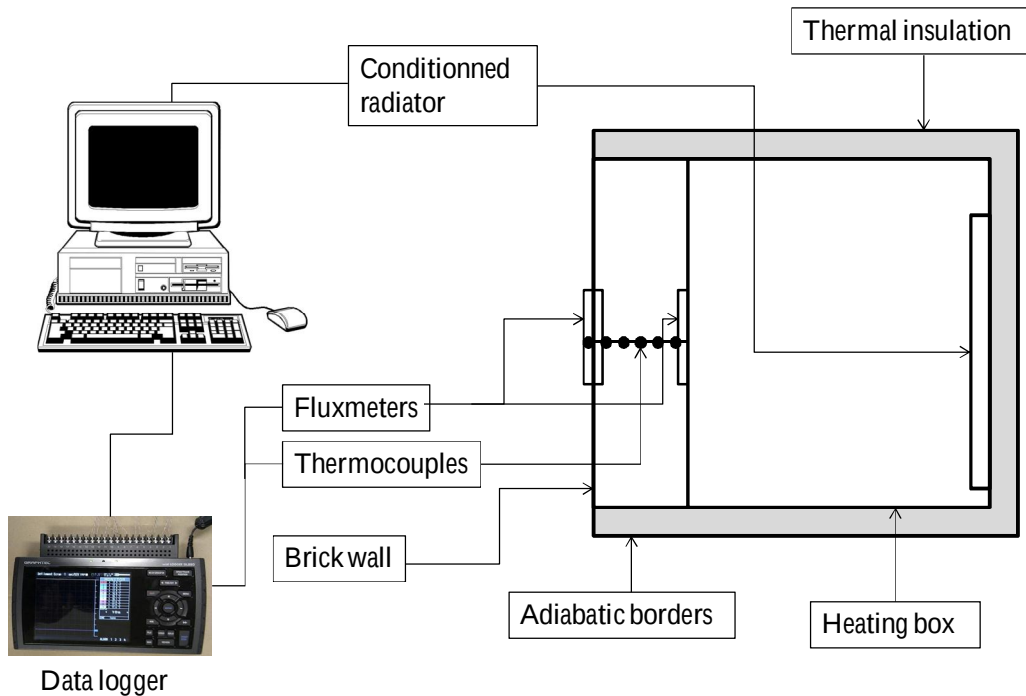


Figure III-24- Schéma du modèle expérimental (coupe transversale du caisson)

La méthode consiste à utiliser le régime permanent pour déterminer la résistance du système de chauffage notée R_c (résistance due à la différence entre la température de consigne et la température de l'air à l'intérieur du caisson), la résistance du mur notée R_w et les coefficients de transfert thermique par convection des deux côtés du mur (h_i et h_e).

Ensuite, on utilisera le régime harmonique établi afin de déterminer la capacité thermique du mur. L'intérêt de ce régime est que l'allure de température garde sa forme sinusoïdale à l'intérieur du caisson et que les équations de transfert de cette excitation sont relativement simples pour déterminer la capacité thermique du mur.

III.3.3 Etude du mur en régime permanent

III.3.3.a Méthode

En régime permanent on peut déterminer toutes les résistances du système d'après la

formule : $R = \frac{\varphi}{\Delta T}$, φ étant le flux traversant la paroi et ΔT la différence de température.

Dans le cas du régime permanent il n'y a pas d'emmagasinement de chaleur et donc la capacité du mur n'a aucune influence sur le transfert. La relation entre les différents paramètres thermiques peut être déduite par simple analogie de résistances électriques (Figure III-25).

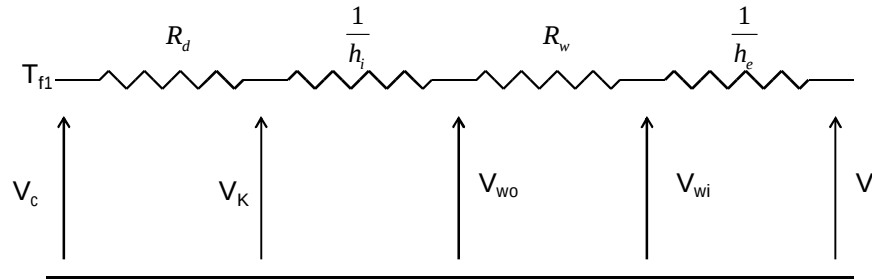


Figure III-25-Représentation électrique du montage expérimental en régime stationnaire

V_c représente la température de consigne imposée au fluide frigorigène, V_k la température du caisson, V_{wi} la température de la face intérieure du mur, V_{wo} la température de la face extérieure du mur et V_l la température de l'air ambiant au laboratoire.

$$V_k = V_c \left(1 - \frac{R_d}{R_t} \right) + \frac{R_d}{R_t} V_l \quad (\text{III-27})$$

$$V_{wi} = V_c \left(1 - \frac{R_d + \frac{1}{h_i}}{R_t} \right) + \frac{R_d + \frac{1}{h_i}}{R_t} V_l \quad (\text{III-28})$$

$$V_{wo} = V_c \left(1 - \frac{R_d + \frac{1}{h_i} + R_w}{R_t} \right) + \frac{R_d + \frac{1}{h_i} + R_w}{R_t} V_l \quad (\text{III-29})$$

$$|I| = \left| \frac{V_c - V_l}{R_t} \right| \quad (\text{III-30})$$

R_t est la résistance totale (somme de toutes les résistances du système) et I représente le flux traversant la surface intérieure du mur (côté du caisson).

III.3.3.b Résultats et discussion

La température du labo étant quasi constante, on varie la température du caisson en imposant des températures de consigne constantes de 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 35 ; 40 ; 45 ; 50 ; 55 et 60°C, et on attend l'établissement du régime permanent dans chaque cas. Les valeurs moyennes mesurées dans chaque cas sont reportées dans le Tableau III-3.

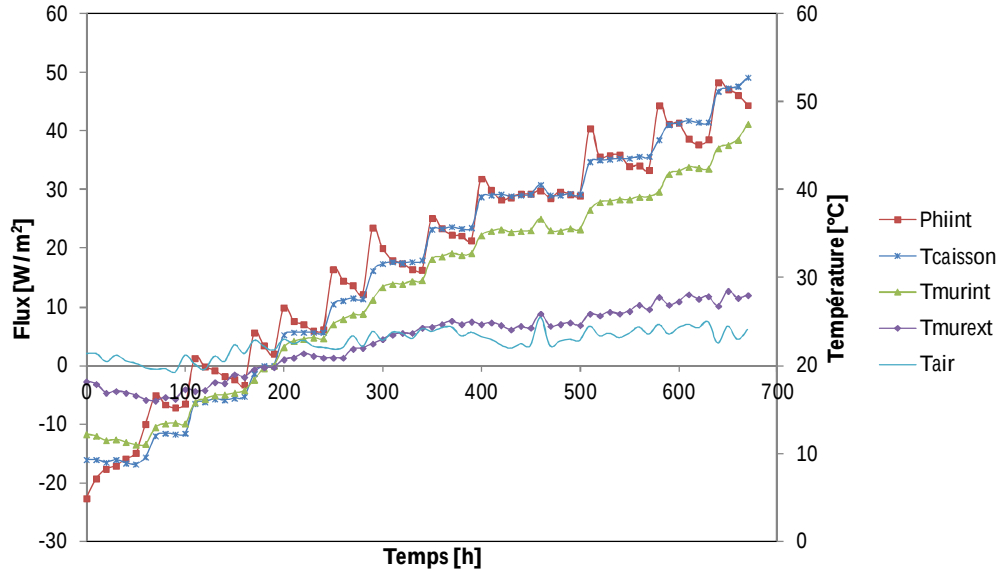


Figure III-26- Régime permanent pour différentes températures de consignes

T_c	T_k	T_i	T_{wi}	T_{wo}	φ_i
5	9	20,75	11,25	17	16,5
10	12,25	19,25	13,5	16,25	7
15	16,25	21	17	18,75	3
20	20	22	20	20	-2
25	24	22	23	21	-6
30	27,5	22,25	26	22	-12
35	31,75	23,5	29,5	23,75	-17
40	35,75	24,25	32,75	24	-22
45	39,5	23	35,5	24,5	-29
50	44	24	39	26,5	-33
55	48	24,5	42,5	28	-39
60	52	24	45,5	28	-45

Tableau III-3- Résultats des températures et des flux dans le cas du régime permanent

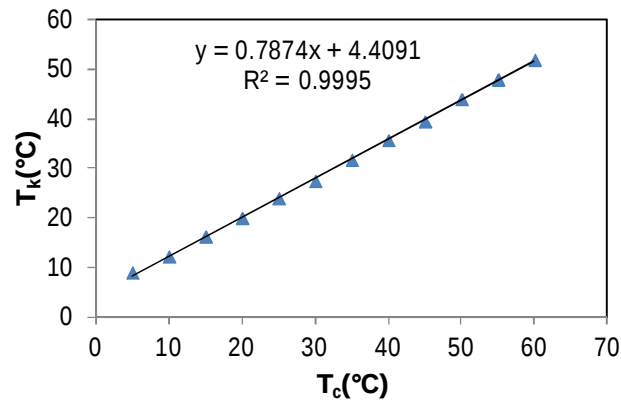


Figure III-27- Evolution de la température du caisson en régime permanent en fonction de la température de consigne

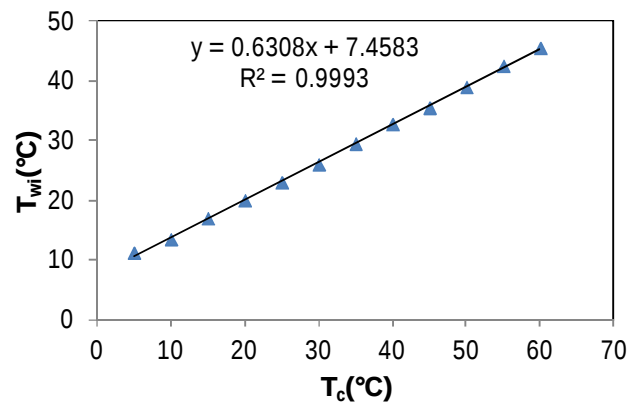


Figure III-28- Evolution de la température intérieure du mur en régime permanent en fonction de la température de consigne

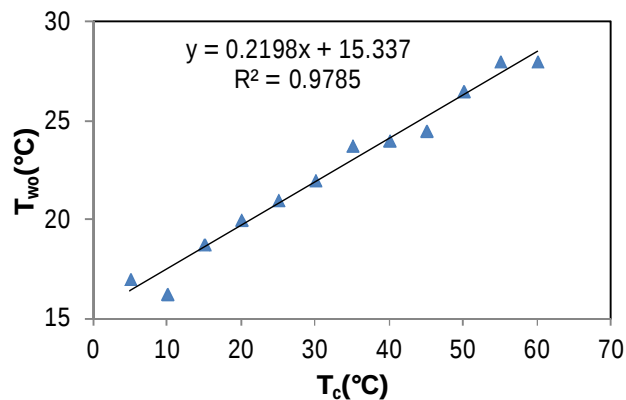


Figure III-29- Evolution de la température extérieure du mur en régime permanent en fonction de la température de consigne

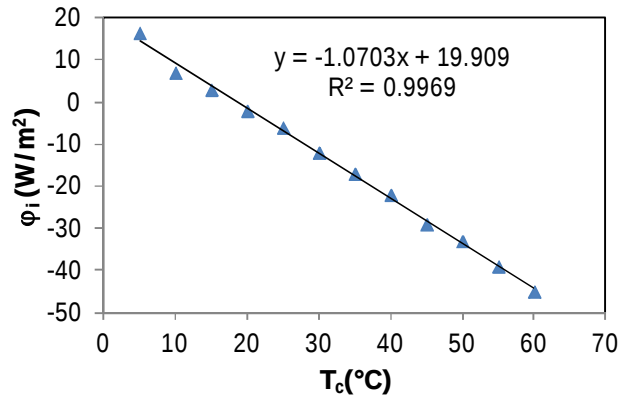


Figure III-30- Evolution du flux intérieur en régime permanent en fonction de la température de consigne

Les graphiques précédents (Figure III-27, Figure III-28, Figure III-29 et Figure III-30) montrent bien que les températures T_k , T_{wi} , T_{wo} et ϕ_i varient linéairement en fonction de la température de consigne T_c .

Pour déterminer les paramètres du système en régime permanent, à savoir R_c , h_i , R_w et h_e on fera l'analogie entre les coefficients directeurs des différentes droites obtenues et les équations théoriques :

La Figure III-30 et l'équation (III-30) donnent : $\frac{1}{R_t} = 1,0703 \Rightarrow R_t = 0,9343 \text{ m}^2 \cdot K / W$

La Figure III-27 et l'équation (III-27) donnent :

$$1 - \frac{R_c}{R_t} = 0,7874 \Rightarrow R_c = 0,1986 \text{ m}^2 \cdot K / W$$

La Figure III-28 et l'équation (III-28) donnent :

$$1 - \frac{R_c + \frac{1}{h_i}}{R_t} = 0,6308 \Rightarrow h_i = 6,833 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot K$$

La Figure III-29 et l'équation (III-29) donnent :

$$1 - \frac{R_c + \frac{1}{h_i} + R_w}{R_t} = 0,2198 \Rightarrow R_w = 0,3840 \text{ m}^2 \cdot K / W$$

On peut alors déduire h_e :

$$h_e = \frac{1}{R_t - R_c - \frac{1}{h_i} - R_w} = 4,870 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot K$$

Ainsi, dans la suite de notre modélisation du caisson, on utilisera les valeurs ci-dessus pour la résistance thermique du mur R_w et les coefficients de transfert thermique par convection des deux côtés du mur h_i et h_e . La valeur de R_c dépend uniquement du système de climatisation utilisé à l'intérieur du caisson, elle ne servira pas dans l'étude du mur dans ce qui suit mais sa détermination sert à montrer que la température de consigne et celle du caisson sont très différentes.

III.3.4 Etude du mur en régime harmonique établi

Pour déterminer la capacité thermique du mur, on applique des sollicitations de température de consigne sinusoïdale d'amplitude 20°C , de température moyenne 40°C , et de période 24h sur la face collée au caisson.

Ainsi, en considérant les conditions aux limites Dirichlet (températures connues sur les surfaces de part et d'autre du mur) on peut, par méthode inverse, déterminer la diffusivité thermique du mur, et en déduire sa capacité thermique (sa conductivité thermique étant déjà déterminée).

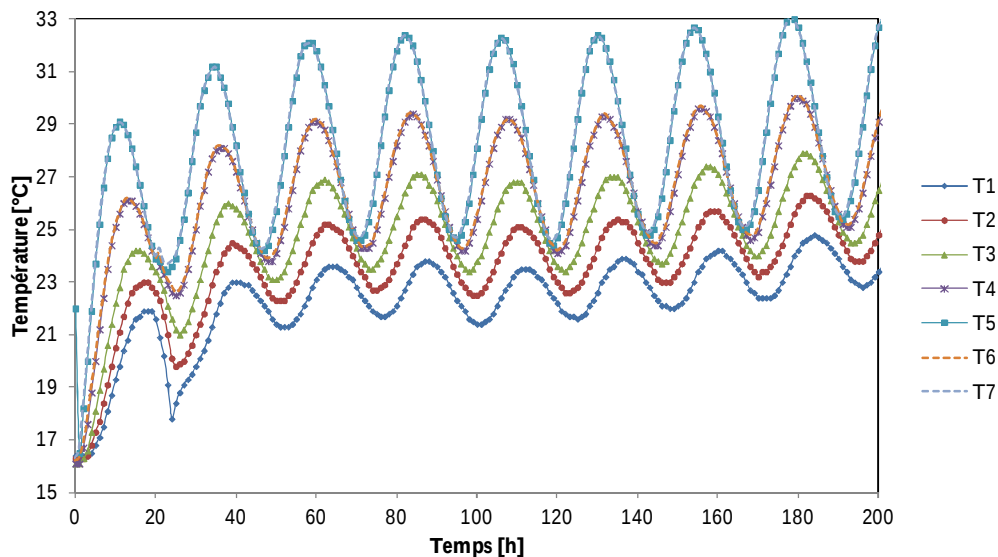


Figure III-31- Etablissement du régime harmonique dans le mur

Le mur a besoin de près de deux périodes pour atteindre son régime harmonique établi (Figure III-31). On peut vérifier graphiquement que les thermocouples situés à une même épaisseur (5 et 7) et (4 et 6) donnent des courbes de température confondues.

Les températures T_1 à T_7 représentent les valeurs affichées par les thermocouples 1 à 7 qui sont insérés dans la couche numéro 6 du mur (voir tableau 1). On peut aussi vérifier que les thermocouples insérés dans la 7^{ème} couche (thermocouples numérotés 8 à 14) donnent des variations identiques à celles des thermocouples de la 6^{ème} couche.

Le profil sinusoïdal est bien conservé par tous les thermocouples (Figure III-32). Bien que la température ambiante dans le laboratoire soit constante, la température surfacique

du mur du côté du laboratoire est sinusoïdale mais de faible amplitude ; on supposera donc que le mur est soumis à des excitations surfaciques de températures sinusoïdales connues (mesurées par les thermocouples placés sur les deux surfaces du mur).

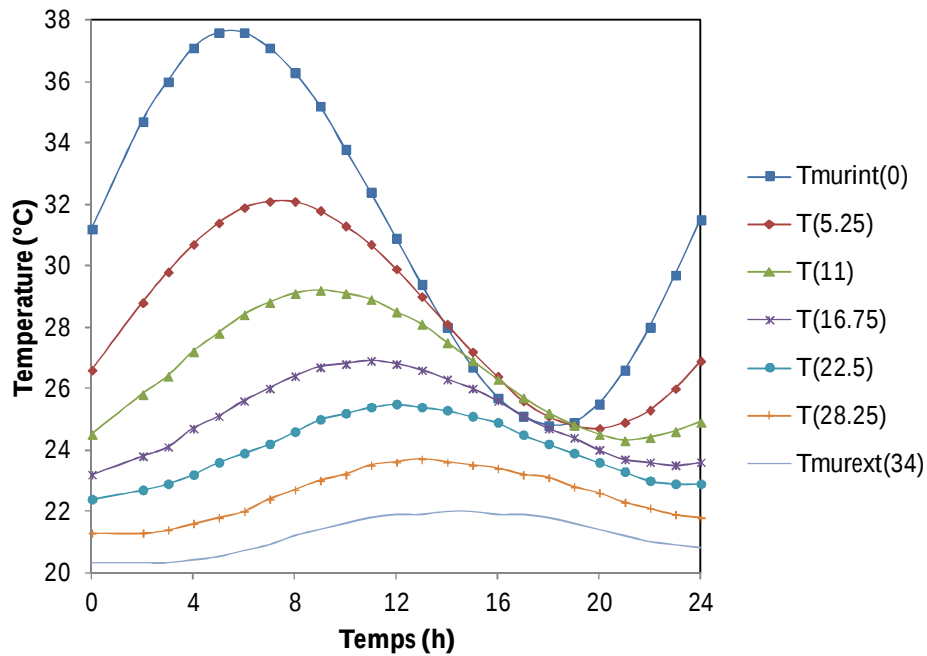


Figure III-32- Evolution de la température dans le mur pour diverses profondeurs (valeurs expérimentales)

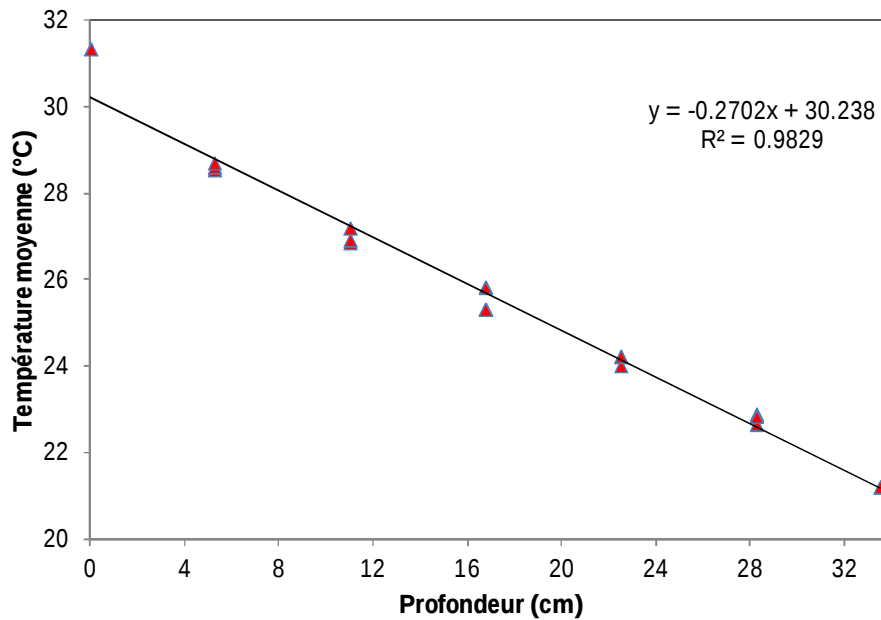


Figure III-33- Température moyenne du mur pour diverses profondeurs

En traçant les températures moyennes en fonction de l'abscisse considérée on remarque que la courbe est une droite décroissante (Figure III-33). On peut ainsi déterminer la température moyenne dans le mur pour n'importe quelle abscisse qu'on notera $T_m(x)$.

III.3.4.a Approximation du mur semi-infini

Par première approximation de mur semi-infini, la température $T(x,t)$ peut s'écrire :

$$T(x,t) = T_m(x) + \Delta T \cdot e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \cdot \sin\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \quad (\text{III-31})$$

$T_m(x)$ étant la température moyenne à l'abscisse considérée et $a = \frac{\lambda}{\rho c}$; λ étant déjà calculée dans la partie « régime permanent » on peut alors calculer la capacité thermique volumique $C = \rho c$ une fois qu'on connaît « a ».

L'abscisse x a comme origine l'intérieur du caisson et est dirigée vers l'extérieur (ambiance du laboratoire).

Pour calculer « a » on choisit tout d'abord un point quelconque du mur dont on connaît l'évolution temporelle de température puis on détermine graphiquement l'amortissement ξ et le déphasage ψ . Puis par analogie avec l'équation de $T(x)$ on peut déterminer la diffusivité « a » du mur [56].

Pour déterminer graphiquement l'amortissement ξ et le déphasage ψ on prend l'ensemble des points sur une période puis on détermine les maximums pour la température de la surface intérieure du mur $T(x=0,t)$ et du mur pour l'abscisse x_i choisi $T(x=x_i,t)$. On les notera $T_{\max,0}$ et $T_{\max,xi}$. Leurs abscisses respectives sont $t_{\max,0}$ et $t_{\max,xi}$.

Le déphasage est donc $\Psi = \frac{2\pi}{T}(t_{\max,xi} - t_{\max,0})$, T étant la période des oscillations (24h).

$$\Psi = x_i \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \text{ avec } \omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow a = \left(\frac{x_i}{\Psi}\right)^2 \frac{\omega}{2} \quad (\text{III-32})$$

De même on peut vérifier la valeur de a par l'équation de l'amortissement :

$$\xi = e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2a}}} = \frac{T_{\max,xi} - T_{\text{moy},xi}}{T_{\max,0} - T_{\text{moy},0}} \Rightarrow a = \left| \frac{x_i^2 \cdot \omega}{2(\ln(\xi))^2} \right| \quad (\text{III-33})$$

Cependant cette méthode a des limites ; en effet la méthode du mur semi-infini est une simplification du cas du mur fini où la température à une date t et en une profondeur x s'écrit [57]:

$$T(x, t) = T_m(x) + \Delta T_i \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & \exp \left[- \left[(2n+1) \frac{e}{2} + (-1)^n \cdot \left(x + \frac{e}{2} \right) \right] \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \times \\ & \sin \left[\omega t - \left[(2n+1) \frac{e}{2} + (-1)^n \cdot \left(x + \frac{e}{2} \right) \right] \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \phi \right] \end{aligned} \right\} \quad (\text{III-34})$$

III.3.4.b Méthode du mur fini

Dans la suite on supposera le mur soumis à deux sollicitations sinusoïdales de part et d'autre dont les équations sont déterminées à partir des courbes expérimentales. La température résultante des deux sinusoïdes à l'abscisse x et au temps t s'écrit (voir l'annexe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

$$T(x, t) = T_m(x) + \Delta T_i \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & \exp \left[- \left[(2n+1) \frac{e}{2} + (-1)^n \cdot \left(x + \frac{e}{2} \right) \right] \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \times \\ & \sin \left[\omega t - \left[(2n+1) \frac{e}{2} + (-1)^n \cdot \left(x + \frac{e}{2} \right) \right] \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \end{aligned} \right\} + \Delta T_e \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & \exp \left[- \left[(2n+1) \frac{e}{2} - (-1)^n \cdot \left(x + \frac{e}{2} \right) \right] \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \times \\ & \sin \left[\omega t - \left[(2n+1) \frac{e}{2} - (-1)^n \cdot \left(x + \frac{e}{2} \right) \right] \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \phi \right] \end{aligned} \right\} \quad (\text{III-35})$$

En posant $f(n) = (2n+1) \frac{e}{2} + (-1)^n \cdot \left(x + \frac{e}{2} \right)$ et $g(n) = (2n+1) \frac{e}{2} - (-1)^n \cdot \left(x + \frac{e}{2} \right)$, la température T(x,t) s'écrit :

$$T(x, t) = T_m(x) + \Delta T_i \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \exp \left[- f(n) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \cdot \sin \left[\omega t - f(n) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \right\} + \Delta T_e \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \exp \left[- g(n) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right] \cdot \sin \left[\omega t - g(n) \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + \phi \right] \right\} \quad (\text{III-36})$$

On pose $\alpha = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$ et on résout l'équation suivante pour T(x,t)=T_m(x) pour une abscisse x connue (une des abscisses des thermocouples).

Pour $x=0,11$ m, $\varphi=2,28$ rad et $T(x,t)=T_m(x)$ pour $t=3,29$ h (donc $\omega t=0,86$ rad).

α est donc la solution de l'équation :

$$6,55 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \{ \text{Exp}[-f(n) \cdot \alpha] \sin[0,86 - f(n) \cdot \alpha] \} + 0,8 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \{ \text{Exp}[-g(n) \cdot \alpha] \sin[0,86 - g(n) \cdot \alpha - 2,28] \} = 0 \quad (\text{III-37})$$

En $H(\alpha)$ la fonction présentée dans l'équation (III-37), et en traçant $H(\alpha)$, on peut déterminer α qui n'est autre que l'intersection de la courbe de $H(\alpha)$ avec l'axe des abscisses [58].

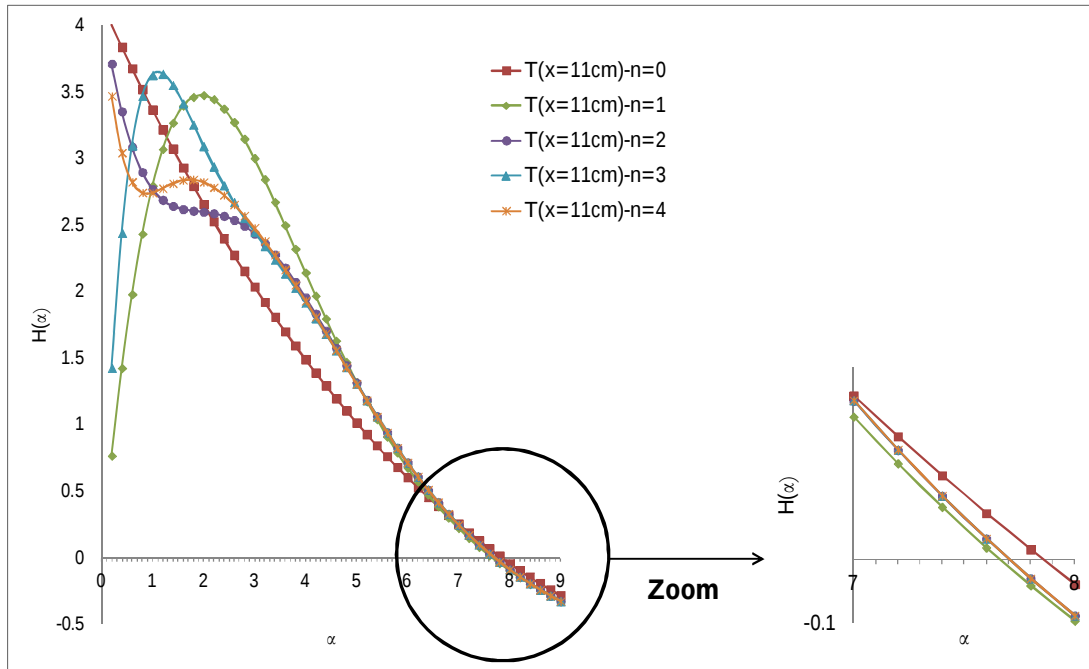


Figure III-34- Solution de $H(\alpha)$

On remarque que à partir de l'ordre 3 ($n=2$), les courbes se coupent sur l'axe des abscisses au point $\alpha \approx 7,7$; ce qui correspond à une diffusivité de $a=6,133 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ et donc une capacité thermique volumique de $C=1443693 \text{ J/m}^3\text{K}$.

De même, en répétant le même travail pour les abscisses $x=5,25$ cm ; $x=16,75$ cm ; $x=22,5$ cm et $x=28,25$ cm ; on trouve un $\alpha_{\text{moyen}} \approx 7,52$; ce qui correspond à une diffusivité de $a=6,430 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ et donc une capacité thermique volumique de $C_{\text{moyen}}=1376394 \text{ J/m}^3\text{K}=130 \text{ Wh/ m}^2\text{K}$.

III.3.5 Analyse d'incertitude

Il est intéressant de préciser les incertitudes sur les différents paramètres déterminés. Dans notre cas il y a 3 sources d'incertitudes : l'incertitude sur le flux, sur la température et sur la position des thermocouples insérés dans le mur.

III.3.5.a Incertitude sur le flux mesuré

L'étalonnage d'un fluxmètre sert à déterminer sa sensibilité et à étudier sa réponse en fonction des sollicitations thermiques. Le fluxmètre à étalonner est placé sur une plaque froide isotherme et recouvert d'une résistance chauffante de même dimension ; au-dessus, une couche isolante est installée de manière à réduire les pertes de chaleur. Le processus de calibration consiste en la mesure d'une puissance thermique totale fournie par la résistance chauffante (effet Joule).

Ainsi, la sensibilité est donnée par l'équation:

$$K = \frac{V \cdot S}{R \cdot I^2} \quad (\text{III-38})$$

V est la tension délivrée par le capteur, $R \cdot I^2$ est la puissance électrique fournie par la résistance, et S est la surface active du fluxmètre. La sensibilité est déterminée par l'étalonnage en ayant un flux thermique traversant la surface active du capteur sur une plaque à température constante. L'incertitude est alors donnée par:

$$\frac{\delta K}{|K|} = \left[2 \cdot \left(\frac{\delta I}{|I|} \right)^2 + \left(\frac{\delta R}{|R|} \right)^2 + \left(\frac{\delta S}{|S|} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{|V|} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{III-39})$$

Dans notre cas les incertitudes sur I, R et S sont négligées et le seul paramètre qui crée des incertitudes est la tension mesurée V. Les incertitudes relatives entre les flux de chaleur mesurées et les valeurs calculées sont faibles, environ 3% [59], [60].

III.3.5.b Incertitude sur la température mesurée

À partir des caractéristiques spécifiques de la centrale d'acquisition de données [61], l'incertitude sur la température mesurée est de 0,1% pour une gamme de température de [-100 ° C, 400 ° C].

III.3.5.c Incertitude sur la position des capteurs

L'équation (III-35) montre que la diffusivité thermique calculée dépend de la localisation des thermocouples; par conséquent, les incertitudes sur les emplacements des thermocouples influence l'incertitude globale de la capacité calorifique volumique obtenue. L'incertitude sur l'emplacement des thermocouples est supposée être de 3 mm. Pour cette valeur, l'incertitude de la capacité obtenue thermique est d'environ 6%. Les valeurs sont indiquées dans le tableau ci-après pour le cas du thermocouple placé à 11 cm (voir la méthode partie III.3.4.b):

x (cm)	10,7	11	11,3
α	7,5	7,7	7,93
a (m ² /s)	6,4609E-07	6,1296E-07	5,7792E-07
C (Wh/m ² K)	129,428742	136,423646	144,695351
Incertitude	5,1%		5,7%

Tableau III-4- Incertitude due à la position des thermocouples

III.4 Résultats théoriques en régime harmonique

III.4.1 Détermination des propriétés équivalentes du mur

Le mur qu'on retrouve dans les différentes typologies de bâtiments est un mur massif en brique ayant une épaisseur de 34 cm. Il est constitué de briques parallélépipédiques de dimensions (22 x 10,5 x 6 cm) disposées de façon alternée (Figure III-35) avec des joint de mortier d'épaisseur 1 cm.

La taille du mur représenté correspond à la taille du mur expérimental, lui-même construit en fonction de la taille du caisson.

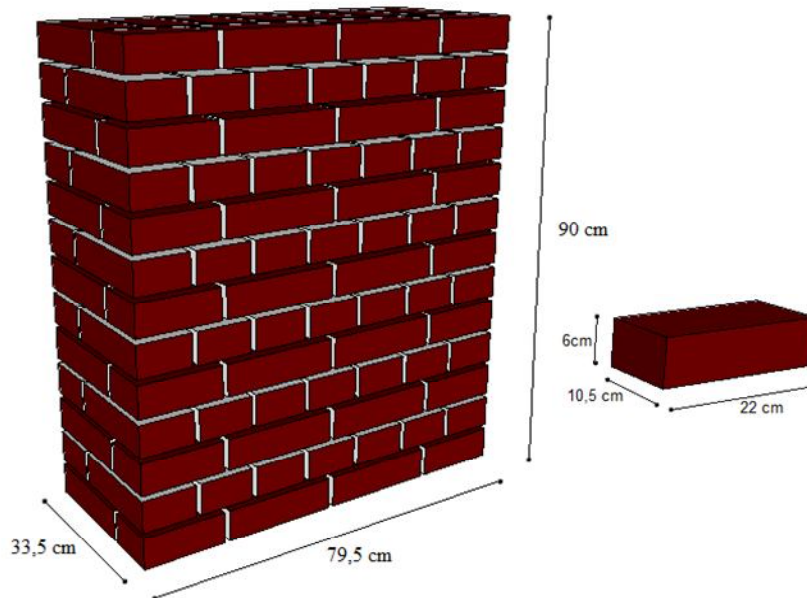


Figure III-35- Configuration du mur étudié

On détermine tout d'abord, à partir des propriétés de la brique et du mortier (partie III.2), les propriétés d'un mur homogène équivalent présentant les mêmes propriétés thermiques globales du mur réel qui est hétérogène (formé de brique et mortier).

Ensuite, on présentera les différentes méthodes théoriques qu'on utilisera : la méthode numérique via le logiciel HEAT 2/3, la méthode nodale via Matlab Simulink et la méthode des quadripôles à l'aide d'un programme C basé sur la norme ISO 13786.

Enfin, on fera la comparaison entre ces différentes méthodes qui seront comparées aussi aux résultats expérimentaux.

Pour calculer la résistance équivalente du mur on considère la plus petite unité répétitive constituant le mur et on calcule la résistance équivalente ainsi formée tout en tenant compte des dimensions du mur (Figure III-36) [62].

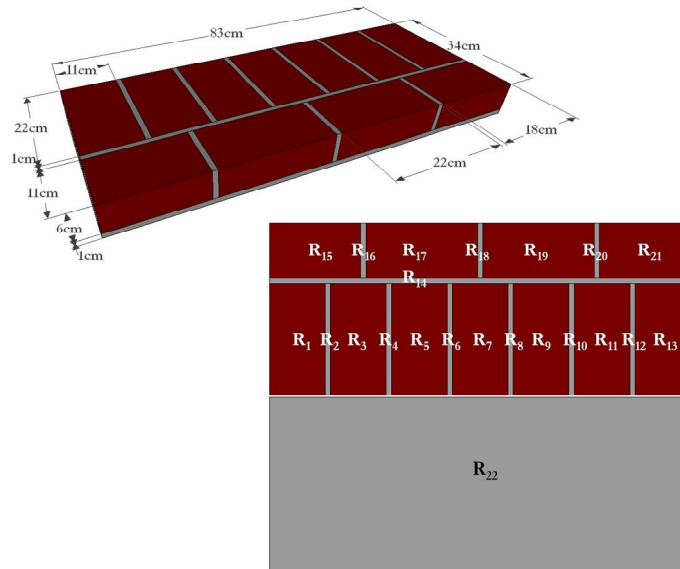


Figure III-36- Représentation d'une couche du mur

Le schéma électrique équivalent est donné par :

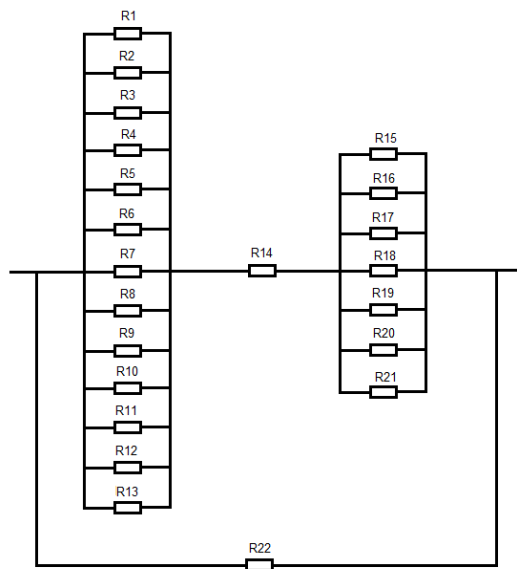


Figure III-37-Schéma électrique équivalent du mur

La valeur de la résistance thermique surfacique globale du mur hétérogène se détermine à partir du calcul de la résistance équivalente des différents éléments homogènes de brique et de mortier ; elle est donnée par :

$$R \approx \frac{142,79\lambda_b^2 + 255,55\lambda_m^2 + 505,63\lambda_b\lambda_m}{143,32\lambda_m^3 + 354,124\lambda_m^2\lambda_b + 123,4673\lambda_m\lambda_b^2} \quad (\text{III-40})$$

Dans l'équation (III-40) R étant la résistance thermique du mur exprimée en $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$, λ_b étant la conductivité thermique de la brique et λ_m la conductivité thermique du mortier.

Pour $\lambda_b=0,69 \text{ W/m.K}$ et $\lambda_m=1,41 \text{ W/m.K}$, la formule donne une valeur de $0,391 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$. En comparant cette valeur avec celle trouvée dans la partie III.3.3.b, on trouve un écart de 1,82%.

N.B. : La réglementation thermique propose pour les murs en brique de 33 cm une résistance thermique par défaut de $0,32 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$.

Les propriétés thermiques du mur 1D équivalent sont calculées comme suit :

$$\lambda_{eq} = \frac{e}{R_{eq}} = \frac{0,33}{0,391} = 0,844 \text{ W / m.K}$$

$$(\rho c)_{eq} = \frac{(\rho c)_{brique} \cdot V_{brique} + (\rho c)_{mortier} \cdot V_{mortier}}{V_{total}}$$

$$= 0,7818 \times 1,188 + 0,2182 \times 2,067 = 1,381 \text{ MJ / m}^3.\text{K}$$

En comparant cette valeur avec celle trouvée dans la partie III.3.4.b, on trouve un écart de 0,36%.

III.4.2 Présentation des méthodes utilisées

III.4.2.a Choix des conditions aux limites

Afin d'avoir une référence commune pour la comparaison du transfert thermique dynamique dans le mur étudié selon différentes méthodes, on adoptera dans toutes les méthodes utilisées les conditions aux limites suivantes : une face soumise à une condition aux limites de Fourier avec une température ambiante sinusoïdale de valeur moyenne 36°C et d'amplitude 13°C qui représente la température du caisson ; et l'autre face soumise à une condition aux limites de Fourier avec une température ambiante constante égale à 19°C qui représente la température d'ambiance du laboratoire.

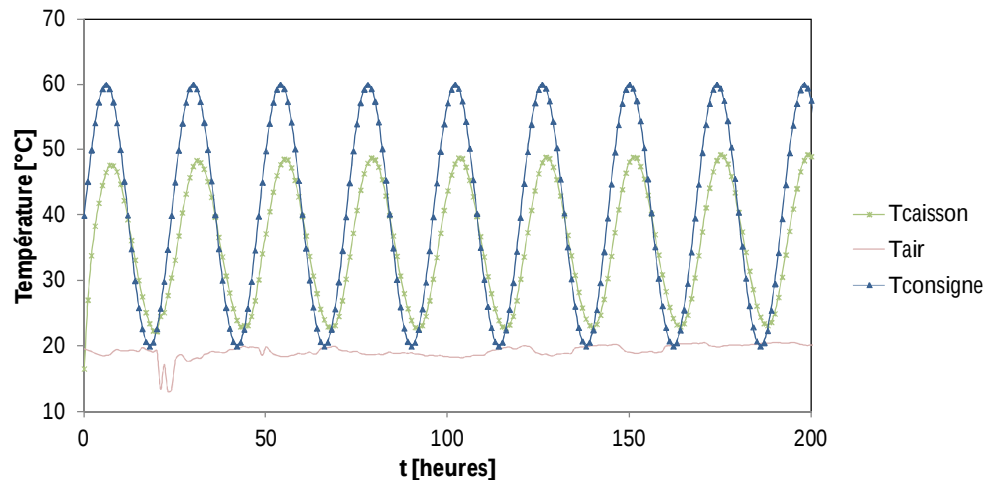


Figure III-38- Conditions aux limites expérimentales

III.4.2.b Méthode des quadripôles

On adoptera cette méthode avec un calcul réalisé à l'aide d'un programme C issu de la norme ISO 13786 (ISO). Le programme prend comme données d'entrée la période du signal, le nombre de couches (une seule dans notre cas), la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur massique de chaque couche, et les résistances thermiques surfaciques intérieures et extérieures.

```
(Inactive E:\TCWIN45\BIN\NONAME00.EXE)
Introduire les caracteristiques de la couche numero 1:
Conductivite thermique utile: lambda1=0.844
Capacite thermique massique: c1=1418
Masse volumique: Ro1=1000
Epaisseur de la couche: d1=0.33
Delta= 0.128
Xi= 2.579
Votre tableau caracteristique est le suivant:
Couche 1: Lambda1= 0.844 c1= 1418.000 Ro1= 1000.000 d
1= 0.330 Delta1= 0.128 Xi1= 2.579
Introduire les resistances thermiques superficielles:
La resistance interieure RS1=0.146
La resistance exterieure RS2=0.205
Les matrices de transfert thermique correspondantes a chaque couche sont les
suivantes:
Couche 1:
-5.605+i 3.497 0.152+i -0.688
59.867+i 13.213 -5.605+i 3.497
En tenant compte des resistances surfaciques, la matrice de transfert thermique
devient:
-17.877+i 0.788 3.911+i -1.520
59.867+i 13.213 -14.345+i 1.567
```

Figure III-39- Résultats du programme basé sur la méthode des quadripôles

La donnée de sortie du programme est la matrice de transfert, qui, dans notre cas est donnée par :

$$\begin{bmatrix} -17,877+0,788i & 3,911-1,520i \\ 59,867-13,213i & -14,345+1,567i \end{bmatrix}$$

L'admittance thermique est l'amplitude de la densité de flux thermique sur une face, résultant d'une unité d'amplitude thermique sur la même face, lorsque l'amplitude thermique sur l'autre face est égale à zéro, elle est donnée par :

$$Y_{11} = \frac{q_i}{\theta_i} \quad \text{pour } \theta_e = 0, \text{ alors } Y_{11} = -\frac{Z_{11}}{Z_{12}}$$

Dans notre cas $Y_{11} = 4,039 + 1,368i = 4,265.e^{0,327.i}$

Donc le flux est déphasé de $\frac{0,327}{2\pi}T$ par rapport à la température intérieure, et a une amplitude 4,265 fois celle de la température intérieure où T représente la période de la température intérieure (ici 24h).

En ajoutant à cela l'effet que la température intérieure n'est pas nulle, il faut retrancher alors du flux la quantité $\frac{T_e}{R_t}$ avec T_e la température ambiante du laboratoire ($\sim 19^\circ\text{C}$) et

R_t la résistance thermique totale du mur (qui prend en considération les résistances thermiques surfaciques).

III.4.2.c Résolution numérique (HEAT software)

On utilisera HEAT 2/3 afin de comparer les 2 modes de transfert 1D et 3D.

Dans le cas du transfert 1D on utilisera les propriétés équivalentes déterminées dans la partie (4.1)

Le mur composé de mortier et de brique a été construit numériquement à l'aide du logiciel HEAT3 et maillé en 75250 mailles (25 x 54 x 55).

Les données d'entrées pour les propriétés thermiques des matériaux (brique et mortier) sont celles déterminées expérimentalement (partie III.2) :

Matériau	Conductivité thermique [W/m ² .K]	Chaleur massique [J/kg.K]	Masse volumique [kg/m ³]
Brique	0,69	702,5	1640
Mortier	1,41	1076,5	1863

Tableau III-5- Propriétés thermiques de la brique et du mortier déterminées expérimentalement (partie III.2)

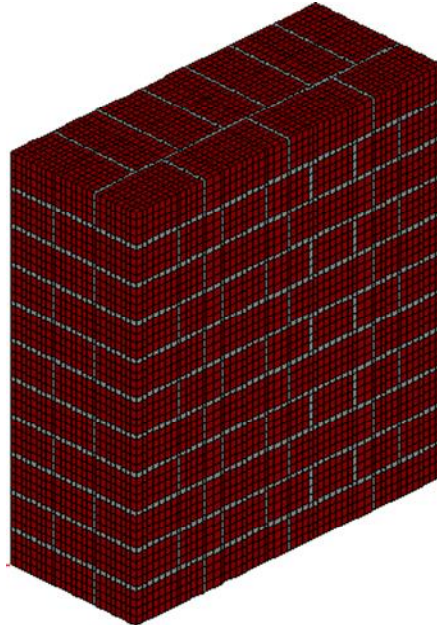


Figure III-40- Maillage du mur – Heat 3D

III.4.2.d Méthode nodale

D'après [63], le nombre des sous couches doit être tel que

$$n \geq \sqrt{\frac{4RC}{\pi\Delta t}} \quad (\text{III-41})$$

$$\text{Dans notre cas } n = \sqrt{\frac{4 \times 0,384 \times 130}{\pi \times 1}} \approx 8$$

Notons que ce critère surestime le nombre de cellules élémentaires puisque ce nombre dépend aussi de la période des oscillations qui dans notre cas est grande (24 heures).

Pour étudier l'influence du nombre de nœuds sur la précision du transfert théorique on considère notre mur sollicité par une température d'ambiance de caisson sinusoïdale de valeur moyenne nulle et d'amplitude 10°C d'une part et une température d'ambiance extérieure nulle d'autre part (température du laboratoire).

N.B. : Il s'agit ici d'un cas théorique qui sert à vérifier la convergence de la solution. A partir de 4 nœuds la solution converge et les flux commencent à être sensiblement superposables (Figure III-41).

Comportement thermique d'un mur ancien Lillois typique

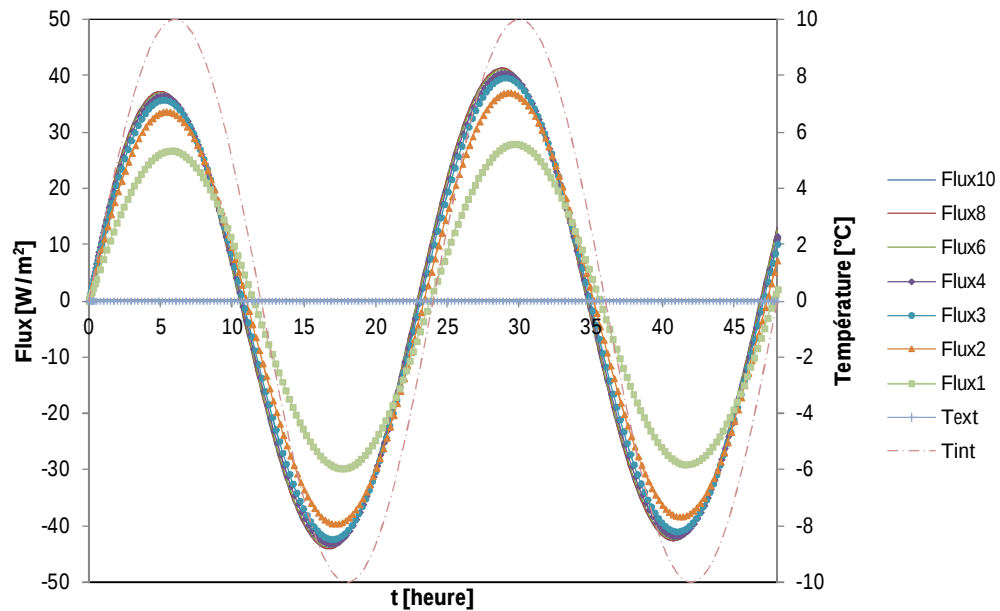


Figure III-41- Comparaison du transfert thermique pour différents nombres de nœuds

Dans notre cas on discrétisera le mur en une série de 10 nœuds. Le circuit équivalent modélisé sous Matlab - Simulink a la forme suivante :

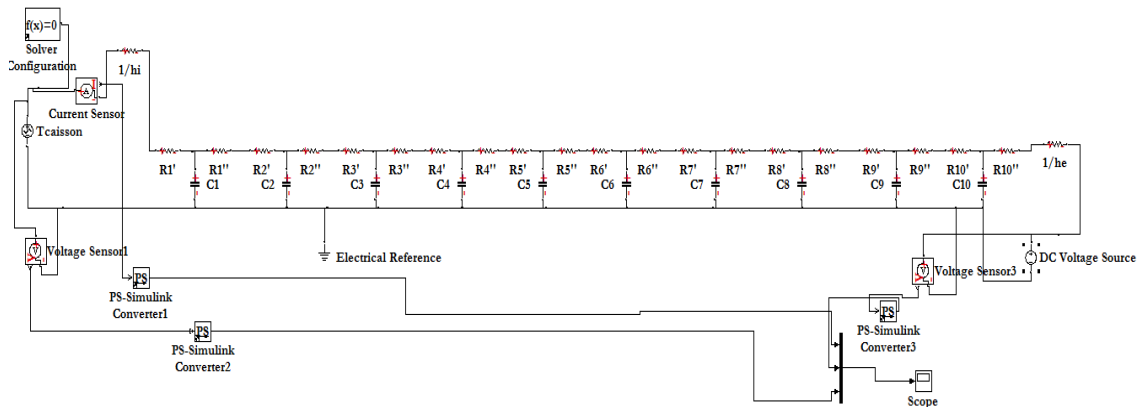


Figure III-42- Modélisation du mur sur Matlab – Simulink

III.4.3 Confrontation des résultats et discussion

Les différentes méthodes théoriques donnent des résultats comparables aux résultats expérimentaux sans être totalement superposables (Figure III-43) ; ceci peut être dû à plusieurs facteurs :

- La température ambiante supposée constante dans la modélisation ne l'est pas en réalité et peut varier de quelques degrés ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) durant les essais influençant ainsi le flux.
- Le comportement thermique du caisson n'est pas pris en compte dans la modélisation ; ce dernier peut emmagasiner et restituer de la chaleur.
- Le rayonnement entre les différentes parois du caisson et le mur peut aussi modifier le flux puisqu'on mesure un flux total et donc pour de grandes différences de température ce flux peut ne pas être négligeable.

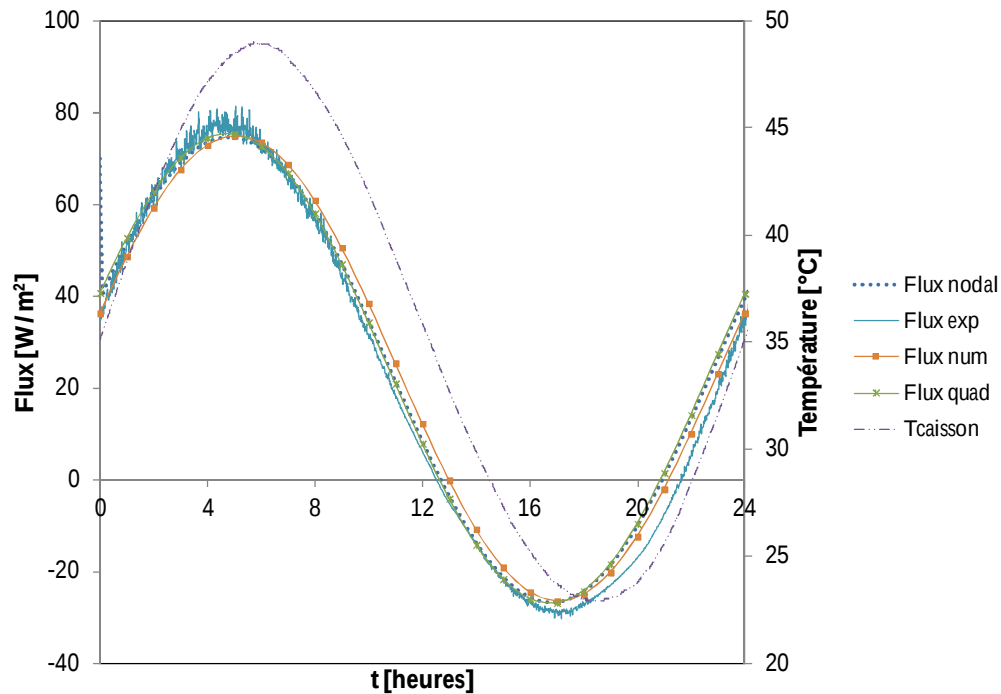


Figure III-43- Confrontation des résultats dans le cas du régime harmonique

III.5 Etude du mur en régime quelconque

Dans la nature, les signaux harmoniques ou constants sont rarement rencontrés, bien que, dans plusieurs cas on peut assimiler les conditions aux limites à des excitations harmoniques ou constantes. L'intérêt du régime quelconque est qu'il englobe tous types d'excitations et qu'il se rapproche des cas réels rencontrés dans la vie courante. Dans cette partie, l'intérieur du caisson représentera l'ambiance extérieure de la maison qui varie de façon quelconque, et l'ambiance du laboratoire (extérieur du caisson) représentera l'ambiance intérieure de la maison dont la température reste quasiment constante et voisine de 20°C.

Le signal quelconque est formé d'une suite d'échelons de températures T_n de premier terme $T_0=20^\circ\text{C}$ et dont le terme $n+1$ s'écrit en fonction du terme n comme suit :

$$T_{n+1} = T_n + \text{Random} [-2 ; 2] \quad (\text{III-42})$$

$\text{Random}[-2 ; 2]$ est une fonction qui donne une valeur aléatoire entre -2 et 2.

On prendra une suite de 400 termes avec un pas de temps variable, par exemple pour un pas de temps de 10 minutes le temps total sera de 4000 minutes (~67 heures).

Une méthode possible pour étudier le mur en régime quelconque est d'étudier sa réponse impulsionnelle et d'en déduire sa réponse pour n'importe quelle excitation [64]. Cependant, vue la grande inertie de notre mur, une impulsion n'aurait pas d'effet remarquable sur le mur et donc cette méthode paraît peu adaptée.

On utilisera deux méthodes analytiques pour la résolution du transfert en régime quelconque ; ces deux méthodes se basent sur la fonction de transfert issue de la matrice de transfert déjà présentée (III.1.3.d - Méthode des quadripôles). La première méthode qu'on appellera méthode d'ordre 2 consiste à développer la fonction de transfert jusqu'à l'ordre 2. Elle est basée sur la fonction de transfert liant le flux intérieur φ_i à la température de l'ambiance intérieure du caisson T_i . Elle offre l'intérêt d'être représentée par un circuit électrique analogue 3R2C [65]. Ensuite, on développera une autre méthode issue du développement limité à l'ordre 4 ; cette méthode a l'intérêt de présenter l'ordre le plus poussé où une résolution analytique est possible. En effet, il n'y a pas de formule permettant d'exprimer de manière générale les racines d'un polynôme de degré 5 ou plus [66].

Bien que le modèle d'ordre 2 semble bien montrer sa validité, il est intéressant de le comparer à un modèle plus élaboré d'ordre 4 afin de voir les ressemblances et les divergences entre les 2 modèles.

III.5.1 Détermination de la fonction de Fourier

Soit une fonction périodique, de période T . On peut décomposer f sous la forme d'une somme infinie de signaux sinusoïdaux [67] [68] :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] ; \text{ avec } \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{III-43})$$

- a_0 : terme constant

- $a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)$: harmoniques (multiples de la fréquence principale) caractérisées par les valeurs des autres coefficients de Fourier a_n et b_n .

$$a_0 = \frac{\sum T_n}{n}$$

$$a_n = \frac{2 \cdot \sum [T_n \cos(n\omega t)]}{n}$$

$$b_n = \frac{2 \cdot \sum [T_n \sin(n\omega t)]}{n}$$

Afin de calculer le flux intérieur (du côté du caisson) dû à la température d'excitation quelconque $T_i(t)$, il suffit de décomposer cette dernière en série de Fourier et puis de déterminer la réponse du système aux trois types de signaux d'excitation : le signal échelon, le signal sinusoïdal et le signal cosinusoidal.

Dans un premier temps, on prendra $n_{\max}=100$ et dans la suite on étudiera l'effet de $n_{\max}$ sur les résultats.

III.5.2 Présentation générale de la méthode

On commence par expliquer la méthode, puis on présente la réponse induite par différentes excitations (échelon, sinusoïde et cosinusoidal) et enfin on compare les résultats de cette méthode aux résultats expérimentaux.

Pour les couches capacitives la matrice de transfert s'écrit [53] :

$$W_i = \begin{bmatrix} ch(\sqrt{pR_i C_i}) & \sqrt{\frac{R_i}{pC_i}} sh(\sqrt{pR_i C_i}) \\ \sqrt{\frac{pC_i}{R_i}} sh(\sqrt{pR_i C_i}) & ch(\sqrt{pR_i C_i}) \end{bmatrix} \quad (\text{III-44})$$

Pour les couches non capacitives (échanges superficiels, résistances de contact, lame d'air) la matrice de transfert s'écrit : $\begin{bmatrix} 1 & r \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

La matrice de transfert globale du mur s'écrit de la forme :

$$\begin{bmatrix} T_i \\ \varphi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_e \\ \varphi_e \end{bmatrix} \quad (\text{III-45})$$

Avec T_i et φ_i la température et le flux à l'intérieur du caisson ; et T_e et φ_e la température et le flux à l'extérieur du caisson. Or la température de l'ambiance du laboratoire est

moyennement constante (voisine de 20°C) et donc en prenant la valeur T_e comme origine les phénomènes thermiques ne se modifient pas : $\theta_i = T_i - T_e$; $\theta_e = 0^\circ\text{C}$.

Dans ce cas on a : $\varphi_i = \frac{M_{22}}{M_{12}} \theta_i(p)$

En supposant $\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}$ la matrice de transfert du mur équivalent de résistance R et

de capacité thermique C, la matrice de transfert totale du mur en tenant compte des deux coefficients d'échange intérieur h_i et extérieur h_e est donnée par :

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1/h_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-46})$$

Le développement limité des éléments de la matrice $\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}$ donne [51]:

$$W_{11}(p) = W_{22}(p) = 1 + \frac{pRC}{2!} + \frac{(pRC)^2}{4!} + \frac{(pRC)^3}{6!} + \frac{(pRC)^4}{8!} + \dots \quad (\text{III-47})$$

$$W_{12}(p) = R \left[1 + \frac{pRC}{3!} + \frac{(pRC)^2}{5!} + \frac{(pRC)^3}{7!} + \frac{(pRC)^4}{9!} + \dots \right] \quad (\text{III-48})$$

$$W_{21}(p) = pC \left[1 + \frac{pRC}{3!} + \frac{(pRC)^2}{5!} + \frac{(pRC)^3}{7!} + \dots \right] \quad (\text{III-49})$$

III.5.3 Solution pour la méthode d'ordre 2

III.5.3.a Détermination de la fonction de transfert

Le développement limité à l'ordre 2 des éléments de la matrice nous ramène à la matrice suivante [69]:

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} 1 & 1/h_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_w C_w}{2} p + \frac{R_w^2 C_w^2}{24} p^2 & R_w \left(1 + \frac{R_w C_w}{6} p + \frac{R_w^2 C_w^2}{120} p^2 \right) \\ \frac{1}{R_w} \left(R_w C_w p + \frac{R_w^2 C_w^2}{6} p^2 \right) & 1 + \frac{R_w C_w}{2} p + \frac{R_w^2 C_w^2}{24} p^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1/h_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

La matrice finale s'écrit de la forme $\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ avec $\begin{cases} M_{11} = 1 + q_1 p + q_2 p^2 \\ M_{12} = R_t + q_3 p + q_4 p^2 \\ M_{21} = C_t p + q_5 p^2 \\ M_{22} = 1 + q_6 p + q_7 p^2 \end{cases}$

III.5.3.b Analogie Electrique

L'intérêt de cette méthode réside dans la simplification du problème ; en effet, la résolution des problèmes électriques est souvent plus simple que celle des problèmes thermiques, surtout que le circuit analogue utilisé est relativement simple. Cependant, cette méthode n'est qu'une approximation de la solution réelle du problème de transfert thermique et donc le choix de cette méthode doit être justifié et fait minutieusement. Le schéma analogue électrique du circuit peut être réduit au circuit 3R2C suivant [70]:

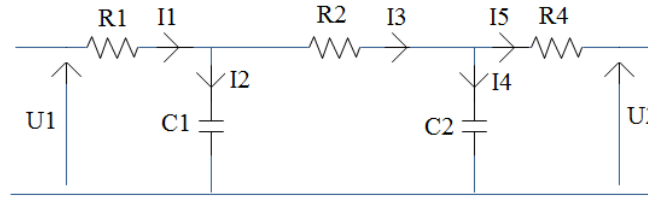


Figure III-44- Schéma électrique analogue du mur 3R2C

Pour déterminer R_1 , R_2 , R_3 , C_1 et C_2 on a recours au modèle simplifié à l'ordre 1 (Modèle 2RC) qui consiste à réduire les matrices de transfert des différentes sous-couches à l'ordre 2 puis à multiplier ces différentes matrices en partant de la couche extérieure vers la couche intérieure.

La matrice de transfert relative au système 3R2C est donnée par [65]:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & R_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ pC_e & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ pC_s & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & R_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-50})$$

Soit $R_1 = \alpha_1 R_t$; $R_2 = \alpha_2 R_t$; $R_3 = \alpha_3 R_t$; $C_1 = \beta_1 C_t$; $C_2 = \beta_2 C_t$

Et soit $\xi = 1 - \frac{q_1}{RC} \left(1 + \frac{q_7}{q_2} \right)$ et $\Delta = \left[q_5 \left(1 + \frac{q_7}{q_2} \right) - RC^2 \xi \right]^2 + 4RC^2 \xi \frac{q_5 q_7}{q_2}$

Par identification on obtient :

$$\beta_1 = \frac{-q_5 \left(1 + \frac{q_6}{q_7} \right) + RC^2 \xi + \sqrt{\Delta}}{2RC^2 \xi}; \quad \beta_2 = 1 - \beta_1;$$

$$\alpha_1 = \frac{q_1}{RC} - \alpha_2 \beta_2; \quad \alpha_2 = \frac{q_5}{RC^2 \beta_1 \beta_2}; \quad \alpha_3 = 1 - \alpha_1 - \alpha_2$$

La loi des mailles appliquée au circuit électrique précédent (Figure III-44) nous amène à déduire le système d'équations suivant en transformées de Laplace :

$$\begin{cases} U_1 = R_1 I_1 + \frac{1}{pC_1} (I_1 - I_3) \\ \frac{1}{pC_1} (I_1 - I_3) = I_3 R_2 + \frac{1}{pC_2} (I_3 - I_5) \\ \frac{1}{pC_2} (I_3 - I_5) - R_3 I_5 - U_2 = 0 \end{cases} \quad (\text{III-51})$$

Avec I_1 , I_3 et I_5 les inconnues du système.

En résolvant le système on trouve I_1 qui représente le flux intérieur recherché:

$$I_1 = \frac{p^2 [C_1 C_2 R_2 R_3 U_1] + p [C_1 U_1 R_2 + R_3 U_1 (C_1 + C_2)] + U_1 - U_2}{p^2 [C_1 C_2 R_1 R_2 R_3] + p [C_1 R_1 (R_2 + R_3) + C_2 R_3 (R_1 + R_2)] + (R_1 + R_2 + R_3)} \quad (\text{III-52})$$

Dans notre étude cette analogie électrique est utilisée implicitement pour vérifier la méthode d'ordre 2 via Matlab Simulink durant le développement des modèles de calcul, cependant elle ne sera pas utilisée de façon explicite dans ce qui suit.

III.5.3.c Réponse à un échelon de température

Dans ce cas $\theta_i(t) = cte \Rightarrow \theta_i(p) = \frac{\theta_i}{p}$

$$\varphi_i(p) = \theta_i(p) \cdot F(p) = \theta_i \cdot \chi(p)$$

$$\chi(p) = \frac{F(p)}{p} = \frac{a.p^2 + b.p + c}{\alpha.p^3 + \beta.p^2 + \gamma.p} = \frac{A}{p} + \frac{B}{p - p_1} + \frac{C}{p - p_2}$$

$$\text{Avec } p_1 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\gamma}}{2\alpha}; \quad p_2 = \frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\gamma}}{2\alpha}$$

$$\begin{cases} A + B + C = a/\alpha \\ -A(p_1 + p_2) - B.p_2 - C.p_1 = b/\alpha \\ A.p_1.p_2 = c/\alpha \end{cases}$$

$$A = \frac{c}{\alpha.p_1.p_2}; \quad B = \frac{b + \alpha.p_2.A + p_1.a}{\alpha.(p_1 - p_2)}; \quad C = \frac{a}{\alpha} - B - A$$

$$\varphi_i(t) = \theta_i.[A + B.\exp(-p_1.t) + C.\exp(-p_2.t)]$$

III.5.3.d Réponse à une excitation sinusoïdale

Dans ce cas $\theta_i(t) = \theta_i.\sin(\omega t) \Rightarrow \theta_i(p) = \frac{\theta_i.\omega}{p^2 + \omega^2}$

$$\varphi_i(p) = \theta_i(p).F(p) = \theta_i.\chi(p)$$

$$\chi(p) = \frac{F(p).\omega}{p^2 + \omega^2} = \frac{a\omega p^2 + b\omega p + c\omega}{(p^2 + \omega^2).(\alpha.p^2 + \beta.p + \gamma)} = \frac{Ap + B}{p^2 + \omega^2} + \frac{D}{p - p_1} + \frac{E}{p - p_2}$$

$$p_1 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\gamma}}{2\alpha}; \quad p_2 = \frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\gamma}}{2\alpha}$$

$$\begin{cases} A + D + E = 0 \\ -E.p_1 - D.p_2 + B - A.(p_1 + p_2) = a\omega\alpha \\ A.p_1.p_2 - B.(p_1 + p_2) + \omega^2(D + E) = b\omega\alpha \\ B.p_1.p_2 - \omega^2(E.p_1 + D.p_2) = c\omega\alpha \end{cases}$$

$$A = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{(-a\omega^3 + c\omega)(p_1 + p_2) + b\omega(p_1 p_2 - \omega^2)}{(p_1 p_2 - \omega^2)^2 + \omega^2(p_1 + p_2)^2} \right]; \quad B = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{A\alpha(p_1 p_2 - \omega^2) - b\omega}{p_1 + p_2} \right];$$

$$E = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{A\alpha p_1 - B\alpha + a\omega}{p_2 - p_1} \right]; \quad D = -A - E$$

$$\varphi_i(t) = \theta_i \left[A.\cos(\omega.t) + \frac{B}{\omega}.\sin(\omega.t) + D.\exp(-p_1.t) + E.\exp(-p_2.t) \right]$$

III.5.3.e Réponse à une excitation cosinusoidale

Dans ce cas $\theta_i(t) = \theta_i.\cos(\omega t) \Rightarrow \theta_i(p) = \frac{\theta_i.p}{p^2 + \omega^2}$

$$\varphi_i(p) = \theta_i(p).F(p) = \theta_i.\chi(p)$$

$$\chi(p) = \frac{F(p) \cdot p}{p^2 + \omega^2} = \frac{ap^4 + bp^3 + cp^2}{(p^2 + \omega^2)(\alpha p^2 + \beta p + \gamma)} = \frac{Ap + B}{p^2 + \omega^2} + \frac{D}{p - p_1} + \frac{E}{p - p_2}$$

$$p_1 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\gamma}}{2\alpha}; \quad p_2 = \frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\gamma}}{2\alpha}$$

$$\begin{cases} A + D + E = a\alpha \\ -E \cdot p_1 - D \cdot p_2 + B - A \cdot (p_1 + p_2) = b\alpha \\ A \cdot p_1 \cdot p_2 - B \cdot (p_1 + p_2) + \omega^2 (D + E) = c\alpha \\ B \cdot p_1 \cdot p_2 - \omega^2 (E \cdot p_1 + D \cdot p_2) = 0 \end{cases}$$

$$A = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{-b\omega^2(p_1 + p_2) + (-a\omega^2 + c)(p_1 p_2 - \omega^2)}{(p_1 p_2 - \omega^2)^2 + \omega^2(p_1 + p_2)^2} \right];$$

$$B = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{A\alpha(p_1 p_2 - \omega^2) - c + a\omega^2}{p_1 + p_2} \right];$$

$$E = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{b + A\alpha p_1 - B\alpha + \alpha p_2}{p_2 - p_1} \right]; \quad D = \frac{a}{\alpha} - A - E$$

$$\varphi_i(t) = \theta_i \left[A \cos(\omega t) + \frac{B}{\omega} \sin(\omega t) + D \exp(-p_1 t) + E \exp(-p_2 t) \right]$$

III.5.4 Modèle d'ordre 4

Ce modèle aussi est issu de la fonction de transfert liant le flux intérieur φ_i à la température intérieure θ_i , il est plus précis que le modèle d'ordre 2 mais nécessite des calculs un peu plus sophistiqués.

III.5.4.a Détermination de la fonction de transfert

En limitant la fonction de transfert à l'ordre 4 on obtient :

$$\begin{aligned} \varphi_i(p) &= \frac{M_{22}}{M_{12}} \theta_i(p) = \theta_i(p) \cdot \left[\frac{W_{22} + \frac{W_{21}}{h_e}}{\frac{W_{11}}{h_e} + W_{12} + \frac{W_{21}}{h_i h_e} + \frac{W_{22}}{h_i}} \right] \\ &= \theta_i(p) \cdot \left[\frac{n_1 p^4 + n_2 p^3 + n_3 p^2 + n_4 p + n_5}{d_1 p^4 + d_2 p^3 + d_3 p^2 + d_4 p + d_5} \right] = \theta_i(p) \cdot F(p) \end{aligned}$$

$$n_1 = \frac{R^4 C^4}{40320} + \frac{R^3 C^4}{5040 h_e}; \quad n_2 = \frac{R^3 C^3}{720} + \frac{R^2 C^3}{120 h_e}; \quad n_3 = \frac{R^2 C^2}{24} + \frac{R C^2}{6 h_e}$$

$$n_4 = \frac{R C}{2} + \frac{C}{h_e}; \quad n_5 = 1$$

$$d_1 = \frac{R^4 C^4}{40320 h_i} + \frac{R^4 C^4}{40320 h_e} + \frac{R^3 C^4}{5040 h_i h_e} + \frac{R^5 C^4}{362880}$$

$$d_2 = \frac{R^3 C^3}{720 h_i} + \frac{R^3 C^3}{720 h_e} + \frac{R^2 C^3}{120 h_i h_e} + \frac{R^4 C^3}{5040} \quad ; \quad d_3 = \frac{R^2 C^2}{24 h_i} + \frac{R^2 C^2}{24 h_e} + \frac{R C^2}{6 h_i h_e} + \frac{R^3 C^2}{120}$$

$$d_4 = \frac{R C}{2 h_i} + \frac{R C}{2 h_e} + \frac{C}{h_i h_e} + \frac{R^2 C}{6} \quad ; \quad d_5 = R + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$$

En posant :

$$\alpha = \frac{n_1}{d_1} \quad ; \quad \beta = \frac{n_2}{d_1} \quad ; \quad \gamma = \frac{n_3}{d_1} \quad ; \quad \varepsilon = \frac{n_4}{d_1} \quad ; \quad \mu = \frac{n_5}{d_1}$$

$$a = \frac{d_2}{d_1} \quad ; \quad b = \frac{d_3}{d_1} \quad ; \quad c = \frac{d_4}{d_1} \quad ; \quad d = \frac{d_5}{d_1}$$

$$\text{On a } F(p) = \frac{\alpha p^4 + \beta p^3 + \gamma p^2 + \varepsilon p + \mu}{p^4 + a p^3 + b p^2 + c p + d}$$

III.5.4.b Réponse à un échelon de température

$$\text{Dans ce cas } \theta_i(t) = cte \Rightarrow \theta_i(p) = \frac{\theta_i}{p}$$

$$\varphi_i(p) = \theta_i(p) \cdot F(p) = \theta_i \cdot \chi(p)$$

$$\chi(p) = \frac{F(p)}{p} = \frac{\alpha p^4 + \beta p^3 + \gamma p^2 + \varepsilon p + \mu}{p \cdot (p^4 + a p^3 + b p^2 + c p + d)}$$

Le dénominateur est un polynôme d'ordre 5 dont une racine est connue ($p_0 = 0$).

$$\text{En résolvant l'équation } p^4 + a p^3 + b p^2 + c p + d = 0$$

On trouve que cette équation admet deux racines réelles p_1 et p_2 (annexe Annexe 3).

Puis en effectuant la division polynômiale :

$$(p^4 + a p^3 + b p^2 + c p + d) \Big/ (p^2 - (p_1 + p_2)p + p_1 p_2)$$

$$\text{On obtient : } p^4 + a p^3 + b p^2 + c p + d = (p - p_1) \cdot (p - p_2) \cdot (p^2 + p_3 p + p_4)$$

$$\text{Avec } p_3 = a + p_1 + p_2 \quad \text{et} \quad p_4 = (b - p_1 p_2) \cdot (p_1 + p_2) \cdot (a + p_1 + p_2)$$

$$\chi(p) = \frac{A}{p} + \frac{B}{p - p_1} + \frac{C}{p - p_2} + \frac{Dp + E}{p^2 + p_3 p + p_4}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A + B + C + D = \alpha \\ A(p_3 - p_1 - p_2) + B(p_3 - p_2) + C(p_3 - p_1) + D(-p_1 - p_2) + E = \beta \\ A(p_4 + p_1 p_2 - p_3(p_1 + p_2)) + B(p_4 - p_2 p_3) + C(p_4 - p_1 p_3) + D(p_1 p_2) + (-p_1 - p_2)E = \gamma \\ A(p_1 p_2 p_3 - p_4(p_1 + p_2)) + B(-p_4 p_2) + C(-p_1 p_4) + E(p_1 p_2) = \varepsilon \\ A = \mu / p_1 p_2 p_4 \end{array} \right.$$

En résolvant le système précédant on trouve A, B, C, D et E puis on passe au domaine temporel :

$$\varphi_i(t) = \theta_i \cdot \left[\begin{array}{l} A + B \cdot \exp(-p_1 t) + C \cdot \exp(-p_2 t) + D \cdot \exp\left(\frac{-p_3}{2} t\right) \cdot \cos(\Omega t) \\ + \left(E - \frac{D p_3}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-p_3}{2} t\right) \cdot \sin(\Omega t) \end{array} \right]$$

III.5.4.c Réponse à une excitation sinusoïdale

Dans ce cas $\theta_i(t) = \theta_i \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow \theta_i(p) = \frac{\theta_i \cdot \omega}{p^2 + \omega^2}$

$$\varphi_i(p) = \theta_i(p) \cdot F(p) = \theta_i \cdot \chi(p)$$

$$\begin{aligned} \chi(p) &= \frac{F(p) \cdot \omega}{(p^2 + \omega^2)} = \frac{\alpha \omega p^4 + \beta \omega p^3 + \gamma \omega p^2 + \varepsilon \omega p + \mu \omega}{(p^2 + \omega^2) \cdot (p^4 + a p^3 + b p^2 + c p + d)} \\ &= \frac{A p + B}{p^2 + \omega^2} + \frac{C}{p - p_1} + \frac{D}{p - p_2} + \frac{E p + F}{p^2 + p_3 p + p_4} \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A + B + C + D = 0 \\ A(p_3 - p_1 - p_2) + B(p_3 - p_2) + C(p_3 - p_1) + E(-p_1 - p_2) + F = \alpha \omega \\ A(p_4 + p_1 p_2 - p_3(p_1 + p_2)) + B(p_3 - p_1 - p_2) + C(p_4 - p_2 p_3 + \omega^2) \\ + D(p_4 - p_1 p_3 + \omega^2) + E(\omega^2 + p_1 p_2) + F(-p_1 - p_2) = \beta \omega \\ A(p_1 p_2 p_3 - p_4(p_1 + p_2)) + B(p_4 + p_1 p_2 - p_3(p_1 + p_2)) + C(-p_4 p_2 + \omega^2 p_3 - \omega^2 p_2) \\ + D(-p_1 p_4 + \omega^2 p_3 - \omega^2 p_1) + E((-p_1 - p_2)\omega^2) + F(p_1 p_2 + \omega^2) = \gamma \omega \\ A(p_1 p_2 p_4) + B(p_1 p_2 p_3 - p_4(p_1 + p_2)) + C(p_4 \omega^2 - \omega^2 p_2 p_3) + D(p_4 \omega^2 - \omega^2 p_1 p_3) \\ + E(p_1 p_2 \omega^2) + F((-p_1 - p_2)\omega^2) = \varepsilon \omega \\ B(p_1 p_2 p_4) + C(-\omega^2 p_2 p_4) + D(-\omega^2 p_1 p_4) + F(p_1 p_2 \omega^2) = \mu \omega \end{array} \right.$$

En résolvant le système précédant on trouve A, B, C, D, E et F puis on passe au domaine temporel :

$$\varphi_i(t) = \theta_i \cdot \left[A \cdot \cos(\omega t) + \frac{B}{\omega} \cdot \sin(\omega t) + C \cdot \exp(-p_1 t) + D \cdot \exp(-p_2 t) + E \cdot \exp\left(\frac{-p_3}{2} t\right) \cdot \cos(\Omega t) \right] + \left(F - \frac{Ep_3}{2} \right) \cdot \exp\left(\frac{-p_3}{2} t\right) \cdot \sin(\Omega t)$$

III.5.4.d Réponse à une excitation cosinusoidale

Dans ce cas $\theta_i(t) = \theta_i \cdot \cos(\omega t) \Rightarrow \theta_i(p) = \frac{\theta_i \cdot p}{p^2 + \omega^2}$

$$\varphi_i(p) = \theta_i(p) \cdot F(p) = \theta_i \cdot \chi(p)$$

$$\begin{aligned} \chi(p) &= \frac{F(p) \cdot p}{(p^2 + \omega^2)} = \frac{\alpha p^5 + \beta p^4 + \gamma p^3 + \varepsilon p^2 + \mu p}{(p^2 + \omega^2) \cdot (p^4 + ap^3 + bp^2 + cp + d)} \\ &= \frac{Ap + B}{p^2 + \omega^2} + \frac{C}{p - p_1} + \frac{D}{p - p_2} + \frac{Ep + F}{p^2 + p_3 p + p_4} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} A + B + C + D = \alpha \\ A(p_3 - p_1 - p_2) + B + C(p_3 - p_2) + D(p_3 - p_1) + E(-p_1 - p_2) + F = \beta \\ A(p_4 + p_1 p_2 - p_3(p_1 + p_2)) + B(p_3 - p_1 - p_2) + C(p_4 - p_2 p_3 + \omega^2) + D(p_4 - p_1 p_3 + \omega^2) + E(\omega^2 + p_1 p_2) + F(-p_1 - p_2) = \gamma \\ A(p_1 p_2 p_3 - p_4(p_1 + p_2)) + B(p_4 + p_1 p_2 - p_3(p_1 + p_2)) + C(-p_4 p_2 + \omega^2 p_3 - \omega^2 p_2) + D(-p_1 p_4 + \omega^2 p_3 - \omega^2 p_1) + E((-p_1 - p_2)\omega^2) + F(p_1 p_2 + \omega^2) = \varepsilon \\ A(p_1 p_2 p_4) + B(p_1 p_2 p_3 - p_4(p_1 + p_2)) + C(p_4 \omega^2 - \omega^2 p_2 p_3) + D(p_4 \omega^2 - \omega^2 p_1 p_3) + E(p_1 p_2 \omega^2) + F((-p_1 - p_2)\omega^2) = \mu \\ B(p_1 p_2 p_4) + C(-\omega^2 p_2 p_4) + D(-\omega^2 p_1 p_4) + F(p_1 p_2 \omega^2) = 0 \end{cases}$$

En résolvant le système précédant on trouve A, B, C, D, E et F puis on passe au domaine temporel :

$$\varphi_i(t) = \theta_i \cdot \left[A \cdot \cos(\omega t) + \frac{B}{\omega} \cdot \sin(\omega t) + C \cdot \exp(-p_1 t) + D \cdot \exp(-p_2 t) + E \cdot \exp\left(\frac{-p_3}{2} t\right) \cdot \cos(\Omega t) \right] + \left(F - \frac{Ep_3}{2} \right) \cdot \exp\left(\frac{-p_3}{2} t\right) \cdot \sin(\Omega t)$$

III.5.5 Analyse fréquentielle

III.5.5.a Méthodologie

On a déjà démontré dans la partie III.5.2 – (Présentation générale de la méthode), que le flux intérieur est donné par :

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1/h_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-53})$$

$$\varphi_i(p) = \frac{M_{22}}{M_{12}} \theta_i(p) = \theta_i(p) \cdot \left[\frac{W_{22} + \frac{W_{21}}{h_e}}{\frac{W_{11}}{h_e} + W_{12} + \frac{W_{21}}{h_i h_e} + \frac{W_{22}}{h_i}} \right] = \theta_i(p) \cdot F(p) \quad (\text{III-54})$$

Rappelons que les termes W_{11} , W_{12} , W_{21} et W_{22} sont donnés par les équations (III-47), (III-48), et (III-49).

Afin de vérifier la validité des méthodes dites d'ordres 2 et 4 on compare le diagramme de Bode de la fonction de transfert d'ordre 2 et celle d'ordre 4 avec des fonctions de transfert d'ordre supérieur (6 et 8) et on présentera aussi la fonction de transfert d'ordre 1 à simple titre de comparaison.

Pour $R_w = 0,384 \text{ m}^2\text{K/W}$ et $C_w = 130 \text{ Wh/m}^2\text{K}$, $h_i = 6,833 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $h_e = 4,870 \text{ W/m}^2\text{K}$ la fonction de transfert d'ordre 8 s'écrit :

$$F(p) = \frac{1 + 51,65p + 325,93p^2 + 727,13p^3 + 81290p^4 + 54225p^5 + 23962p^6 + 75,20p^7 + 17,61p^8}{0,74 + 15,88p + 77,02p^2 + 152,42p^3 + 157,22p^4 + 99,92p^5 + 42,67p^6 + 13,06p^7 + 3,00p^8}$$

On peut déduire les fonctions de transfert d'ordre i inférieur à 8 en éliminant tous les termes d'ordre supérieur à « i ». Par exemple, la fonction de transfert d'ordre 4 s'écrit :

$$F(p) = \frac{1 + 51,65p + 325,93p^2 + 727,13p^3 + 81290p^4}{0,74 + 15,88p + 77,02p^2 + 152,42p^3 + 157,22p^4}$$

III.5.5.b Diagramme de Bode

Un diagramme de Bode est l'ensemble des deux graphes représentant la réponse en fréquence d'un système :

- Un diagramme de gain permet d'évaluer l'amplification ou l'atténuation en fonction de la fréquence du signal d'entrée.
- Un diagramme de phase permet d'évaluer le retard introduit par le système entre le signal de sortie et le signal d'entrée en fonction de la fréquence du signal d'entrée.

L'échelle de l'axe des abscisses est logarithmique afin de pouvoir évaluer la réponse du système pour une gamme de fréquences importante sur un graphe de dimension raisonnable.

L'échelle de l'axe des ordonnées pour le gain peut être représentée en décibel de la forme :

$$G = 20 \times \text{Log}_{10} \left[\left| \frac{\text{Sortie}}{\text{Entrée}} \right| \right] = 20 \times \text{Log}_{10} [F(p)] \quad (\text{III-55})$$

Elle peut aussi être représentée sous forme de gain tout simplement, dans ce cas :

$$G = \left| \frac{\text{Sortie}}{\text{Entrée}} \right| \quad (\text{III-56})$$

Dans notre étude le gain sera considéré comme étant le rapport du flux intérieur φ_i divisé par la température à l'intérieur du caisson θ_i . On considère le gain comme étant une grandeur sans unité.

L'échelle de l'axe des ordonnées pour la phase est en « degrés ».

Une fonction interne de « MATLAB » permet d'avoir directement le tracé du diagramme de Bode pour une fonction de transfert donnée.

III.5.5.c Résultats et analyse

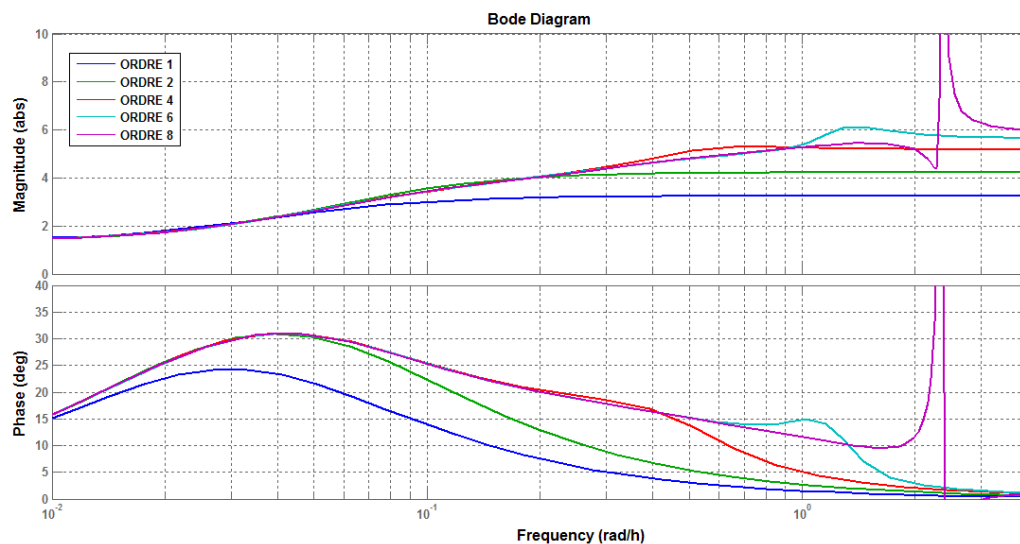


Figure III-45- Diagramme de Bode pour le mur pour différents ordres

En traçant tous les diagrammes de Bode dans un même graphique, on obtient cinq courbes presque confondues pour les faibles fréquences et qui divergent pour les fréquences élevées (Figure III-45).

a.) Analyse pour l'ordre 2 :

- Pour des fréquences inférieures à 0,05 rad/h, les diagrammes de phase et de gain sont confondus pour l'ordre 2 et les ordres supérieurs. Dans cette gamme de fréquences le modèle d'ordre 2 est très fiable.
- Pour des fréquences entre 0,05 et 0,3 rad/h, les diagrammes de gain sont confondus tandis que les diagrammes de phase ne le sont pas. On observe une

divergence dans la phase entre la courbe d'ordre 2 et celles d'ordre supérieur. Notons que la différence de phase quand on augmente en fréquence n'engendre pas de grandes erreurs puisque la période des signaux en question dans cette gamme de fréquences n'est pas très grande. Par exemple, la différence de phase entre l'ordre 2 et les ordres supérieurs est maximale dans cette intervalle pour une fréquence de 0,3 rad/h et elle est égale à $\sim 10^\circ$. Ceci correspond à un déphasage de :

$$\Psi = \frac{10}{360} \times \frac{2\pi}{0,3} = 0,58h.$$

Dans cette gamme de fréquences le modèle d'ordre 2 est fiable avec quelques petites divergences.

- Pour des fréquences entre 0,3 et 2 rad/h, les diagrammes de gain d'ordre 2 et d'ordre 8 sont écartés d'une moyenne de 13%. Dans cet intervalle le modèle d'ordre 2 n'est plus très fiable pour modéliser le mur en question et commence à impliquer des incertitudes.
- Pour des fréquences supérieures à 2 rad/h, les écarts sont assez élevés et le modèle d'ordre 2 n'est pas du tout fiable et peu donner des résultats incohérents.

b.) Analyse pour l'ordre 4 :

- Pour des fréquences inférieures à 0,5 rad/h, les diagrammes de phase et de gain sont confondus.
Pour des fréquences entre 0,5 et 2,2 rad/h, les diagrammes de gain sont très proches tandis que les diagrammes de phase ne le sont pas. Dans cette gamme de fréquences le modèle d'ordre 4 est fiable avec quelques petites divergences.
- Pour des fréquences supérieures à 2,2 rad/h, les écarts commencent à être élevés et le modèle d'ordre 4 doit être préférablement remplacé par un modèle d'ordre supérieur.

III.5.6 Résultats et discussion

Afin de vérifier la validité du modèle et de comparer l'effet des fréquences des températures d'excitation du caisson sur les résultats obtenus, on considère deux profils de température différents qu'on notera signal 1 et signal 2.

Les deux courbes de températures correspondent à la température interne du caisson qui est considérée comme signal d'entrée et la température déduite par l'approximation de Fourier de la température du caisson (partie III.5.1). Les trois courbes de flux correspondent aux flux expérimental, flux modélisé suivant la méthode d'ordre 2 et flux modélisé suivant la méthode d'ordre 4 (Figure III-46 et Figure III-47).

Ensuite on étudiera l'effet du développement fréquentiel « n » dans la fonction de Fourier (III.5.1 - Détermination de la fonction de Fourier).

III.5.6.a Signal 1

Le signal 1 correspond à un profil de température avec un pas de temps de 10 minutes (Figure III-46).

La température de l'ambiance intérieure du caisson et son développement de Fourier sont superposables ; ceci peut s'expliquer par le fait que la fonction de Fourier est développée jusqu'à la centième harmonique.

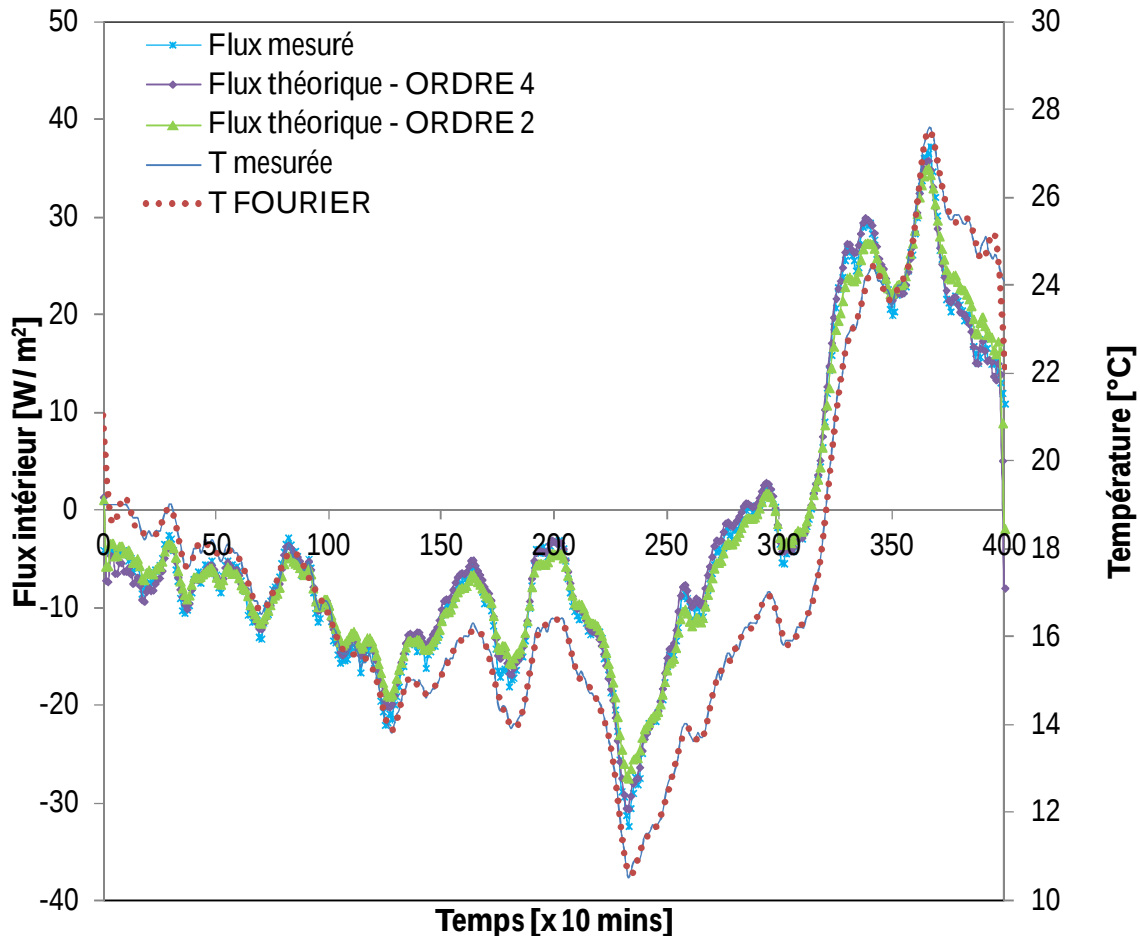


Figure III-46- Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats des deux modèles théoriques (ordre 2 et ordre 4) pour le signal 1

On remarque que les deux modèles représentent assez bien le flux réel obtenu expérimentalement ; cependant, pour les variations brusques de température (fréquences relativement élevées) le modèle d'ordre 4 est plus précis que le modèle d'ordre 2 ($t \approx 230 \times 10 \text{ min}$ et $t \approx 330 \times 10 \text{ min}$).

III.5.6.b Signal 2

Le signal 2 correspond à un profil de température différent que celui du signal 1 et avec un pas de temps de 30 minutes (Figure III-47).

On remarque que les modèles d'ordre 2 et 4 sont presque identiques et représentent très bien le flux obtenu expérimentalement. Ceci est prévu puisqu'en augmentant le pas de temps la fréquence du signal d'excitation diminue et donc la méthode théorique devient de plus en plus fiable (partie III.5.5.c).

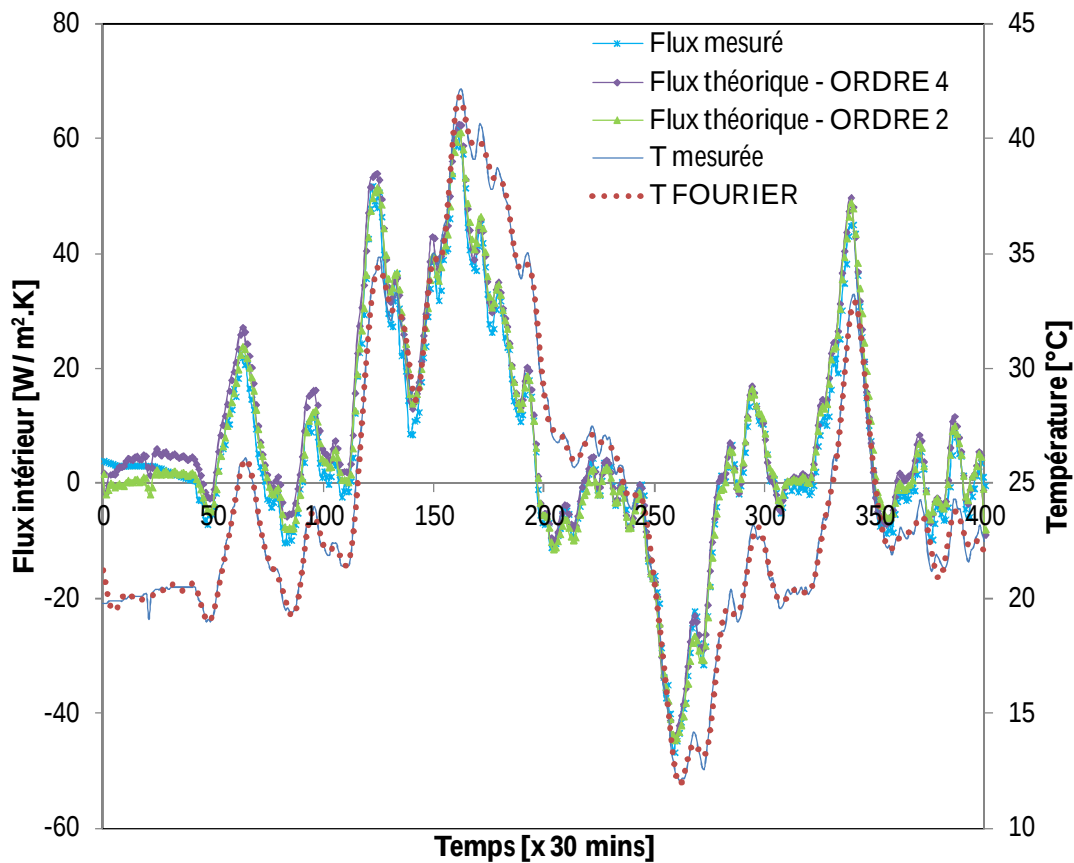


Figure III-47- Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats des deux modèles théoriques (ordre 2 et ordre 4) pour le signal 2

III.5.6.c Influence de n – ordre 4

On remarque qu'à partir de la 25^e harmonique, les courbes commencent à converger par rapport aux résultats expérimentaux (Figure III-48).

L'écart type entre le flux théorique et le flux expérimental est donné par la formule suivante :

$$\text{Ecart - type} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{400} [\varphi_{\text{théorique},i} - \varphi_{\text{expérimental},i}]^2}{401}} \quad (\text{III-57})$$

Les résultats pour les différents nombres d'harmoniques sont représenté dans le tableau suivant :

Nombre d'harmoniques	n=10	n=25	n=50	n=100
Ecart-type	3,366	1,869	1,533	1,421

Tableau III-6- Evaluation de l'influence du nombre d'harmoniques dans la précision des résultats

Le Tableau III-6 vérifie bien qu'à partir de n=25 la solution commence à converger.

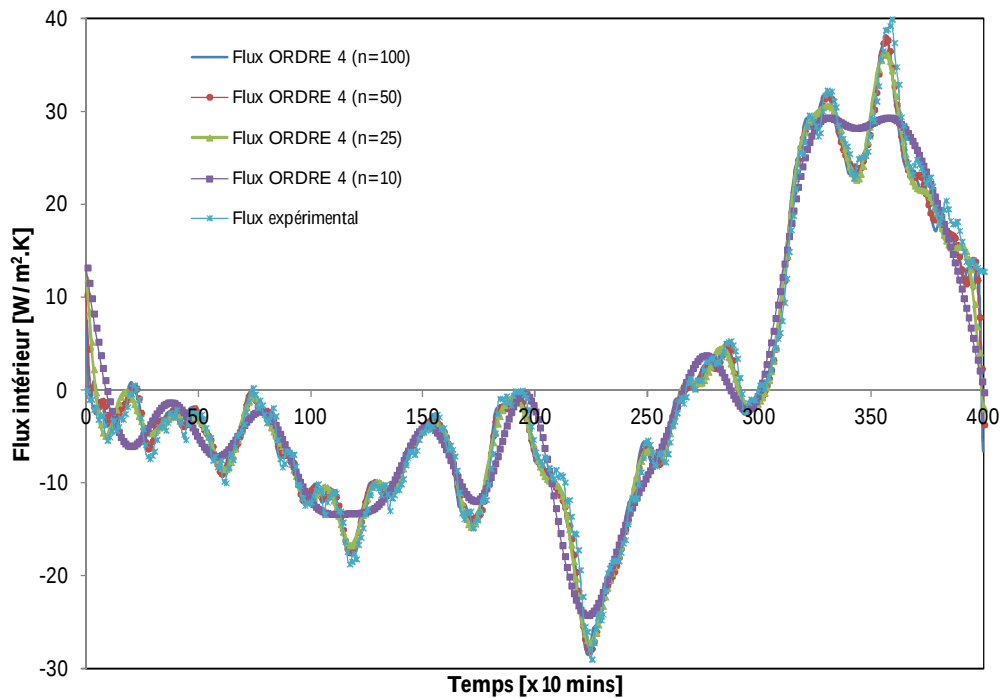


Figure III-48- Etude de l'influence du développement de la fonction de Fourier (nombre d'harmoniques) sur l'allure du flux intérieur théorique

III.5.7 Synthèse

Le signal d'entrée qui est la température intérieure représentée par la fonction de Fourier correspondante est donné par l'équation (III-43).

Pour chaque ordre d'harmonique « n », la fréquence est donnée par :

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{T}, \text{ T étant la durée totale de mesure.}$$

Le module est donné par : $D_n = \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2}$. Le module représente l'importance ou le poids de l'harmonique n dans la constitution du signal de température quelconque.

Ensuite on calcule le pourcentage de chaque module D_n :

$$\%_n = \frac{D_n}{\sum_{i=1}^{100} D_i} \times 100 \quad (\text{III-58})$$

En traçant le % cumulé de module en fonction de la fréquence pour les signaux 1 et 2 on obtient les graphes suivants :

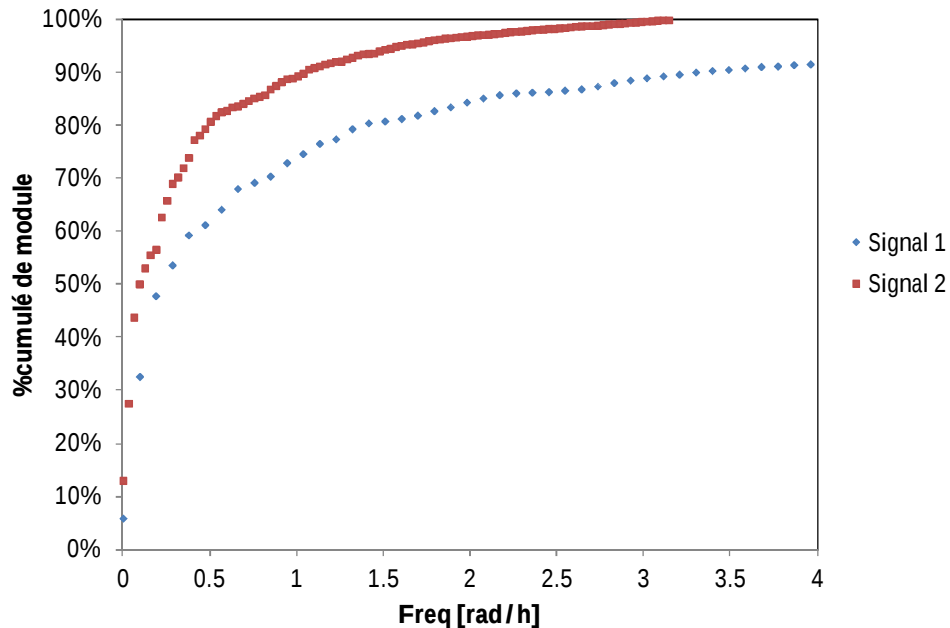


Figure III-49- Comparaison de la composition des signaux 1 et 2 en fréquences

Par exemple on peut dire que 70% du signal 1 a une fréquence inférieure à 1 rad/h, tandis que près de 90% du signal 2 a une fréquence inférieure à 1 rad/h. Le signal 1 est plus riche en fréquences que le signal 2. Ceci est normal puisque le signal 1 qui a un pas de temps plus faible doit correspondre à des fréquences plus élevées. Ceci justifie bien pourquoi la méthode d'ordre 2 était plus précise pour le signal 2 que pour le signal 1.

Donc le modèle d'ordre 2 et même celui d'ordre 4 sont une simplification de la réalité et sont plus de plus en plus fiables pour les faibles fréquences. Cette incertitude provient du fait du développement limité de la matrice de transfert. Il existe en outre d'autres sources d'erreur dans le cas du régime quelconque entre le modèle théorique et les résultats expérimentaux :

- La température de l'air ambiant dans la salle est supposée constante (on prend la moyenne des valeurs obtenues expérimentalement) ; cependant, dans la réalité, cette température est en perpétuelle variation avec une différence entre la température minimale et la température maximale qui peut dépasser 4°C (Figure III-50).
- Les incertitudes de mesures liées à la précision des thermocouples et des fluxmètres ainsi qu'à la sensibilité des fluxmètres entraînent elle aussi des erreurs.
- Le modèle en régime quelconque se base sur des propriétés thermiques (R et C) elles-mêmes déterminées par mesures ce qui peut engendrer des erreurs aussi.
- L'effet 2D est aussi une source d'erreur. En effet le transfert thermique est supposé unidirectionnel ; cependant, il y a toujours un effet 2D et une partie du flux est dissipée sur les bords du mur supposés adiabatiques en modélisation. Ce phénomène est aggravé dans le cas de l'étude du mur isolé (chapitre IV).

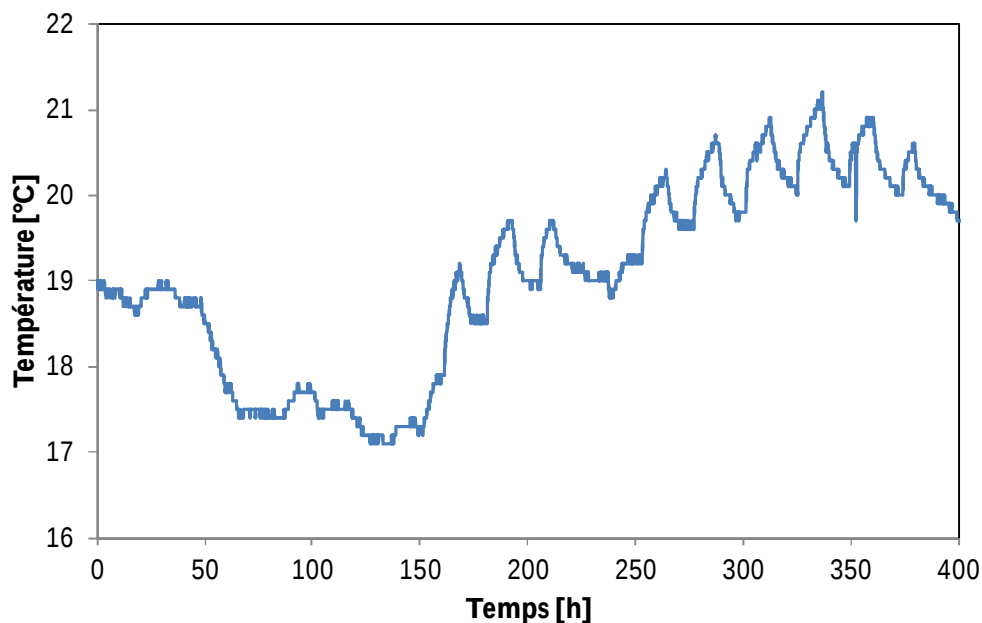


Figure III-50- Variation de la température de l'air dans l'ambiance du laboratoire sur une durée de près de 16 jours

Chapitre IV: Etude des différents scénarios d'isolation du mur étudié

IV.1 Introduction

La question qui se pose aujourd'hui chez les spécialistes du bâtiment n'est plus s'il faudrait isoler mais plutôt quel type d'isolant utiliser, comment, et de combien [71].

La problématique de l'isolation optimale est souvent traitée en régime permanent en utilisant une méthode nommée P_1 - P_2 [72], [73], [74] dans laquelle on fait un bilan énergétique sur la durée de vie de l'isolant impliquant les coûts d'isolation et les économies d'énergie. Une autre étude établit une corrélation entre la conductivité thermique et l'épaisseur optimale de l'isolation toujours en régime permanent [75].

D'autres études utilisent des méthodes dynamiques qui prennent en compte l'inertie des parois sur une période de 24 heures sans cependant comparer l'isolation par l'intérieur à l'isolation par l'extérieur [76], [77].

[78] et [79] montrent l'influence de l'inertie thermique et de l'isolation par l'extérieur sur les performances thermiques globales des parois opaques.

Dans ce chapitre on cherche à étudier les différentes configurations d'isolation du mur et à comparer les performances thermiques de différents matériaux isolants en régime quelconque.

On commencera par caractériser thermiquement cinq matériaux différents : le polystyrène, la laine de bois, le lin, la laine de mouton et le métisse grâce à un banc de caractérisation afin de déterminer leur conductivité thermique et leur chaleur massique.

Ensuite, on présentera la méthode du mur bicouche (mur initial + isolant) et on validera la méthode par comparaison avec les résultats expérimentaux dans le cas du régime permanent, du régime harmonique et du régime quelconque.

Puis on fera l'étude théorique du transfert thermique dans le mur avec différentes configurations d'isolation (isolation par l'intérieur ou par l'extérieur) pour différentes épaisseurs d'isolant et pour cinq différents matériaux isolants dans des conditions climatiques qui représentent le climat réel de Lille sur une période de deux semaines.

IV.2 Détermination des propriétés thermiques des matériaux isolants

La caractérisation des matériaux isolants peut se faire à deux échelles, une échelle microscopique au niveau de laquelle on s'intéresse aux phénomènes élémentaires qui se produisent entre les fibres des matériaux isolants, la conduction et le rayonnement

principalement puisque la convection est très négligeable (air immobile dans les pores des matériaux) [80], [81], [82].

Le dispositif expérimental est le même que celui utilisé pour la caractérisation de la brique et du mortier (Figure III-7) avec la seule différence que les fluxmètres utilisés cette fois-ci ont une surface active de 0,15 m x 0,15 m.

Les isolants sont légèrement comprimés de quelques millimètres afin d'avoir l'épaisseur exacte voulue et de minimiser la résistance de contact entre les plaques échangeuses et l'isolant. Cette résistance de contact n'a pas beaucoup d'influence sur la détermination de la conductivité thermique des isolants puisque les isolants sont très poreux et remplis d'air, ils ont donc une conductivité thermique du même ordre de grandeur que la conductivité thermique de l'air (0,025 W/m²K) [RT2005].

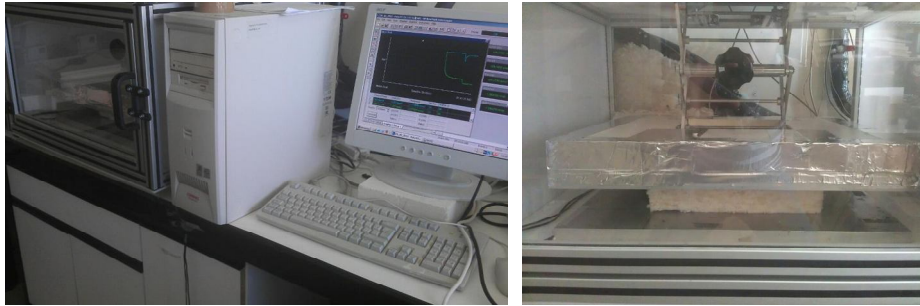


Figure IV-1- Dispositif de caractérisation des matériaux

Les matériaux testés étant eux-mêmes des isolants thermiques, la ceinture isolante (Figure III-7) qui sert à diminuer les déperditions latérales et rendre le flux unidirectionnel peut ne pas être placée surtout si la surface de l'isolant dépasse suffisamment la surface des fluxmètres.

Les critères thermiques sont définis par les deux paramètres principaux qui sont la conductivité thermique et la chaleur massique.

IV.2.1 Méthode de détermination de la conductivité thermique et de la chaleur massique des échantillons

La conductivité thermique est déterminée de la même manière que la brique et le mortier (partie III.2). Pour la détermination de la chaleur massique, en appliquant la méthode utilisée dans la partie III.2.1.b, on remarque qu'on obtient des valeurs légèrement supérieures aux valeurs trouvées dans les références bibliographiques [RT2005]. Une réflexion sur le sujet nous amène à supposer que ce problème pourrait être dû à l'hypothèse d'avoir considéré que la capacité des fluxmètres était négligeable. En effet, la capacité des fluxmètres ne peut être négligée que dans le cas des matériaux ayant des densités comparables ou supérieures à celles des fluxmètres, dans ce cas la capacité thermique des matériaux donnée par $C = \rho c_e$ domine par rapport à la capacité des fluxmètres ayant une très faible épaisseur.

Or, dans le cas des matériaux isolants, la densité est très faible, d'où une faible capacité thermique qui devient comparable à celle des fluxmètres. La capacité thermique de ces derniers ne peut donc plus être négligée et doit être déterminée expérimentalement.

IV.2.1.a Détermination de la capacité thermique des fluxmètres

La méthode consiste à faire varier la température des deux bains thermostatés d'une température d'équilibre initiale de 20°C à une température d'équilibre finale de 40°C, les fluxmètres stockent ainsi une énergie Q sous forme calorifique :

$$Q = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt \quad (IV-1)$$

On peut alors déterminer la capacité thermique des fluxmètres par la relation :

$$C = 2 \frac{\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt}{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}} \quad (IV-2)$$

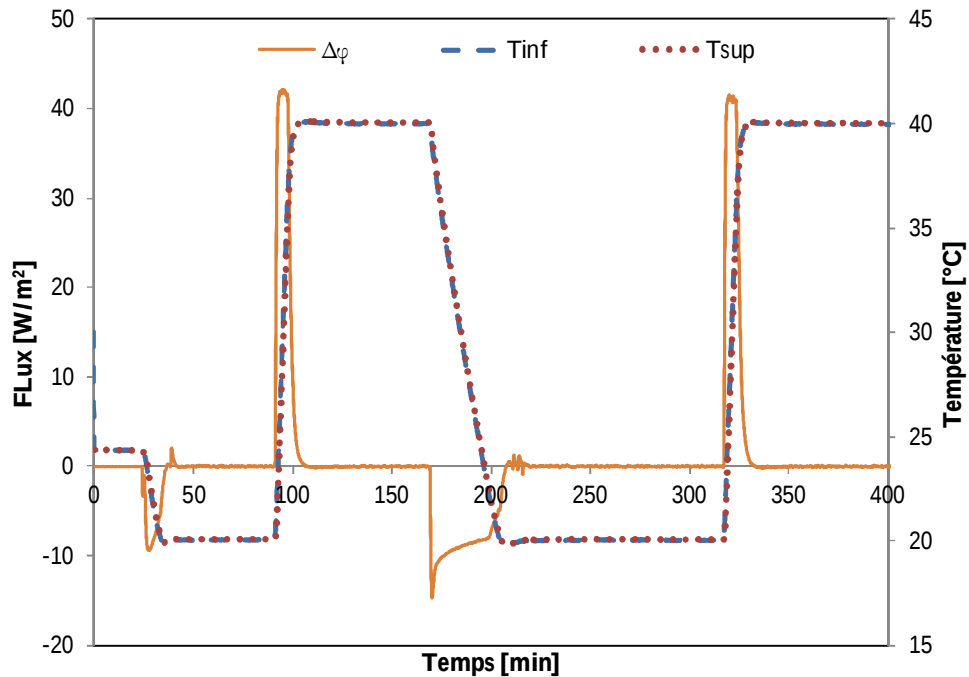


Figure IV-2- Détermination de la capacité thermique des fluxmètres

On répète l'essai de stockage/déstockage d'énergie plusieurs fois afin de vérifier la reproductibilité de l'évolution du flux en fonction du temps et ainsi la fiabilité des résultats (Figure IV-2). On remarque que les profils de températures supérieure « T_{sup} » et inférieure « T_{inf} » sont superposables, ceci est dû au fait que les deux plaques

échangeuses ne sont séparées que par les fluxmètres qui ont une résistance thermique très faible. Les fluxmètres stockent une énergie Q de 1888 J/m^2 dans le premier essai et 1884 J/m^2 dans le deuxième ce qui fait une différence de 0,2%.

La capacité thermique déterminée de l'ensemble des deux fluxmètres est donc :

$$C = \frac{2 \times 1888}{40} = 944 \text{ J/m}^2 \text{K}$$

IV.2.1.b Détermination de la chaleur massique réelle des isolants

Pour déterminer la chaleur massique des isolants il faut donc retrancher la valeur de la capacité des fluxmètres de la capacité thermique totale obtenue expérimentalement. La capacité de l'échantillon testé est donnée alors par :

$$C = 2 \frac{\left(\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta \varphi \cdot dt \right)}{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}} - C_{fluxmètres} \quad (\text{IV-3})$$

Connaissant la masse volumique de l'échantillon ainsi que son épaisseur, on détermine sa chaleur massique :

$$c_p = \frac{C}{\rho \cdot e} \quad (\text{IV-4})$$

IV.2.2 Détermination des propriétés thermiques des isolants

Pour les différents matériaux isolants on détermine la conductivité thermique en fonction de la température moyenne des deux bains : on fait varier la température des deux bains comme suit $[10^\circ\text{C} ; 20^\circ\text{C}]$, $[20^\circ\text{C} ; 30^\circ\text{C}]$, $[30^\circ\text{C} ; 40^\circ\text{C}]$ et $[40^\circ\text{C} ; 50^\circ\text{C}]$.

On obtient ainsi 4 conductivités thermiques différentes qui correspondent aux températures moyennes respectives suivantes : 15°C , 25°C , 35°C et 45°C .

Pour la détermination de la chaleur massique on fait varier la température des deux bains de 20°C à 40°C . On détaillera les mesures faites pour l'échantillon de polystyrène, les autres mesures seront détaillées dans l'annexe Annexe 4.

IV.2.2.a Le polystyrène

L'échantillon de polystyrène a comme dimensions (4 cm x 30 cm x 30 cm) et une masse de 111,6 grammes. L'échantillon testé regroupe un assemblage de deux couches de 2 cm chacune. Le choix de l'épaisseur de 4 cm au lieu de 2 cm revient au fait que ce matériau est très léger (31 kg/m^3), une faible épaisseur risque donc de fausser les mesures de la chaleur massique puisque l'échantillon emmagasinerait une faible quantité d'énergie et les pertes (convection à l'intérieur de l'enceinte de mesures) seraient considérables.



Figure IV-3- Echantillon de polystyrène expérimenté

La masse volumique de l'échantillon est : $\rho = \frac{m}{V} = \frac{0,1116}{0,04 \times 0,30 \times 0,30} = 31 \text{ kg/m}^3$

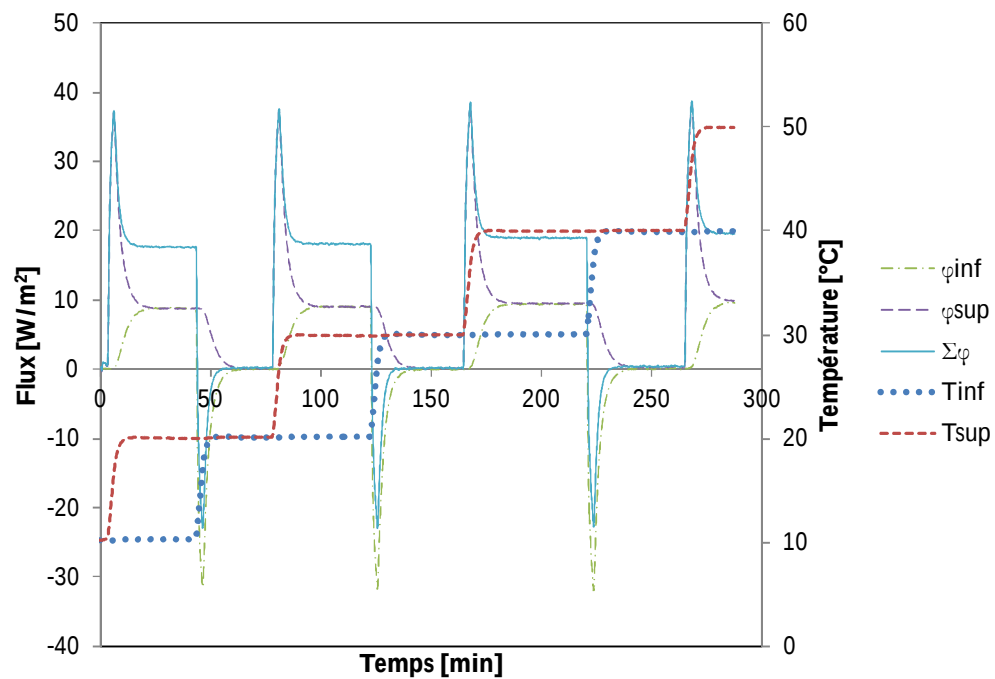


Figure IV-4- Variations de la température et du flux pendant la mesure de la conductivité du polystyrène

En calculant la conductivité correspondant aux températures 15°C, 25°C, 35°C et 45°C, on obtient une ligne presque droite (Figure IV-5).

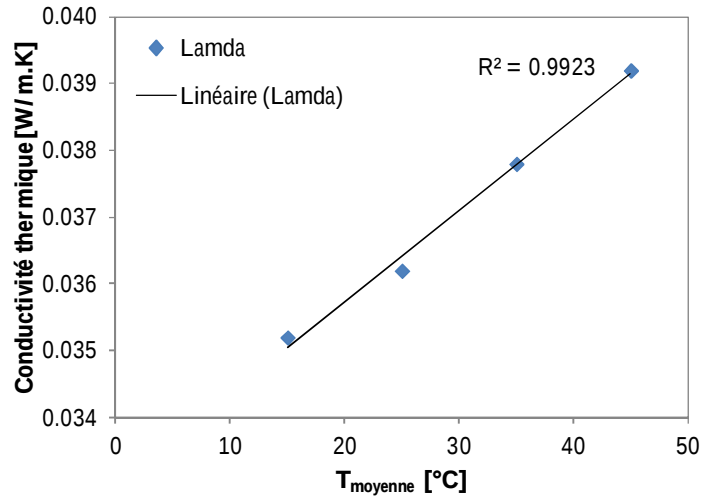


Figure IV-5- Conductivité thermique du polystyrène en fonction de la température moyenne imposée

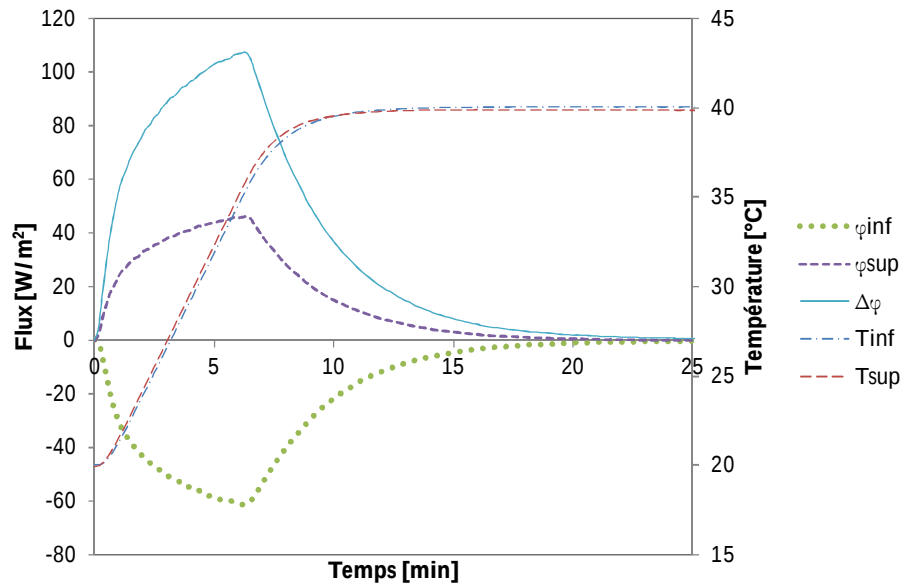


Figure IV-6- Variations de la température et du flux pendant la mesure de la chaleur massique du polystyrène

La chaleur massique du polystyrène est donnée par :

$$C = 2 \frac{\left(\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta \varphi \cdot dt \right)}{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}} - C_{fluxmètres} = \frac{2 \times 52916}{40} - 944 = 1701,8 \text{ J} / \text{m}^2 . K$$

$$c_p = \frac{C}{\rho \cdot e} = \frac{1701,8}{30,56 \times 0,04} = 1392 \text{ J} / \text{kg} . K$$

IV.2.2.b La laine de bois

L'échantillon de laine de bois a comme dimensions (3 cm x 29 cm x 29 cm) et une masse de 140,3 grammes. La masse volumique de l'échantillon est :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0,1403}{0,03 \times 0,29 \times 0,29} = 55,6 \text{ kg} / \text{m}^3$$



Figure IV-7- Echantillon de laine de bois expérimenté

IV.2.2.c La laine de mouton



Figure IV-8- Echantillon de laine de mouton expérimenté

L'échantillon de laine de mouton a comme dimensions (6 cm x 29 cm x 29 cm) et une masse de 261,1 grammes. La masse volumique de l'échantillon est :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0,2611}{0,06 \times 0,29 \times 0,29} = 51,74 \text{ kg} / \text{m}^3$$

IV.2.2.d Le lin

L'échantillon de laine de lin a comme dimensions (6 cm x 40 cm x 40 cm) et une masse de 506,4 grammes. La masse volumique de l'échantillon est :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0,5064}{0,06 \times 0,40 \times 0,40} = 52,75 \text{ kg} / \text{m}^3$$



Figure IV-9- Echantillon de lin expérimenté

IV.2.2.e Le métisse

L'échantillon de métisse a comme dimensions (3 cm x 30 cm x 30 cm) et une masse de 88,9 grammes. La masse volumique de l'échantillon est :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0,0889}{0,06 \times 0,30 \times 0,30} = 32,93 \text{ kg} / \text{m}^3$$



Figure IV-10- Echantillon de métisse expérimenté

IV.2.3 Comparaison et synthèse

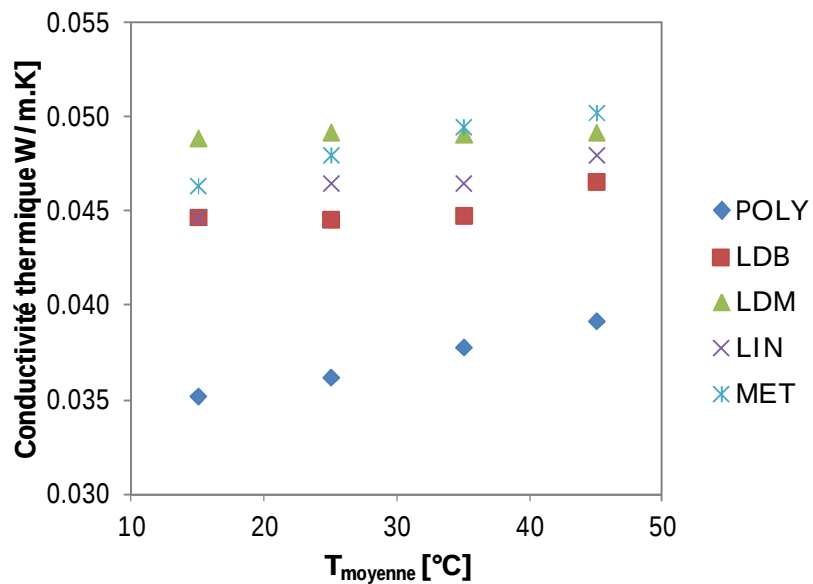
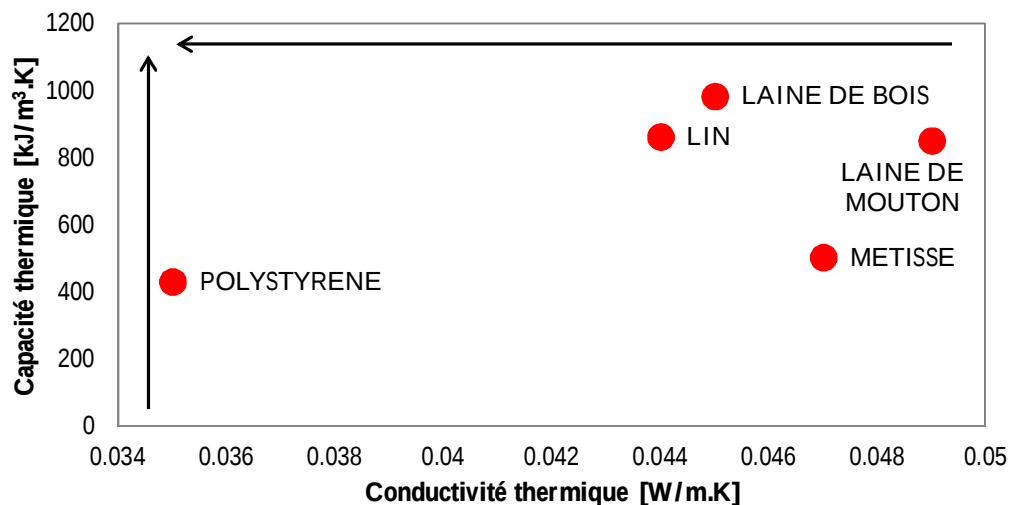


Figure IV-11- Conductivité thermique des différents matériaux isolants en fonction de la température moyenne imposée

Matériau	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/m.K]	Chaleur massique [J/kg.K]
Polystyrène	31,00	0,035	1392
Laine de bois	55,60	0,045	1771
Lin	52,75	0,044	1638
Laine de mouton	51,74	0,049	1647
Métisse	32,93	0,047	1531

Tableau IV-1- Propriétés thermiques mesurées des différents matériaux isolants

On définit un isolant thermiquement performant comme étant un isolant qui a une faible conductivité thermique et une grande capacité thermique. Afin de comparer les différents matériaux caractérisés on les présente dans un diagramme dont l'un des axes représente la conductivité thermique et l'autre la capacité thermique (Figure IV-12). Les flèches représentent la région du diagramme favorisée qui correspond au matériau le plus performant. Or on remarque que parmi les matériaux testés il n'existe pas un matériau qui a en même temps la plus faible conductivité et la plus grande capacité thermique. Ceci semble être parfaitement logique car pour atteindre une très faible conductivité thermique il faut augmenter la porosité du matériau (augmenter la fraction volumique de l'air dans le matériau) et par la suite diminuer sa densité et donc diminuer sa capacité thermique.

**Figure IV-12- Comparaison des performances thermiques des différents isolants**

Pour comparer donc la performance thermique de ces différents matériaux on les compare à l'échelle du mur en ayant une seule « fonction objectif » à minimiser qui est l'énergie dissipée par le mur au lieu d'en avoir deux (la conductivité thermique et la capacité thermique).

On validera la méthode théorique en la comparant aux résultats expérimentaux dans le cas du polystyrène, puis on se contentera de la comparaison théorique de différentes configurations d'isolation et des différents matériaux.

IV.3 Validation du modèle théorique par comparaison avec le modèle expérimental

Dans cette partie on cherche à valider le modèle théorique en bicouche en le comparant au modèle expérimental constitué du mur déjà étudié auquel on applique 3 cm de polystyrène du côté du laboratoire. Le choix des panneaux de polystyrène est fait pour des raisons de facilité de fixation ; en fait, les panneaux rigides sont plus faciles à poser que les matériaux en rouleau qui nécessitent des modes de fixation plus élaborés. Les panneaux de polystyrène ont été bien appuyés contre le mur par une monture en bois permettant de réduire autant que possible les résistances de contact entre le mur et l'isolant (Figure IV-13). Le choix d'une faible épaisseur a été fait pour éviter la limitation du flux ; en fait, si une grande épaisseur d'isolant est ajoutée, le transfert sera de plus en plus limité, ce qui augmentera le risque d'erreurs dans les mesures d'une part, et favorisera le transfert latéral du flux (effet 2D) d'autre part. Rappelons que le mur a été isolé latéralement avec une épaisseur voisine de 10 cm afin de réduire les déperditions latérales et favoriser le transfert de chaleur unidirectionnel dans le mur.

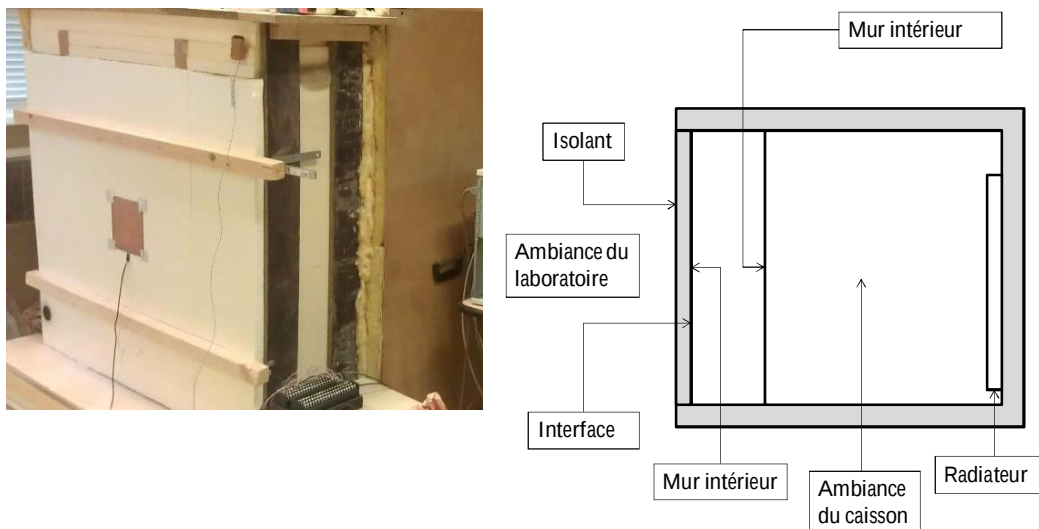


Figure IV-13- Schéma du montage expérimental du mur après isolation

Les régimes étudiés sont les mêmes que ceux du chapitre III : le régime permanent, le régime harmonique, et le régime quelconque.

IV.3.1 Résultats en régime permanent

Pour étudier le mur en régime permanent on impose une température de consigne (radiateur) constante de 60°C.

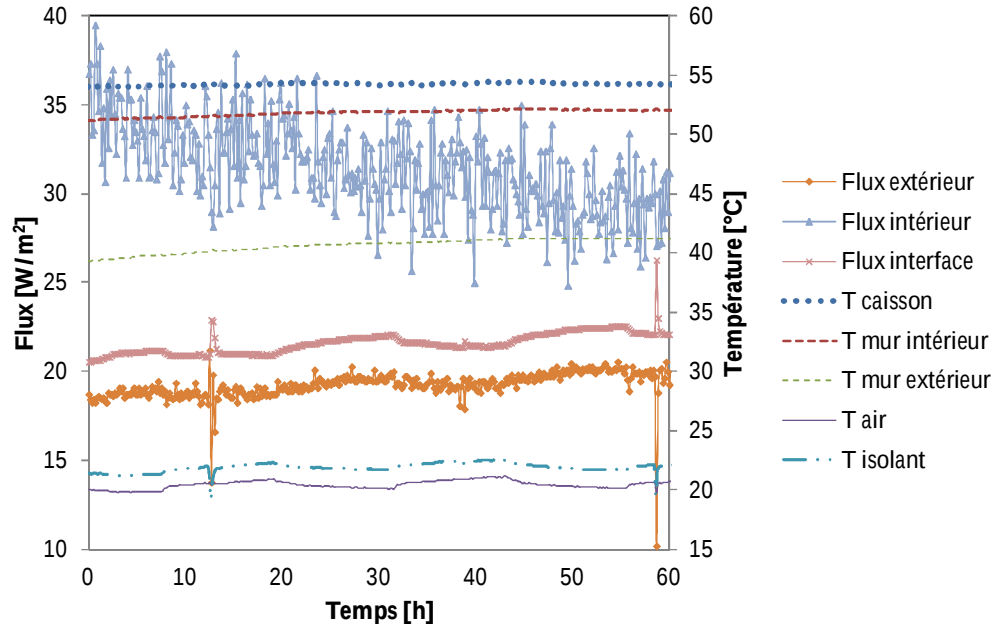


Figure IV-14- Flux et températures en régime permanent dans le cas du mur isolé

A partir de la Figure IV-14, on peut déduire les valeurs moyennes des différents paramètres qui servent à calculer les différentes résistances thermiques du système.

T_c (°C)	T_k (°C)	T_l (°C)	T_{wi} (°C)	T_{wo} (°C)	T_i (°C)	φ_i (W/m²K)	φ_m (W/m²K)
60	54,5	21	52	41	21	28	23

Tableau IV-2- Résultats de températures et de flux dans le cas du régime permanent (mur isolé)

A partir du Tableau IV-2 on peut déduire la résistance thermique du mur R_w , la résistance thermique de l'isolant R_i , et le coefficient d'échange convectif intérieur h_i :

$$R_w = \frac{T_{wi} - T_{wo}}{\varphi_i} = \frac{52 - 41}{29} = 0,379 \text{ m}^2 \text{K} / \text{W}$$

$$R_i = \frac{T_{wo} - T_i}{\varphi_i} = \frac{41 - 21}{23} = 0,870 \text{ m}^2 \text{K} / \text{W}$$

$$h_i = \frac{\varphi_i}{T_k - T_{wi}} = \frac{29}{54,5 - 52} = 11,6 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$$

La résistance thermique du mur (0,379 m²K/W) présente un faible écart de 1,3% par rapport à la valeur calculée dans la partie III.3.3.b (0,384 m²K/W).

La résistance thermique de l'isolant pour une température moyenne de 30°C est :

$$R_i = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,03}{0,037} = 0,811 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$$

La résistance thermique de l'isolant déduite expérimentalement (0,870 m²K/W) présente un faible écart de 6,8 % par rapport à la valeur théorique. Ceci est dû en partie à la résistance de contact entre le mur et l'isolant.

Le coefficient d'échange convectif h_i (11,6 W/m²K) a varié par rapport à sa valeur avant isolation du mur (6,8 W/m²K), ceci peut être dû à l'augmentation de la température de surface du mur.

Les résultats expérimentaux en régime permanent valident donc les différents paramètres déterminés dans la partie III.3.

Avant d'étudier le mur en régime harmonique, il est intéressant de faire une étude fréquentielle permettant de prévoir les résultats attendus et d'avoir une vision globale sur les déperditions thermiques du mur pour différentes configurations d'isolation.

IV.3.2 Résultats en régime harmonique

On cherche à comparer le flux mesuré avec celui obtenu théoriquement à l'aide d'une des méthodes théoriques déjà présentées (partie III.4) puisque la fiabilité des méthodes théoriques a déjà été vérifiée (Figure III-43).

On utilisera la méthode nodale (partie III.4.2.d) en décomposant l'isolant thermique en 2 nœuds qui s'ajouteront aux 10 nœuds formant le mur (Figure III-42).

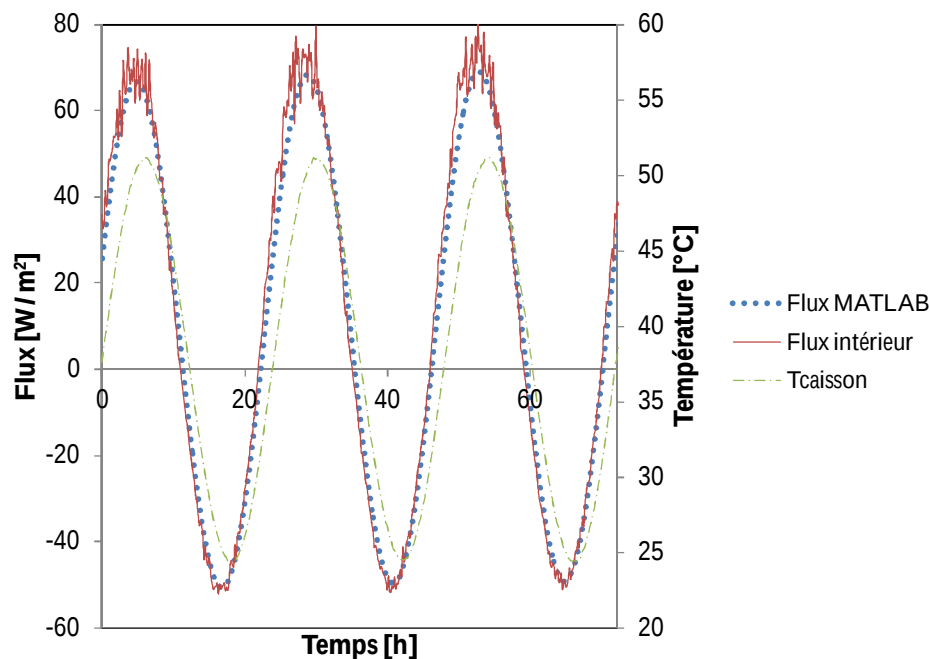


Figure IV-15- Comparaison des deux flux expérimental et nodal dans le cas du mur isolé et sollicité par une température sinusoïdale

Les deux flux, théorique et expérimental sont très comparables. La première impression que l'on peut avoir est que ces résultats pourraient être faux puisque le flux n'est pas amorti en le comparant au flux avant isolation (Figure III-43). Cependant, en se référant au diagramme de Bode relatif à l'isolation intérieure (Figure IV-16) on remarque que pour une épaisseur de 3 cm et une fréquence de 0,262 rad/h (période de 24h), le gain est égal à 4,1.

$$\text{L'amplitude de la température est donnée par : } \Delta T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} = \frac{52 - 25}{2} = 13,5^{\circ}\text{C}$$

$$\text{L'amplitude du flux est donnée par : } \Delta \varphi = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2} = \frac{65 - (-50)}{2} = 57,5 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

$$\text{Donc le gain est égal à : } G = \frac{\Delta \varphi}{\Delta T} = \frac{57,5}{13,5} = 4,26$$

Donc les résultats sont cohérents puisque le gain déterminé expérimentalement et le gain déterminé par le diagramme de Bode par la méthode d'ordre 2 présentent un écart de 3,8%.

IV.3.3 Résultats en régime quelconque

IV.3.3.a Présentation de la méthode

On utilisera la méthode d'ordre 2 pour la modélisation de l'ensemble mur et isolant qui constitue une paroi bicouche (partie III.5.3).

Afin de généraliser le modèle pour une isolation intérieure et extérieure on considère les deux couches « i » (intérieure au caisson) et « e » (extérieure au caisson) et on affectera à la matrice de la couche « i » les propriétés de l'isolant lorsqu'il s'agit d'une isolation extérieure et « e » lorsqu'il s'agit d'une isolation intérieure. Il est utile de préciser que, dans notre modèle expérimental, l'intérieur du caisson représente l'ambiance extérieure et l'ambiance du laboratoire représente l'ambiance intérieure.

La matrice de transfert thermique de l'ensemble des 2 couches « i » et « e », sans prendre en compte les coefficients d'échanges thermiques surfaciques h_i et h_e , s'écrit :

$$A_e = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_i C_i}{2} p + \frac{R_i^2 C_i^2}{24} p^2 & R_i \left(1 + \frac{R_i C_i}{6} p + \frac{R_i^2 C_i^2}{120} p^2 \right) \\ \frac{1}{R_i} \left(R_i C_i p + \frac{R_i^2 C_i^2}{6} p^2 \right) & 1 + \frac{R_i C_i}{2} p + \frac{R_i^2 C_i^2}{24} p^2 \end{bmatrix} \quad (IV-5)$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_e C_e}{2} p + \frac{R_e^2 C_e^2}{24} p^2 & R_e \left(1 + \frac{R_e C_e}{6} p + \frac{R_e^2 C_e^2}{120} p^2 \right) \\ \frac{1}{R_e} \left(R_e C_e p + \frac{R_e^2 C_e^2}{6} p^2 \right) & 1 + \frac{R_e C_e}{2} p + \frac{R_e^2 C_e^2}{24} p^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = 1 + p \left(\frac{R_i C_i + R_e C_e}{2} + R_i C_e \right) + p^2 \left(\frac{R_i C_i R_e C_e}{4} + \frac{R_i^2 C_i^2 + R_e^2 C_e^2}{24} + \frac{R_i^2 C_i C_e + R_i R_e C_e^2}{6} \right) \quad (\text{IV-6})$$

$$A_{12} = R_i + R_e + p \left(\frac{R_i C_i R_e + R_i R_e C_e}{2} + \frac{R_i^2 C_i + R_e^2 C_e}{6} \right) + p^2 \left(\frac{R_i C_i R_e^2 C_e + R_i^2 C_i R_e C_e}{12} + \frac{R_i^2 C_i^2 R_e + R_e^2 C_e^2 R_i}{24} + \frac{R_i^3 C_i^2 + R_e^3 C_e^2}{120} \right) \quad (\text{IV-7})$$

$$A_{21} = p(C_i + C_e) + p^2 \left(\frac{R_i C_i C_e + R_e C_i C_e}{2} + \frac{R_i C_i^2 + R_e C_e^2}{6} \right) \quad (\text{IV-8})$$

$$A_{22} = 1 + p \left(\frac{R_i C_i + R_e C_e}{2} + R_e C_i \right) + p^2 \left(\frac{R_i C_i R_e C_e}{4} + \frac{R_i^2 C_i^2 + R_e^2 C_e^2}{24} + \frac{R_e^2 C_i C_e + R_i R_e C_i^2}{6} \right) \quad (\text{IV-9})$$

En prenant en compte les coefficients d'échanges thermiques surfaciques h_i et h_e , la matrice de transfert thermique de l'ensemble des 2 couches « i » et « e » devient :

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{h_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{h_e} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} + \frac{A_{21}}{h_i} & \frac{A_{11}}{h_e} + \frac{A_{21}}{h_i h_e} + A_{12} + \frac{A_{22}}{h_i} \\ A_{21} & A_{22} + \frac{A_{21}}{h_e} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-10})$$

La matrice finale s'écrit de la forme $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ avec $\begin{cases} A = 1 + q_1 p + q_2 p^2 \\ B = R_t + q_3 p + q_4 p^2 \\ C = C_t p + q_5 p^2 \\ D = 1 + q_6 p + q_7 p^2 \end{cases}$

On utilisera ensuite la méthode de fonction de transfert d'ordre 2.

$$\varphi = \frac{D}{B} \cdot \theta_i = \theta_i \left[\frac{q_7 / q_4 \cdot p^2 + q_6 / q_4 \cdot p + 1 / q_4}{p^2 + q_3 / q_4 \cdot p + R_t / q_4} \right] \quad (\text{IV-11})$$

Pour résoudre la réponse du système à cette fonction de transfert utilisera la méthode d'ordre 2 présentée dans la partie III.5.3.

IV.3.3.b Etude fréquentielle (Bode) et conclusion

Le but de l'étude fréquentielle ici est de comparer l'isolation thermique extérieure et l'isolation thermique intérieure pour différentes épaisseurs. On cherche à montrer comment l'inertie joue un rôle dans les performances thermiques des parois opaques.

En comparant les diagrammes de Bode pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'intérieur et de l'extérieur (Figure IV-16 et Figure IV-17), on remarque que pour les très faibles fréquences (régime quasiment constant, zone 1) les deux configurations d'isolation donnent les mêmes résultats.

Cependant, à partir d'une fréquence de 10^{-3} rad/h les deux diagrammes (Figure IV-16 et Figure IV-17) commencent à différer (zone 2). On remarque que pour une isolation par l'intérieur les différentes courbes qui correspondent aux différentes épaisseurs d'isolant convergent dans le diagramme de gain.

Dans la bande de fréquence entre 10^{-2} et 10^{-1} rad/h (zone 3), l'isolation par l'intérieur a un effet négatif sur la performance du mur puisque le gain du mur isolé est légèrement supérieur à celui du mur à l'état initial (Figure IV-16) ce qui veut dire que le flux intérieur pour le mur isolé est supérieur au flux intérieur pour le mur initial et donc les pertes énergétiques pour le mur isolé sont supérieures à celles du mur initial. D'autre part, pour l'isolation par l'extérieur (Figure IV-17), les courbes de gain correspondant aux différentes épaisseurs d'isolant ne se chevauchent jamais et le gain est diminué par augmentation de l'épaisseur d'isolant aussi bien en hautes fréquences qu'en basses fréquences.

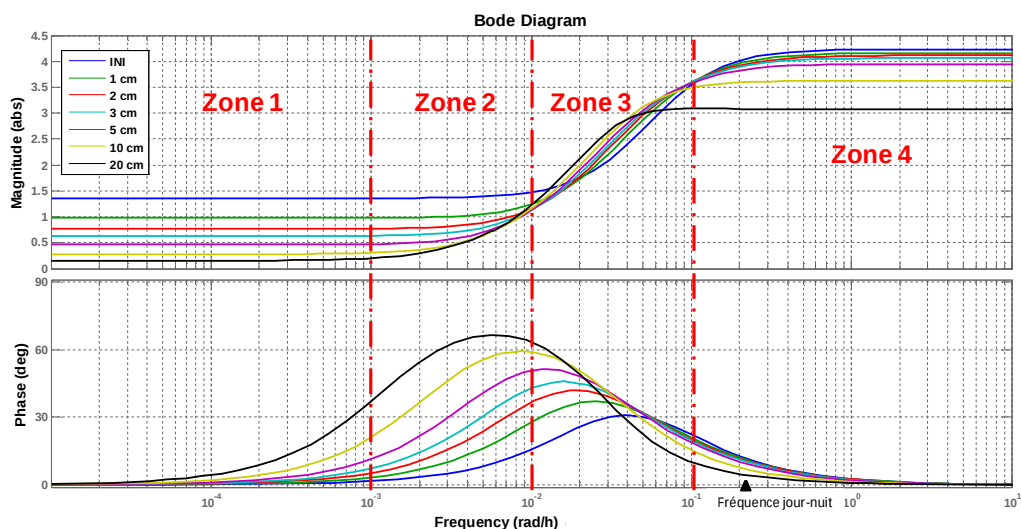


Figure IV-16- Diagramme de Bode pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'intérieur

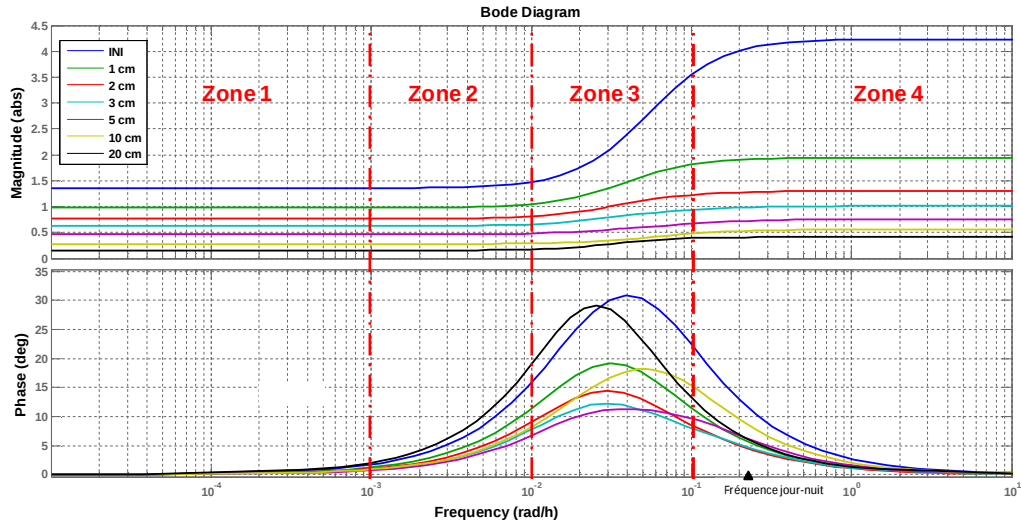


Figure IV-17- Diagramme de Bode pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'extérieur

IV.3.3.c Résultats pour un pas de temps de 20 minutes

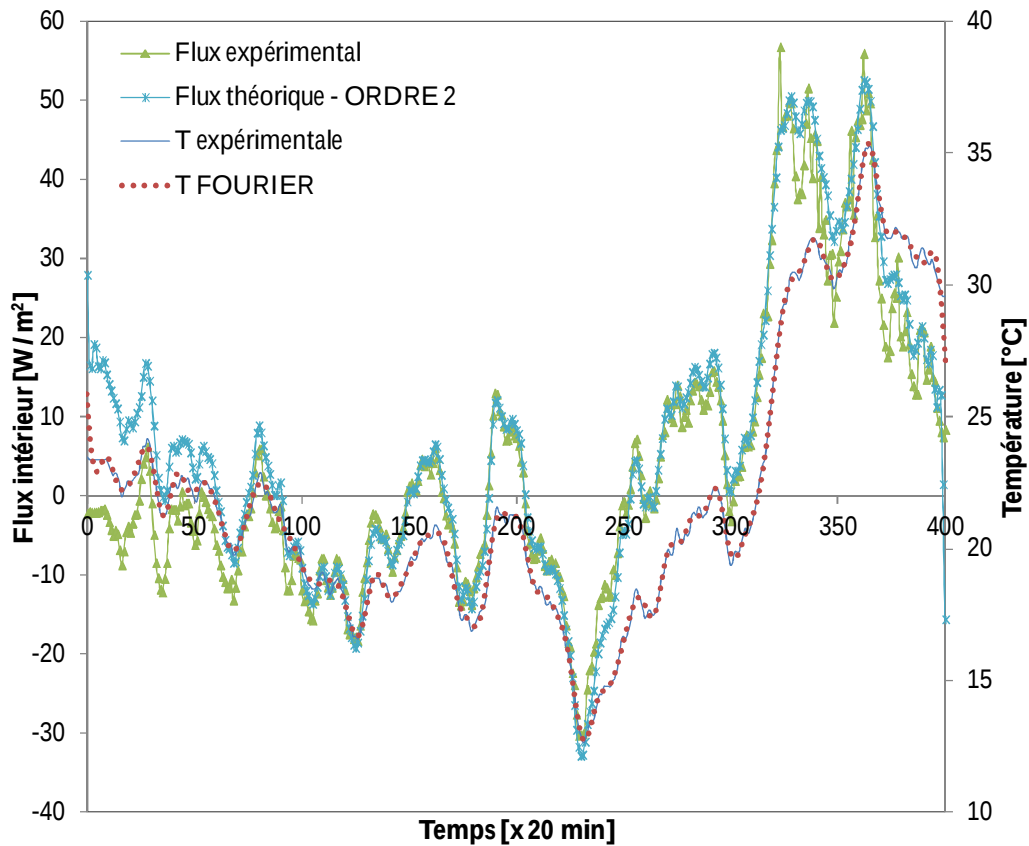


Figure IV-18- Comparaison des deux flux expérimental et théorique (ordre 2) dans le cas du mur isolé pour un pas de temps de 20 minutes

On utilise le même signal de consigne que le signal 1 (voir partie III.5.6.a) mais avec un pas de temps de 20 minutes. Les résultats sont assez satisfaisants cependant on peut noter des perturbations un peu au départ ($0 \leq t \leq 50h$) et surtout aux alentours de $t=350h$ ($330 \leq t \leq 360h$).

Les perturbations au début sont dues à l'historique du mur : en effet, le mur expérimenté stocke une certaine quantité d'énergie ; or, dans notre modèle théorique cette quantité d'énergie est supposée nulle, ce qui explique pourquoi le flux pour le modèle théorique est supérieur au flux expérimental mesuré.

Pour vérifier la cause des divergences entre le flux expérimental et le flux théorique aux alentours de l'instant $t=350h$, nous avons ajouté au graphe précédent les variations de la température de l'ambiance du laboratoire notée T_{air} (Figure IV-19). On remarque que les perturbations de flux sont probablement dues aux variations de la température de l'ambiance puisque les zones de perturbations du flux intérieur correspondent aux zones de variations brusques de la température de l'ambiance du laboratoire.

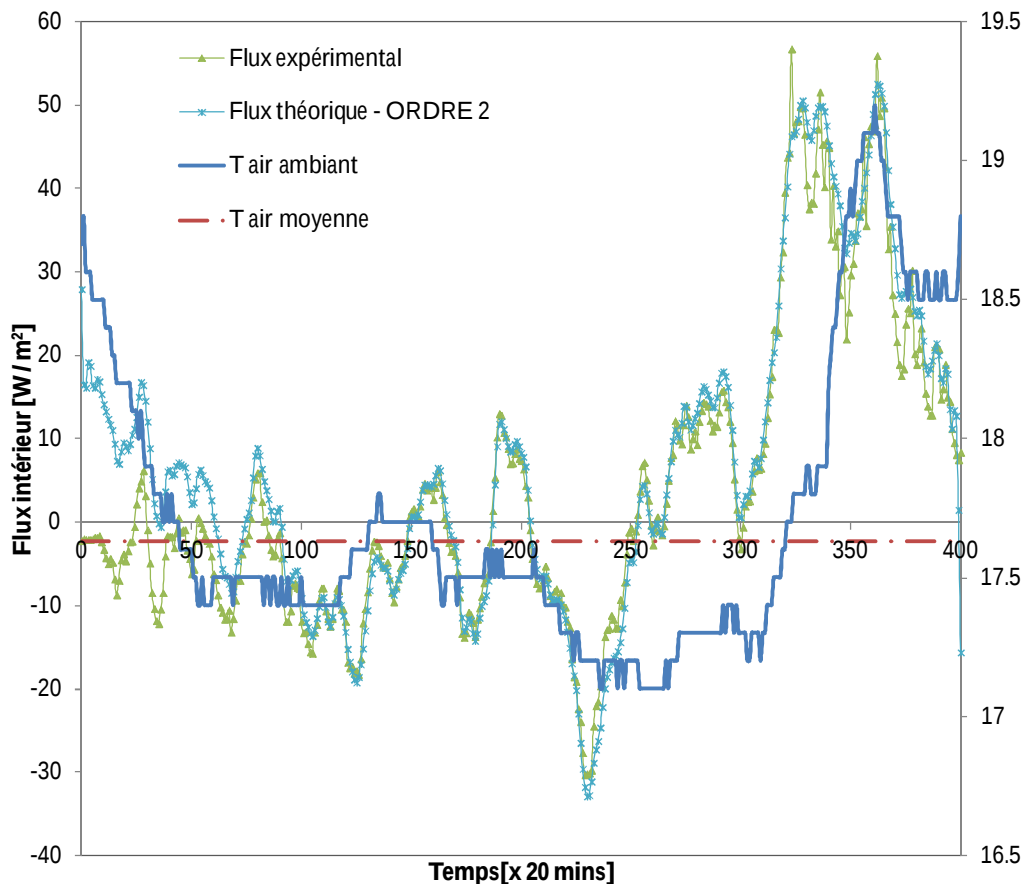


Figure IV-19- Influence de la température de l'air ambiant sur les résultats expérimentaux

IV.3.3.d Résultats pour un pas de temps d'une heure

Dans la majorité des cas courants en thermique du bâtiment, le pas de temps utilisé est de 60 minutes. Afin de vérifier la validité de la méthode pour ce pas de temps et de valider la méthode expérimentale avant de passer à des simulations pour le climat réel de Lille, on utilisera un signal quelconque avec un pas de temps de 60 minutes

On remarque qu'à partir de $t \approx 30$ heures les signaux théorique et expérimental sont très proches. Le flux initial dépend de l'historique du mur (la quantité de chaleur stockée initialement par le mur).

Une autre remarque à noter c'est que pour $t \approx 380$ heures la température du caisson et le flux augmentent brusquement. En effet, à cet instant, la température de consigne passe en-dessous de zéro ; or, pour éviter la congélation de liquide frigorigène circulant dans le radiateur, la température de consigne passe automatiquement à 20°C jusqu'à ce que la température de consigne fournit dépasse 0°C , ce qui entraîne l'augmentation brusque de la température du caisson et par la suite l'augmentation du flux intérieur.

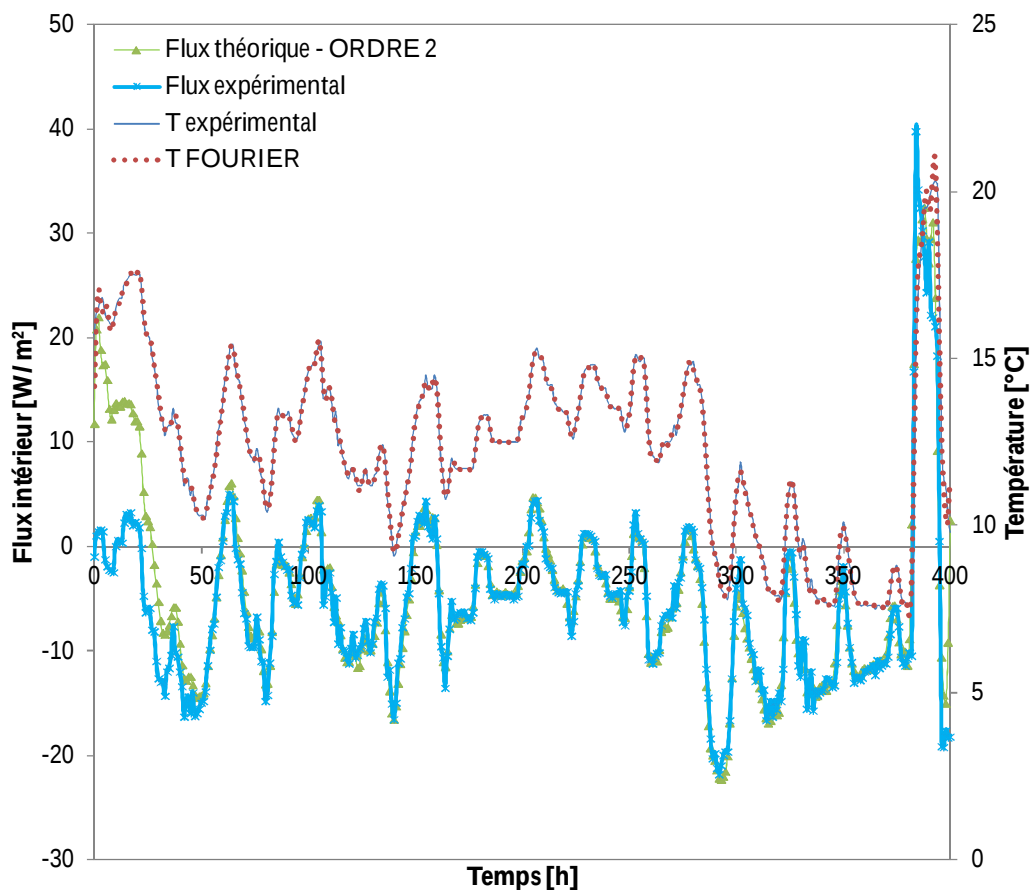


Figure IV-20- Comparaison des deux flux expérimental et théorique (ordre 2) dans le cas du mur isolé et sollicité par une température quelconque pour un pas de temps d'une heure

On remarque aussi que dans le cas du pas de temps de 60 minutes (Figure IV-20) les courbes expérimentale et théorique sont plus proches que dans le cas du pas de temps de 20 minutes (Figure IV-19). Ceci nous permet de conclure que la suite de notre étude qui sera faite avec des pas de temps de 60 minutes est bien valide.

IV.4 Etude d'un mur dans des conditions climatiques Lilloises réelles avec le modèle théorique

Après avoir testé et validé la méthode analytique adoptée (méthode d'ordre 2) en la comparant aux essais expérimentaux, on aborde des cas plus réels en utilisant des conditions extérieures correspondant aux conditions aux limites d'un mur en cas réel à Lille. Dans cette partie on compare différentes configurations d'isolation et différents matériaux en régime quelconque afin de voir l'intérêt des différentes configurations d'isolation et de comparer les différents isolants déjà caractérisés. La période considérée s'étale sur 400 heures à partir du premier janvier minuit (jusqu'au 17 janvier à 16h).

IV.4.1 Détermination des conditions limites extérieures

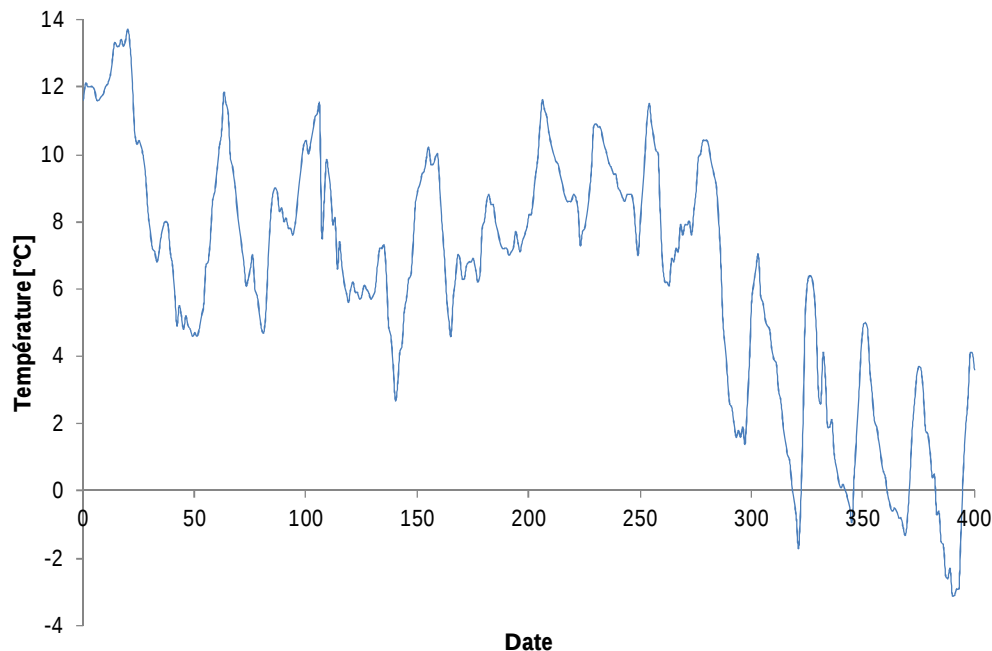


Figure IV-21- Variations de la température extérieure à Lille entre le 1^{er} janvier et le 17 janvier 2012 [83]

Les conditions aux limites extérieures dans le cas réel peuvent être décomposées en deux types (voir partie III.1.1.e):

- Densité de flux de chaleur imposée due au rayonnement solaire (condition de Neumann).
- Relation linéaire entre la densité de flux de chaleur à la surface extérieure du mur et la différence de température entre la surface extérieure du mur et l'ambiance extérieure (condition de Newton- Fourier).

IV.4.1.a Définition de la méthode utilisée

Afin de modéliser les sollicitations extérieures du mur, nous avons adopté la méthode de la température sol-air. Il s'agit de trouver la température extérieure qui, en absence de tout gain solaire radiatif extérieur, donne un flux thermique convectif sur la surface extérieure équivalent à celui de la combinaison entre le flux radiatif et le flux convectif à travers cette surface. Elle est donnée par la formule suivante [84], [77], [85]:

$$T_{sol-air} = T_{air} + T_{sol} = T_{air} + \frac{\alpha \cdot I_t}{h_0} \quad (IV-12)$$

T_e est la température sol-air, T_o la température de l'air extérieur, T_s la température solaire, α l'absorptivité de la surface considérée, h le coefficient de transfert thermique par convection extérieure et I_t le flux radiatif total gagné par la surface.

La température solaire est donc une température fictive qui s'ajoute à la température de l'air extérieur afin de prendre en compte le rayonnement solaire dans les conditions aux limites du mur.

Le flux radiatif avec ses trois composantes (la composante directe, la composante diffuse et la composante réfléchie) est donné par la formule suivante [86] :

$$I_t = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (IV-13)$$

$$I = K_T \cdot I_0 \quad (IV-14)$$

Avec I le rayonnement total reçu sur une surface horizontale et k_T l'indice de clarté, il dépend de la nébulosité et varie selon les endroits et les saisons et varie généralement entre 0,3 (pour des régions ou des saisons pluvieuses) et 0,8 (pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés) [87], [88]. Dans le cas de Lille et pour la saison d'hiver on prendra ce coefficient égal à 0,3 [89].

I_0 est donnée par :

$$I_0 = C_s \cdot (\tau_b + \tau_d) \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \cdot \cos \theta_z \quad (IV-15)$$

$C_s = 1367 \text{ W / m}^2$ (Constante solaire)

n est le numéro du jour dans l'année à compter du premier janvier.

θ_z est l'angle zénithal (angle d'incidence entre le rayonnement direct et le plan horizontal).

ρ_g est la réflectance du sol (ici on prendra $\rho_g = 0,3$)

τ_b et τ_d sont respectivement les ratios des rayonnements directs et diffus au rayonnement extraterrestre sur un plan horizontal.

τ_b est donné par :

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot \exp\left(-\frac{k}{\cos \theta_z}\right) \quad (\text{IV-16})$$

Avec a_0 , a_1 et k des constantes données par :

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - A)^2 \\ a_1 &= 0,5055 - 0,00595 \cdot (6,5 - A)^2 \\ k &= 0,2711 - 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2 \end{aligned} \quad (\text{IV-17})$$

A représentant l'altitude en km.

τ_d est donné par :

$$\tau_d = 0,271 - 0,294 \cdot \tau_b \quad (\text{IV-18})$$

I_d est le rayonnement diffus sur une surface horizontale, il est donné par la corrélation d'Orgill and Hollands par la relation :

$$\frac{I_d}{I} = 1,557 - 1,84 \cdot K_T \quad (\text{IV-19})$$

I_b est le rayonnement direct sur une surface horizontale, il est donné par :

$$I_b = I - I_d \quad (\text{IV-20})$$

R_b est un facteur géométrique, c'est le rapport entre le rayonnement direct sur la surface considérée et celui sur une surface horizontale ; il est donné par :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{IV-21})$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \\ &\quad + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (\text{IV-22})$$

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (\text{IV-23})$$

Avec δ , l'angle de déclinaison donné par :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (\text{IV-24})$$

φ , la latitude de la zone considérée

β , la pente de la surface considérée

ω , l'angle horaire (15° par heure, matin positif, après-midi négatif)

γ , l'angle azimutal de la surface considérée (0 Sud, négatif Est, positif Ouest)

θ , l'angle d'incidence.

IV.4.1.b Application de la méthode au climat de Lille

Dans cette partie on calculera la température sol-air d'un mur vertical ($\beta=90^\circ$) en brique ($\alpha=0,68$) orienté Sud ($\gamma=0^\circ$) et situé à Lille ($\varphi=50,65^\circ$; $A=0$ m). On considère la réflectance du sol environnant de 0,3.

La température de l'air extérieur peut être déterminée à partir de bases de données climatiques [83].

On peut ainsi déterminer le profil quotidien de température solaire pour n'importe quel jour de l'année, à titre d'exemple on peut comparer la température solaire pour les différentes saisons (hiver, printemps, été et automne) (Figure IV-22).

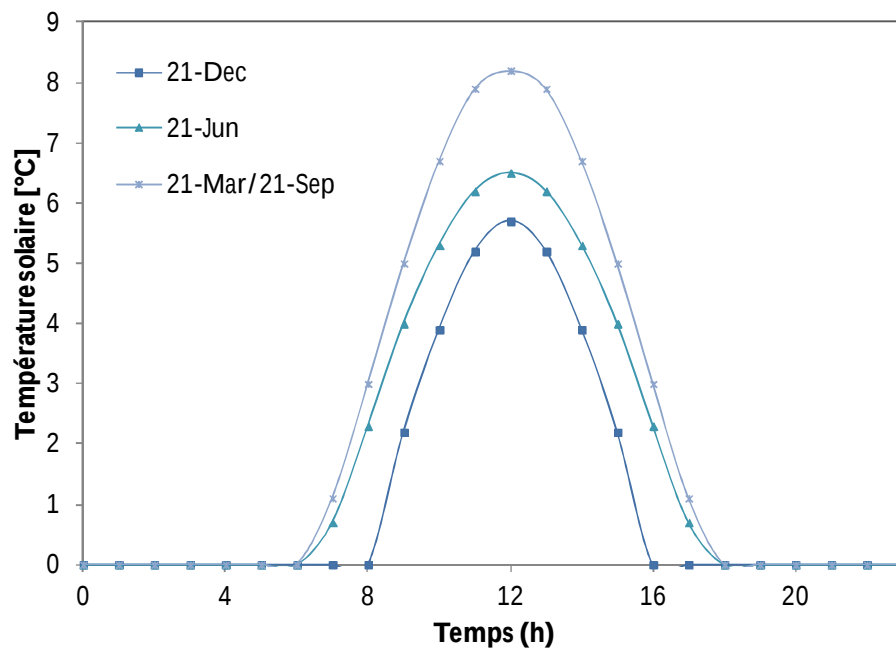


Figure IV-22- Profil quotidien de température solaire pour les différentes saisons

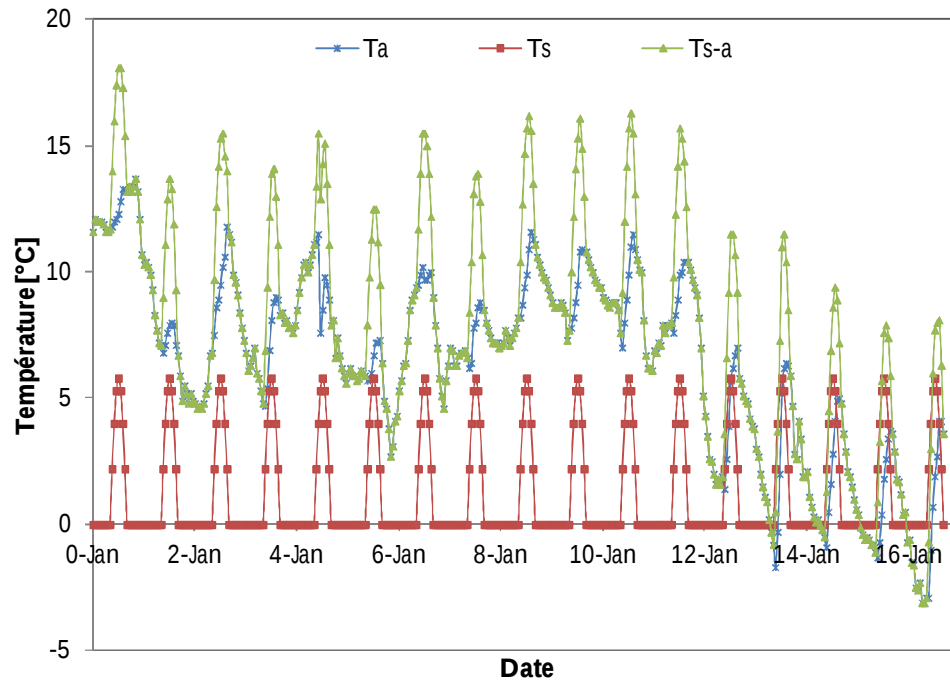


Figure IV-23- Température ambiante et température solaire entre le 1^{er} et le 17 janvier 2012 à Lille

Il est nécessaire de noter que la température solaire dépend de la nébulosité ainsi que de plusieurs paramètres climatiques (humidité, aérosols...) cependant on prendra un indice de clarté moyen constant de 0,3 et donc dans ce cas le profil de température solaire quotidienne variera peu et sera presque le même sur la durée considérée (~17 jours) (Figure IV-23). La courbe $T_{sol-air}$ ressemble à la courbe T_{air} , la différence réside au niveau des pics qui sont plus pointus dans le cas de $T_{sol-air}$, ceci est dû au rayonnement que reçoit la paroi durant la journée et qui se manifeste par un supplément de température fictive (T_{sol}).

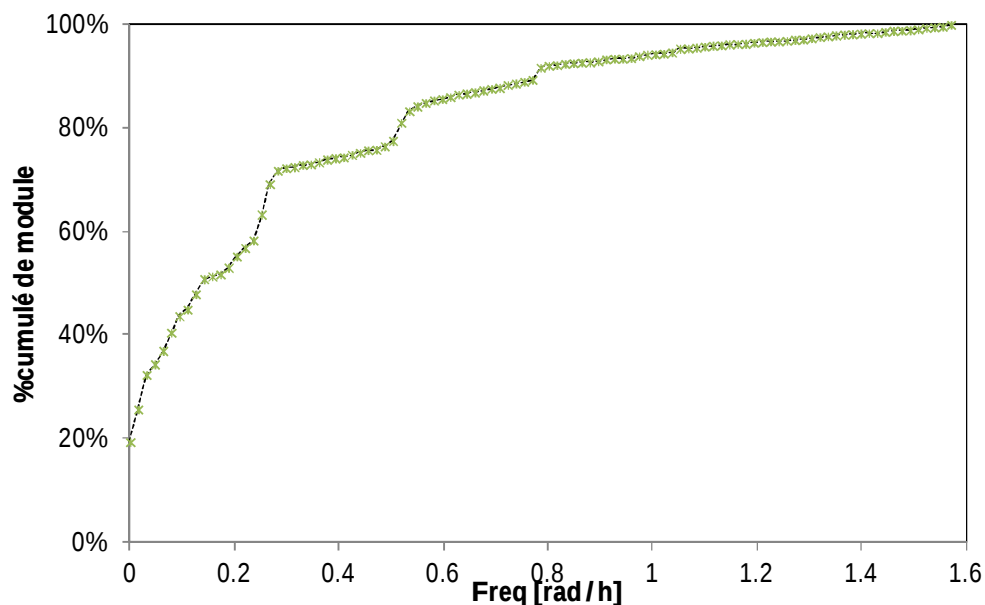


Figure IV-24- Composition des variations de climat réel en fréquences

En faisant une analyse fréquentielle de la température sol-sair (Figure IV-23), on remarque que la plupart des fréquences sont inférieures à 1,2 rad/h (Figure IV-24).

Près de 80% des fréquences sont supérieures à 10^{-3} rad/h, donc l'isolation intérieure et extérieure donnent des résultats différents (Figure IV-16 et Figure IV-17). Pour vérifier et quantifier cette différence on compare théoriquement les évolutions de la densité de flux thermique (flux surfacique) pour les différentes configurations d'isolation en utilisant comme isolant le polystyrène dans un premier temps.

Dans un deuxième temps on comparera les évolutions des densités de flux thermique pour les différents matériaux isolants utilisés (polystyrène, laine de bois, laine de mouton, lin et métisse) pour une isolation thermique intérieure et extérieure avec une épaisseur de référence fixe égale à 10 cm.

IV.4.2 Etude des différentes configurations d'isolation avec du polystyrène

On entend par configurations d'isolation les différentes épaisseurs d'isolants et l'emplacement de l'isolant (intérieur ou extérieur). On étudiera les variations de la densité de flux thermique sur la période précitée (du premier janvier minuit jusqu'au 17 janvier à 16h) pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'intérieur puis de l'extérieur.

N.B. : On éliminera les 30 premières heures de notre présentation graphique et de nos analyses parce qu'elles dépendent de l'historique du mur (voir partie IV.3.3.d).

IV.4.2.a L'isolation intérieure

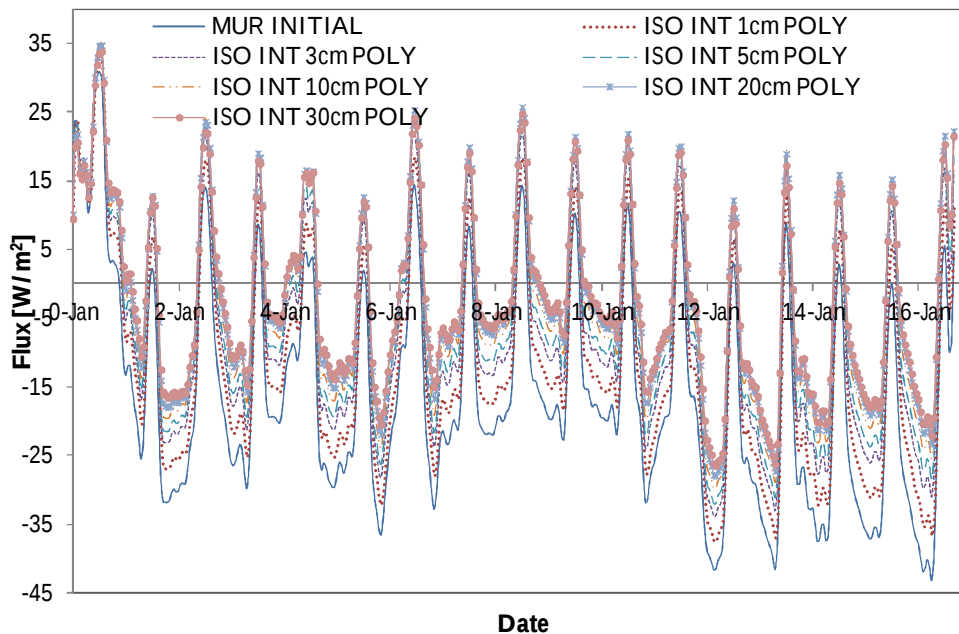


Figure IV-25- Variations de la densité de flux thermique sur la durée considérée pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'intérieur

On remarque que pour l'isolation intérieure le rajout d'épaisseur permet d'économiser de l'énergie mais les variations du flux ne sont pas bien amorties (Figure IV-25).

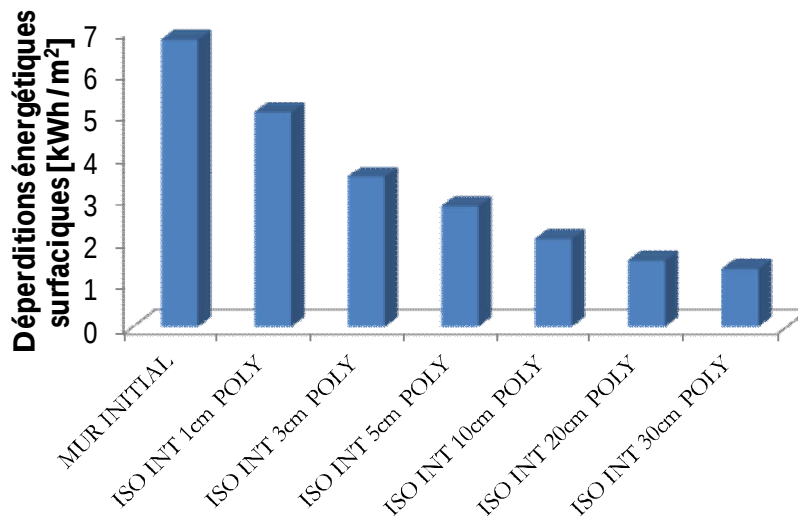


Figure IV-26- Déperditions énergétiques surfaciques en kW.h/m² pour le mur isolé par différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'intérieur sur la durée considérée (400 h)

En comparant les déperditions énergétiques surfaciques pour les différentes épaisseurs d'isolant appliquées de l'intérieur (Figure IV-26) on remarque que les économies d'énergie entre 20 et 30 cm ne sont pas très grandes. De plus, les déperditions surfaciques ne tendent pas asymptotiquement vers zéro en augmentant l'épaisseur de l'isolant.

IV.4.2.b L'isolation extérieure

A l'opposé de l'isolation intérieure, le rajout d'épaisseur d'isolant par l'extérieur permet d'économiser de l'énergie en amortissant le flux (Figure IV-27).

En comparant les déperditions surfaciques par m^2 pour les différentes épaisseurs d'isolant appliquées de l'extérieur on remarque que les économies d'énergie sont en perpétuelle décroissance et tendent à s'annuler en augmentant l'épaisseur de l'isolant (Figure IV-28).

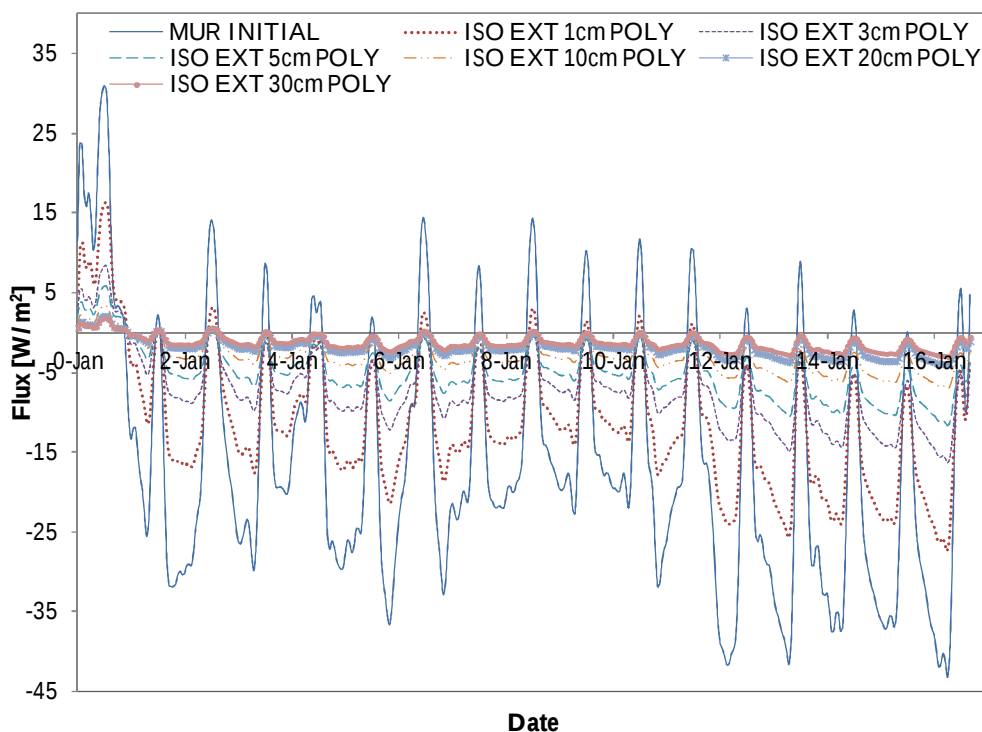


Figure IV-27- Variations de la densité de flux thermique sur la durée considérée pour différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'extérieur

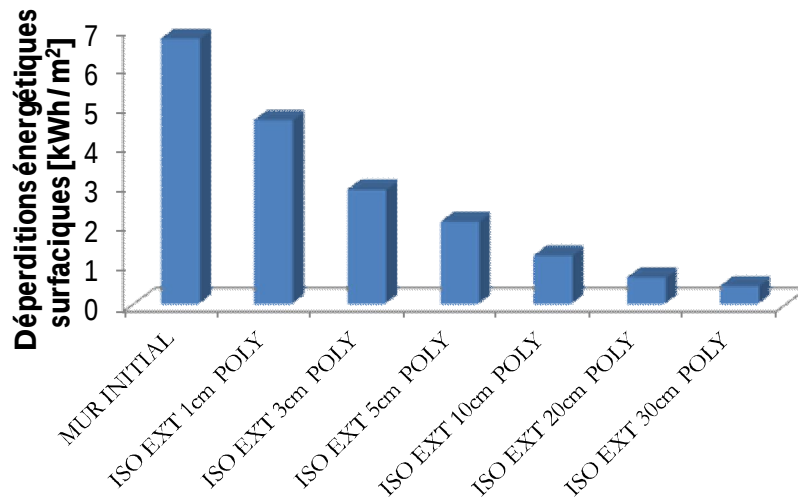


Figure IV-28- Déperditions énergétiques surfaciques en kW.h/m² pour le mur isolé par différentes épaisseurs de polystyrène appliquées de l'extérieur sur la durée considérée (400 h)

IV.4.2.c Comparaison entre isolation par l'extérieur et isolation par l'intérieur

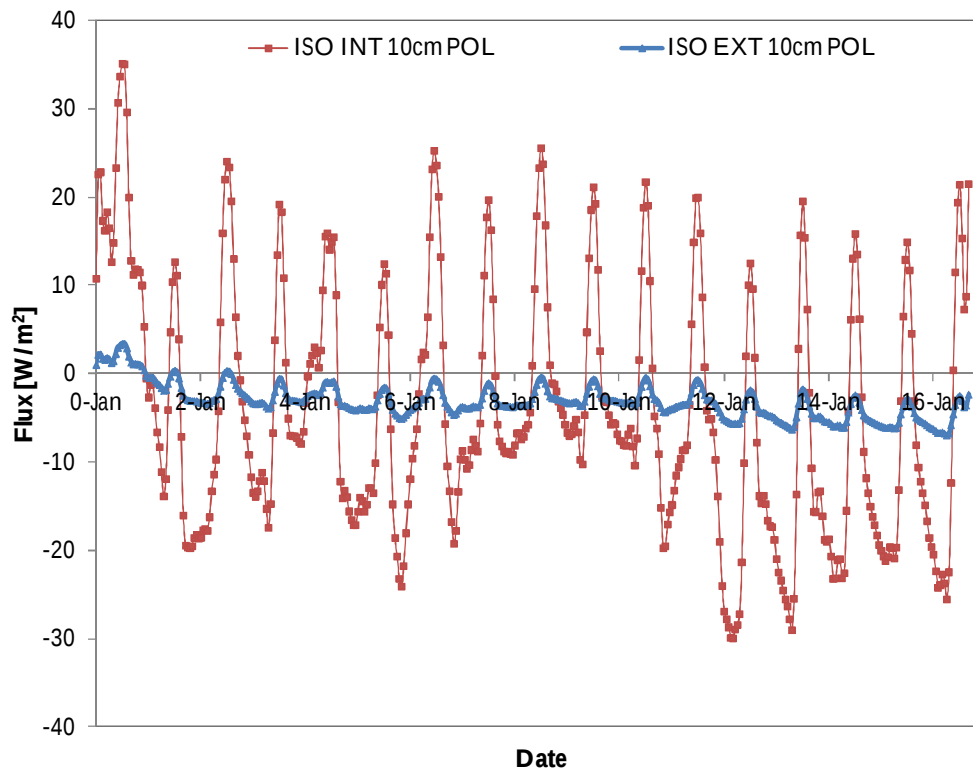


Figure IV-29- Comparaison des densités de flux thermiques entre l'isolation par l'intérieur et l'isolation par l'extérieur pour 10 cm de polystyrène

L'isolation thermique extérieure semble être beaucoup plus efficace que l'isolation thermique intérieure. En effet, on remarque que l'isolation par l'extérieur permet de réduire les variations des déperditions énergétiques et donc de diminuer les pics de déperditions (Figure IV-29). Ceci permet de diminuer la puissance de chauffage installée d'une part et d'assurer un meilleur confort thermique dans le bâtiment en maintenant des déperditions faibles et quasi constantes. Par contre, dans le cas de l'isolation par l'intérieur, le flux surfacique varie beaucoup plus avec un bilan sensiblement égal à celui de l'isolation par l'extérieur.

IV.4.3 Comparaison des différents matériaux

Pour comparer les différents matériaux étudiés dans la partie IV.2.2, on fixera l'épaisseur à 10 cm et on comparera les densités de flux thermiques correspondant aux différents matériaux isolants sur la période d'étude (entre le 1^{er} et le 17 janvier).

Pour une bonne clarté et visibilité des graphes on ne présentera pas les variations de flux dans le mur à l'état initial (avant isolation).

IV.4.3.a L'isolation intérieure

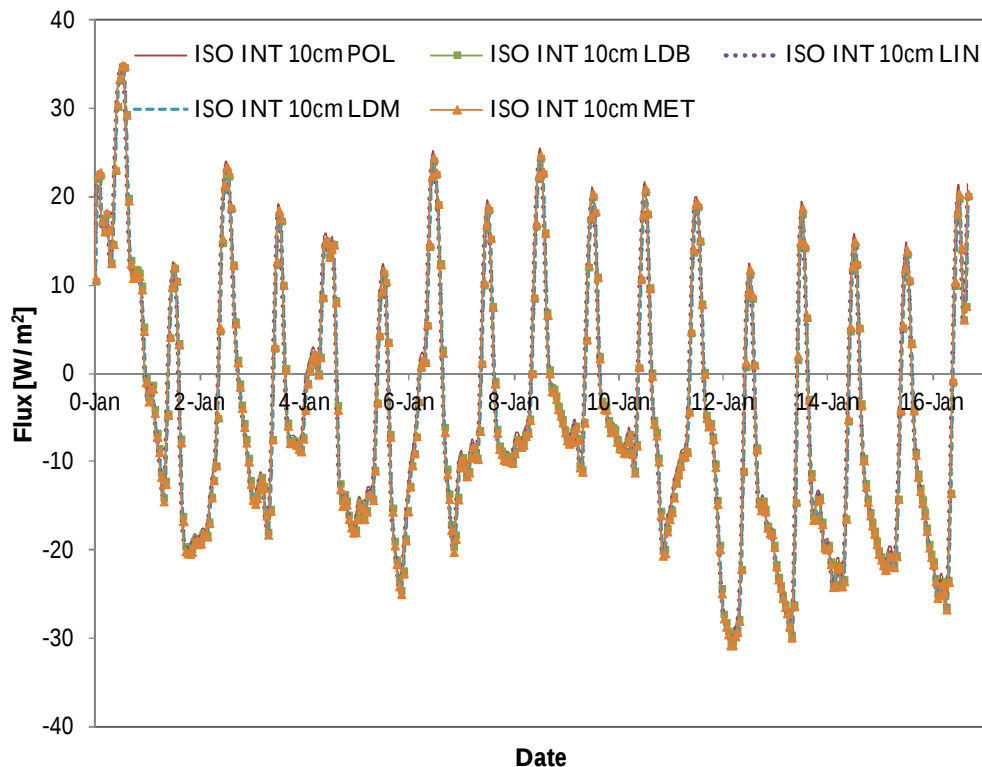


Figure IV-30- Variations de la densité de flux thermique sur la durée considérée pour différents matériaux appliqués de l'intérieur

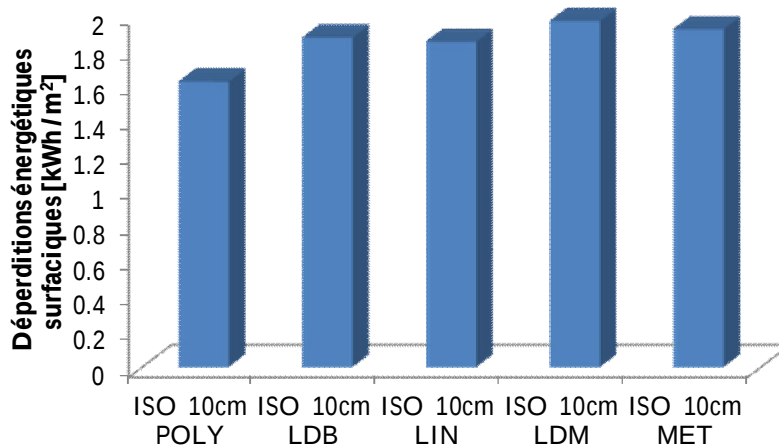


Figure IV-31- Déperditions énergétiques surfaciques en kWh/m² pour le mur isolé par différents matériaux appliqués de l'intérieur sur la durée considérée

Les courbes des différents flux thermiques pour le cas de l'isolation par l'intérieur sont sensiblement confondues (Figure IV-30), ceci nous amène à déduire que l'effet de choix du matériau dans le cas de l'isolation par l'intérieur n'a pas un effet majeur sur le choix de l'isolant.

Les déperditions énergétiques surfaciques sont presque les mêmes pour les différents matériaux appliqués de l'intérieur sur la durée considérée à part une légère différence pour le polystyrène (Figure IV-31).

IV.4.3.b L'isolation extérieure

Les courbes des différents flux thermiques pour le cas de l'isolation par l'extérieur sont plus ou moins proches mais il est possible de les différencier (Figure IV-32), on peut remarquer visuellement que le polystyrène est légèrement mieux que les autres matériaux isolants d'un point de vue thermique par rapport aux autres matériaux.

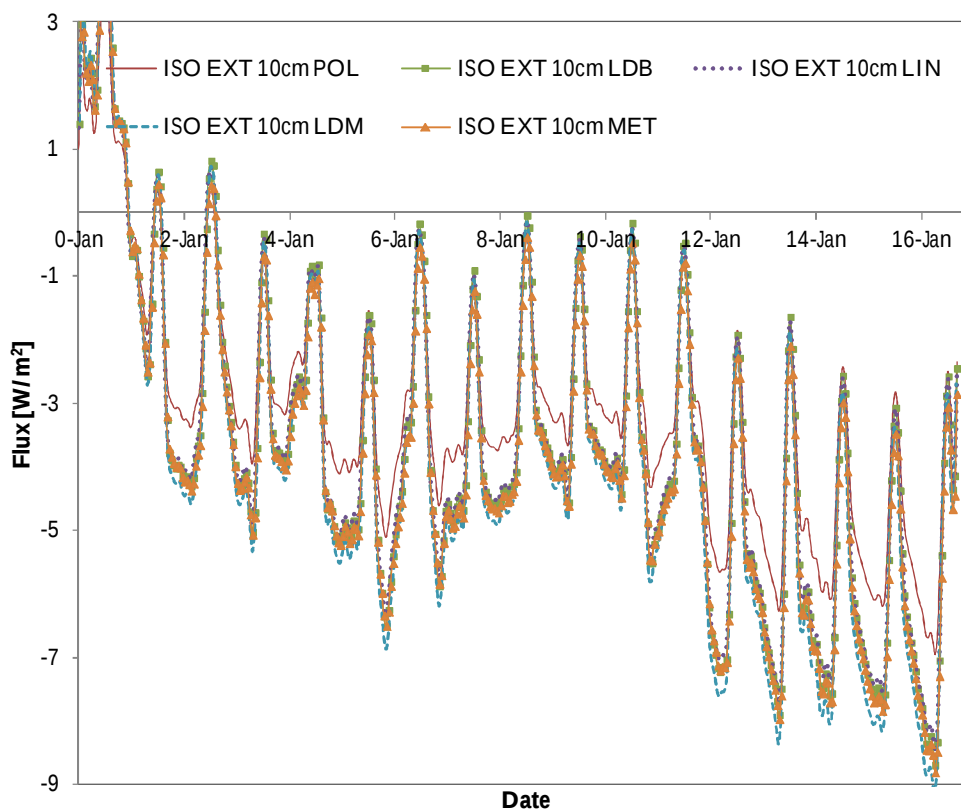


Figure IV-32- Variations de la densité de flux thermique sur la durée considérée pour différents matériaux appliqués de l'extérieur

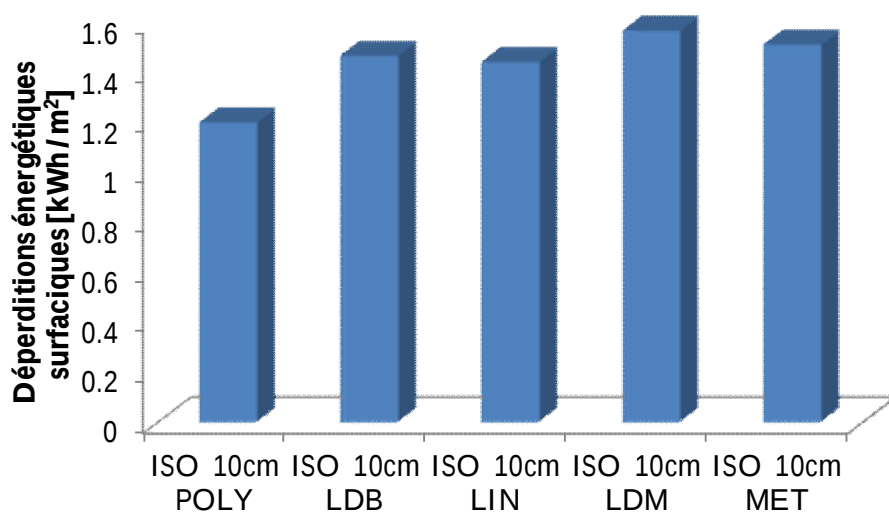


Figure IV-33- Déperditions énergétiques surfaciques en kW.h/m² m² pour le mur isolé par différents matériaux appliqués de l'extérieur sur la durée considérée

Les déperditions surfaciques varient entre les différents matériaux appliqués de l'extérieur sur la durée considérée avec une différence remarquable pour le polystyrène qui semble être le meilleur isolant du point de vue thermique. (Figure IV-33).

IV.4.3.c Synthèse

Le polystyrène est donc légèrement meilleur que les autres isolants selon les critères thermiques surtout lorsqu'il s'agit d'une isolation extérieure.

La performance des matériaux dépend donc de façon essentielle de leur résistance thermique (conductivité thermique) ; la capacité thermique a un rôle secondaire. C'est surtout la capacité thermique du mur qui joue un rôle dans le stockage de chaleur et ceci peut être mis en évidence en comparant les performances du mur isolé par l'intérieur à celles du mur isolé par l'extérieur. En effet, avec l'isolation par l'extérieur, la chaleur stockée par le mur sera restituée vers l'intérieur puisque l'isolant empêche la chaleur stockée de sortir ; par contre, dans le cas de l'isolation par l'intérieur, la chaleur stockée par le mur sera restituée vers l'extérieur puisque l'isolant l'empêchera de pénétrer à l'intérieur.

On note aussi que les écarts de déperditions énergétiques surfaciques pour les différents matériaux dans le cas de l'isolation par l'intérieur sont plus faibles que ceux de l'isolation par l'extérieur. En effet, l'écart entre la valeur la plus faible et la valeur la plus élevée pour l'isolation par l'intérieur est de 6%, tandis que pour l'isolation par l'extérieur il est de 23%.

IV.4.4 Discussion et conclusion

La configuration d'isolation a une influence plus importante sur les performances thermiques d'une paroi que la nature de l'isolant utilisé. L'isolation extérieure est à favoriser par rapport à l'isolation intérieure surtout en termes d'inertie thermique (Figure IV-29).

Les matériaux isolants ont des performances thermiques similaires lorsqu'ils sont appliqués au mur étudié, surtout les matériaux écologiques ; le polystyrène se distingue légèrement des autres matériaux lorsqu'il s'agit d'une isolation par l'intérieur, et un peu plus lorsqu'il s'agit d'une isolation par l'extérieur.

Il est donc intéressant de comparer les différents matériaux en prenant en compte plusieurs critères outre que les critères thermiques tels que le critère hygrométrique, le prix, la recyclabilité et le renouvellement des ressources constituant le matériau ; ainsi que d'autres critères ayant une moindre importance comme l'adaptabilité aux bâtiments anciens existants, la résistance au feu, les performances d'isolation acoustique [90], [91], [92], [71]...

Chapitre V: Simulations Thermiques **Dynamiques des différentes typologies**

V.1 Introduction

Dans le chapitre IV nous avons souligné l'importance de l'inertie et son influence sur la performance thermique des murs des bâtiments anciens en comparant l'isolation par l'intérieur à l'isolation par l'extérieur. Nous avons aussi démontré la similitude des performances thermiques des différents matériaux isolants étudiés à l'échelle du mur. Dans ce chapitre on cherche à étudier le bâtiment dans son ensemble afin de valider les résultats obtenus à l'échelle du mur en s'intéressant uniquement à l'isolation. Dans un premier temps, une étude thermique de l'ensemble des typologies représentatives du parc de logements lillois anciens est réalisée afin de cerner leurs particularités et leurs défauts. Dans un deuxième temps, on analysera l'influence de l'utilisation de divers scénarios d'isolation (définis par le projet URPACT [33]) et de différents matériaux isolants sur la consommation énergétique globale des logements et le confort thermique d'été.

La géométrie des bâtiments est prédéterminée par les plans représentant des constructions typiques de l'agglomération lilloise.

Rappelons ici qu'on étudiera quatre typologies différentes (Annexe Annexe 1) :

- La maison de courée étudiée possède R+1+C (un rez-de-chaussée, un étage, et des combles aménagés), elle possède trois mitoyennetés et a une surface habitable de 62,5 m².
- La maison ouvrière (R+2+C) dont l'étude sera présentée en détails, possède deux mitoyennetés, a une surface habitable de 99,6 m².
- La maison de ville (R+2+C) dont les combles sont aménagés, possède deux mitoyennetés a une surface habitable de 123,5 m².
- La maison bourgeoise (R+2+C) est la plus spacieuse des typologies, elle possède aussi deux mitoyennetés et a une surface habitable de 138 m².

On distingue différents scénarios qui caractérisent les phénomènes liés à l'utilisation du bâtiment ; ces paramètres sont obtenus par formulation d'hypothèses [93], [94]. Il existe des scénarios caractérisant l'occupation, la puissance dissipée, la ventilation ou encore la consigne de température. Ces caractéristiques peuvent varier en fonction des pièces de la maison ; c'est pourquoi il est nécessaire de délimiter des zones dans le bâtiment. Ainsi, il est possible d'assigner à chaque zone les scénarios qui la caractérisent le mieux. Les différentes zones thermiques pour chaque typologie sont présentées en annexe (Annexe 5-a.)

La simulation thermique dynamique (STD) simule au pas de temps horaire le métabolisme du bâtiment en fonction de la météo, de l'occupation des locaux... Elle permet d'identifier et de quantifier l'impact des différentes fuites énergétiques (ponts thermiques, infiltration, ventilation...) afin de valider les concepts et solutions techniques

retenues. Contrairement à l'expérimentation, elle permet de tout essayer, même les solutions les plus originales, car le coût marginal est faible permettant ainsi d'évaluer des solutions techniques et/ou architecturales. Les méthodes de calcul simplifiées fournissent des résultats intégrés sur l'ensemble d'une période et se limitent à l'évaluation de besoins de chauffage ou de climatisation. Une simulation fournit aussi ces résultats mais offre de plus la possibilité de suivre l'évolution des variables d'observation [95].

La STD est constituée de quatre étapes principales. Il faut tout d'abord prendre connaissance des plans des différents habitats et leurs subtilités dans le but de les retranscrire au mieux lors de leur modélisation. Ensuite, il faut déterminer convenablement les scénarios caractérisant les simulations ; il s'agit de mener des recherches précises afin de retranscrire le mode de fonctionnement du bâtiment de manière réaliste. La troisième étape consiste à définir les simulations à effectuer et les réaliser afin de satisfaire l'objectif pour lequel les simulations sont faites. Pour conclure, la dernière étape est l'analyse des données de sorties des simulations afin de déterminer l'impact des différentes variables du projet.

Dans le cadre de cette étude, on utilisera pour la STD le logiciel PLEIADES + COMFIE vue la simplicité de son utilisation et sa compatibilité avec les cas étudiés qui ne présentent pas de grandes complications. Ce logiciel intègre plusieurs bibliothèques de données thermiques sur les matériaux et les éléments constructifs, les menuiseries, les états de surface, les albédos et les écrans végétaux. Il comprend aussi des bibliothèques de modes de gestion du bâtiment étudié selon un scénario horaire pour une semaine-type (occupation, apports internes, et températures de consigne de chauffage).

V.2 Hypothèses et données d'entrée

Les données d'entrée représentent l'ensemble des données nécessaires pour caractériser un bâtiment donné, elles concernent les données morphologiques du bâtiment, la composition de ces différentes parois, sa situation géographique (données climatiques et microclimatiques), ses différents systèmes (ventilation, chauffage, appareils électriques...) et son utilisation (scénarios d'occupation, de ventilation, d'occultation, d'utilisation d'appareils électroménagers..).

V.2.1 La composition des parois

A l'état initial, les parois des différentes typologies ont des coefficients de déperditions surfaciques élevées, entre 2 et 3 W/m².K pour la plupart (Figure V-1), d'où l'intérêt de l'isolation thermique. Notons que les murs en parpaing et la toiture en zinc sont spécifiques aux extensions qui ont été rajoutées aux différentes typologies pour augmenter leur surface habitable sauf dans le cas de la maison de courée où les contraintes de mitoyennetés ne le permettaient pas. Les propriétés thermiques des divers éléments constituant les parois sont présentées en annexe (Annexe 5-b.).

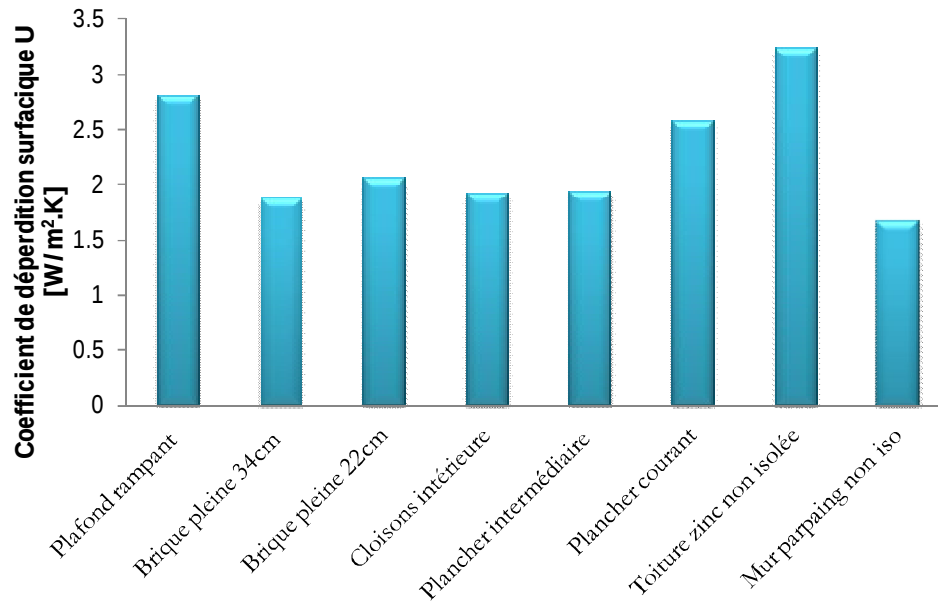


Figure V-1- Coefficients de déperdition surfacique des différents parois

V.2.2 Les données climatiques

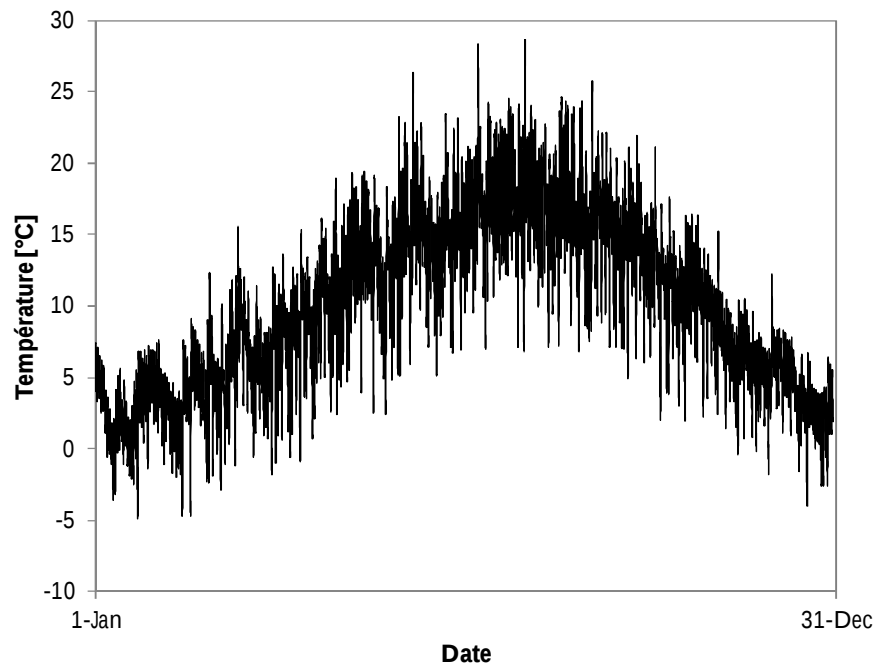


Figure V-2- Variations annuelles de la température extérieure (Lille)

Le climat extérieur est évidemment le paramètre le plus déterminant dans l'étude thermique d'un bâtiment ; il faut donc simuler les conditions climatiques en se rapprochant autant que possible d'un modèle réel. Le logiciel PLEIADES+COMFIE

possède une bibliothèque de données météorologiques au format TRY (Test Reference Years). Les données utilisées afin de créer le fichier météo TRY de Lille ont été obtenues sur le site infoclimat.fr avec comme station de référence Lille-Lesquin [96].

V.2.3 Scénario de chauffage

En période de chauffe, la maison est régulée de la façon suivante, la consigne de température en journée (de 7h à 22h) est de 19°C et la nuit (de 22h à 7h) de 16°C. Cette période s'étend du 1^{er} octobre au 20 mai [97].

V.2.4 Les infiltrations et les débits d'air

Le renouvellement de l'air intérieur est principalement assuré par l'infiltration naturelle qui est importante sur ces types de bâtiments, l'étanchéité à l'air n'étant pas d'actualité lors de leur construction. Le taux d'infiltration est alors fixé à 2 volumes/heure, c'est-à-dire que le volume d'air échangé chaque heure est égal à 2 fois celui de la pièce [98].

Outre que les infiltrations, un débit d'air provient aussi de l'ouverture des fenêtres. On suppose que les habitants ouvrent toutes les fenêtres de leur maison en moyenne 10 min/jour.

V.2.5 Les apports internes

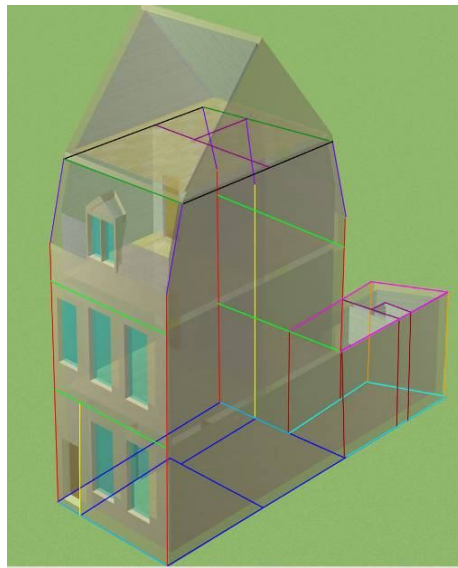
Le scénario de puissance dissipée simule les apports internes liés notamment aux appareils électroménagers. Tout d'abord, il faut préciser que seuls les appareils électroménagers de consommation électrique importante ont été pris en compte. Les apports internes minimes que peuvent produire quelques appareils électriques comme un réveil matin ou encore un sèche-cheveux (apport important mais temps d'utilisation très faible) ont été négligés. Le calcul des apports internes est basé sur l'hypothèse que l'ensemble de l'énergie électrique consommée est transformé en chaleur. Cette hypothèse s'explique du fait que la plupart des appareils sont de base des résistances électriques et donc la puissance électrique est principalement transformée en chaleur par effet joule.

V.2.6 Les scénarios d'occupation

Les scénarios d'occupation permettent de caractériser l'utilisation des pièces de la maison. En effet, chaque corps humain est source de chaleur et participe aux apports internes d'une habitation. Il est donc important de prendre en compte ce facteur. Afin de définir le plus précisément possible cette caractéristique il convient de créer des scénarios d'occupation pour chaque zone de la maison. Ces scénarios se présentent comme des plannings hebdomadaires. Dans cette étude, il a été convenu de considérer que chaque maison est occupée par une famille moyenne composée de 4 personnes.

V.2.7 Les ponts thermiques

On considère dans notre étude uniquement les ponts thermiques linéiques caractérisés par le coefficient ψ qui représente les déperditions par mètre linéique de pont thermique. On calcule alors le coefficient ψ pour chaque type de jonction à l'aide d'un logiciel d'étude de transfert de chaleur « HEAT » selon la méthode donnée par la norme NF EN ISO 10211-1 (annexe Annexe 5-d.).



- Mur de refend / plancher bas
- Mur extérieur 34/plancher bas
- Mur parpaing extérieur/plancher bas
- Mur extérieur (34)/Mur extérieur (22)
- Mur extérieur parpaing/ Mur extérieur parpaing
- Mur extérieur 34/Refend
- Mur extérieur Parpaing/Refend (34)
- Plancher intérieur/ Mur extérieur 34
- Plancher haut/Rampant
- Parpaing/Plafond terrasse
- Plancher terrasse/ Mur extérieur 34
- Refend/ Plancher haut
- Mur extérieur 22 Pignon/Rampant
- Plancher haut/Rampant

Figure V-3- Localisation des différents ponts dans la maison bourgeoise

V.3 Résultats avant isolation thermique

On étudie tout d'abord les différentes typologies à l'état existant, c'est-à-dire avant isolation, afin de les comparer et de mettre en évidence leurs spécificités thermiques. Ensuite, on analyse en détails la maison ouvrière à l'état existant en montrant l'évolution de la température dans la zone la plus occupée (salon + salle à manger) pendant la semaine la plus froide et la semaine la plus chaude. On étudie aussi le confort thermique et l'influence des mitoyennetés sur les besoins de chauffage dans cette typologie.

V.3.1 Comparaison des performances énergétiques des différentes typologies

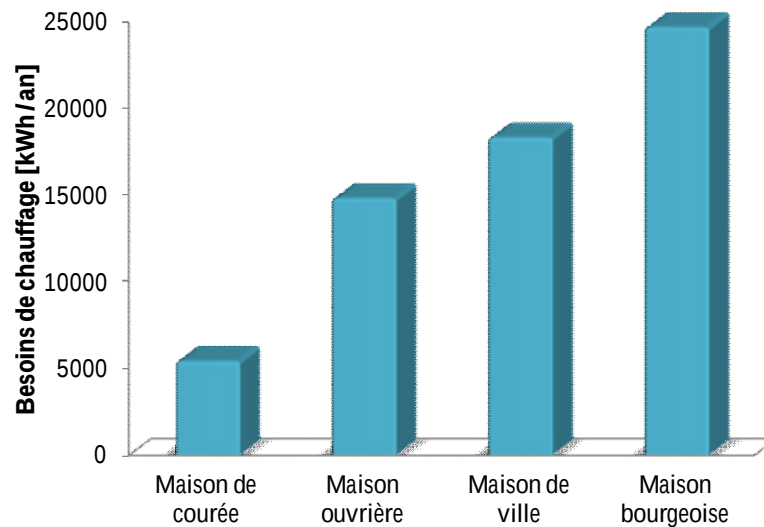


Figure V-4- Comparaison des besoins énergétiques annuels pour les différentes typologies

Les besoins annuels de chauffage par typologie (Figure V-4) montrent que la maison bourgeoise est la maison la plus énergivore et que la maison de courée est la moins énergivore. Ces résultats sont cohérents vues les surfaces de déperditions des différentes typologies.

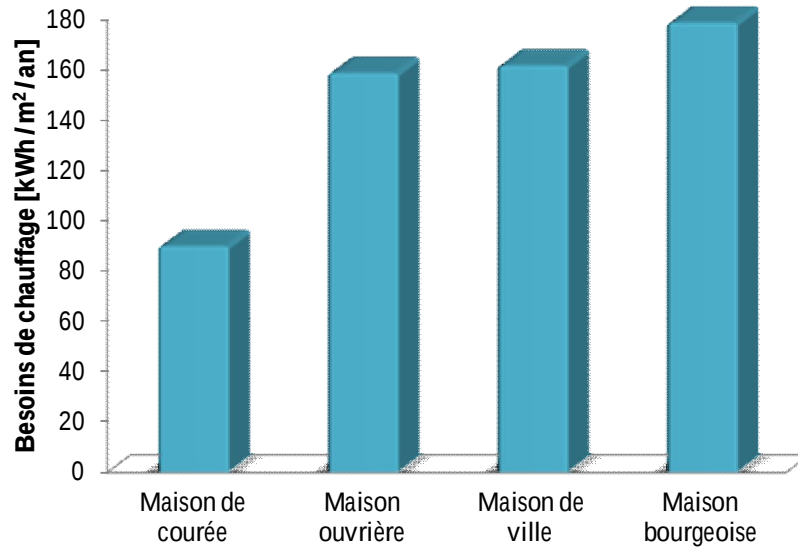


Figure V-5- Comparaison des besoins énergétiques annuels pour les différentes typologies par unité de surface habitable

Les besoins annuels de chauffage par m² habitable (Figure V-5) sont sensiblement les mêmes pour les différentes typologies mise à part la maison de courée qui a des consommations nettement inférieures. Ceci est principalement dû au fait que cette maison possède 3 mitoyennetés ce qui diminue considérablement ses surfaces déperditives.

V.3.2 Performances énergétiques de la maison ouvrière avant isolation

Dans ce qui suit, on présente uniquement les résultats graphiques pour la maison ouvrière puisqu'elle est la plus répandue dans la ville de Lille.

V.3.2.a Comparaison de la température intérieure dans la zone la plus occupée

Il est intéressant d'étudier le confort thermique dans la maison et plus particulièrement dans la zone la plus occupée qui est généralement celle qui comprend le salon et la salle à manger. On montre alors l'évolution de la température durant la semaine la plus chaude et la semaine la plus froide (Figure V-6 et Figure V-7).

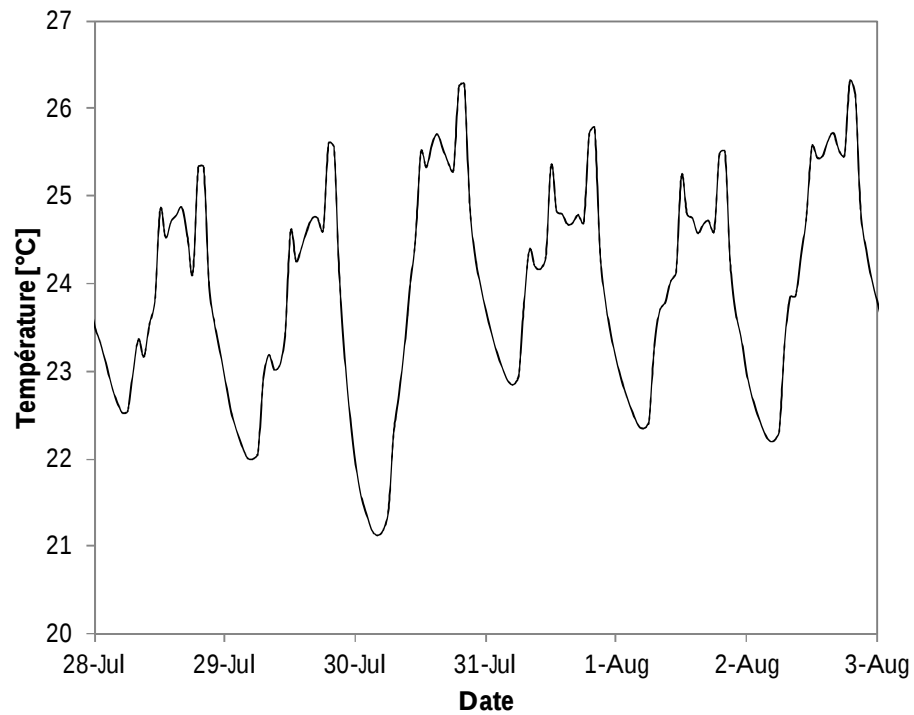


Figure V-6- Evolution de la température dans la zone la plus occupée (salon + salle de séjour) pendant la semaine la plus chaude (28 Juillet – 3 Aout)

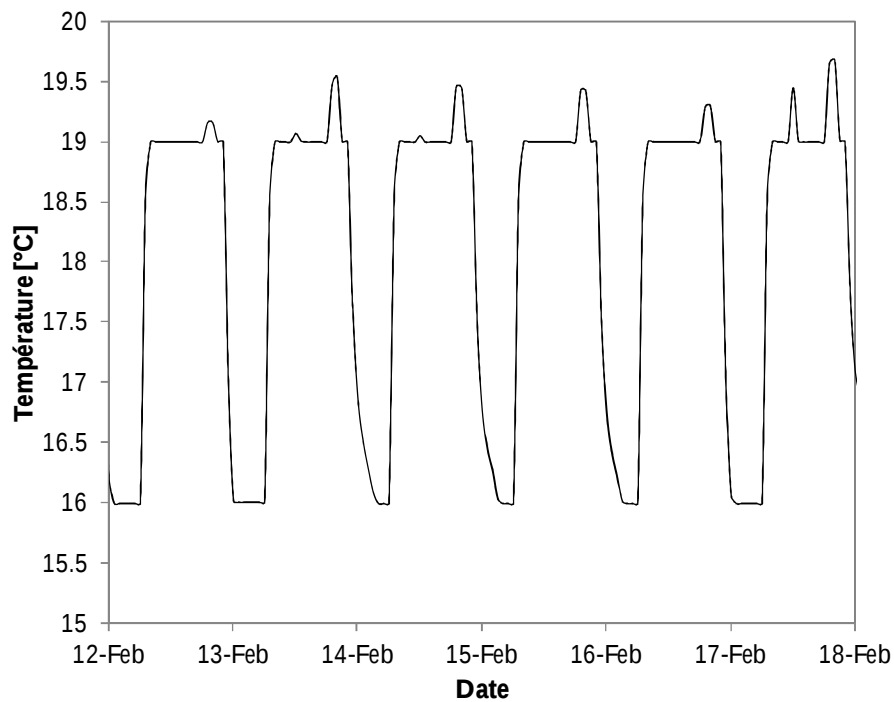


Figure V-7- Evolution de la température dans la zone la plus occupée (salon + salle de séjour) pendant la semaine la plus froide (12 Février – 18 Février)

On remarque que l'évolution de la température pendant la saison de chauffe est très voisine de la température de consigne fixée à 16°C la nuit et 19°C le jour.

Pour la semaine la plus chaude on observe des températures variant entre 21°C et 26°C dans la zone la plus occupée. L'inconfort thermique d'été n'est donc pas problématique puisque les températures restent dans une marge de confort acceptable.

V.3.2.b Confort thermique dans la pièce la plus occupée

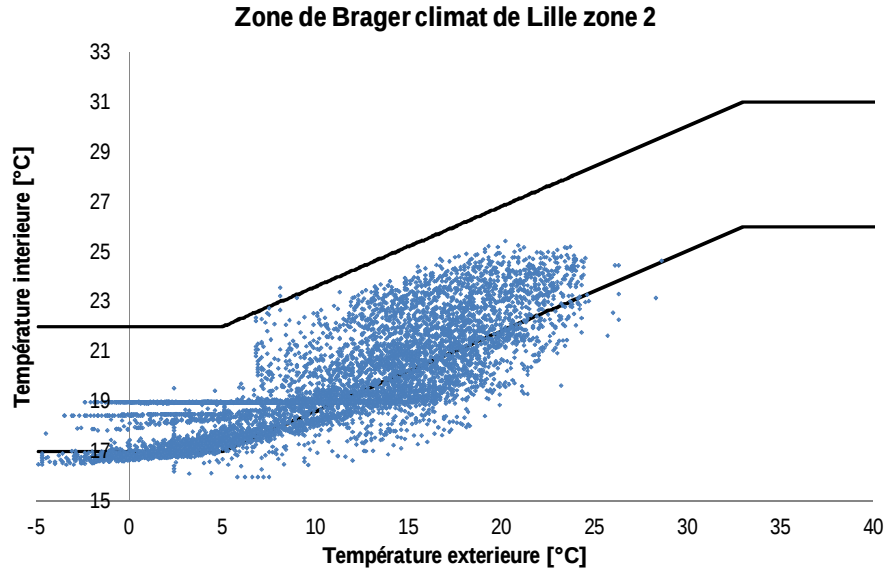


Figure V-8- Zone de Brager pour la maison ouvrière à l'état existant (avant isolation)

La zone de Brager est un graphique des températures intérieures en fonction des températures extérieures ; si la majorité des points se trouvent dans cette zone, alors il n'y aura pas d'inconfort, mais si les points sont situés en dehors de cette zone il y a risque d'inconfort.

La Figure V-8 montre que le problème d'inconfort thermique n'existe pas. Les quelques points se situant aux alentours de 16°C correspondent à la température de consigne qui est fixée à 16°C durant la nuit.

V.3.2.c Diagramme de Sankey

Dans le diagramme de Sankey, les besoins bruts représentent la quantité totale d'énergie qu'il faut fournir au bâtiment pour compenser les pertes thermiques du bâtiment en fonction du scénario de chauffage. Ces besoins bruts sont compensés par les apports internes utiles et l'énergie fournie par le système de chauffage (besoins thermiques nets). L'indice "Énergie à fournir" exprime la part d'énergie de chauffage par rapport aux déperditions. Il est calculé en effectuant deux simulations : une simulation normale,

permettant de déterminer les besoins thermiques nets et une deuxième simulation sans apports solaires et sans apports internes (ni occupants, ni appareils), permettant de déterminer les besoins bruts.

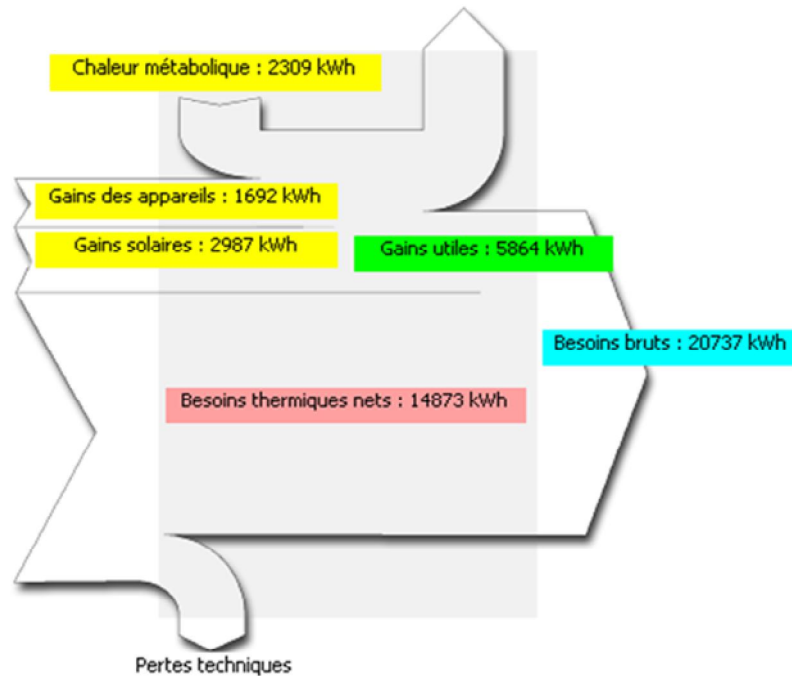


Figure V-9- Diagramme de Sankey pour la maison ouvrière à l'état existant (avant isolation)

V.4 Résultats après isolation thermique

V.4.1 Définition des différents scénarios d'isolation

On utilise les mêmes matériaux isolants étudiés dans le chapitre IV à savoir : le polystyrène, le lin, la laine de bois, la laine de mouton, la laine de bois et le métisse, avec les mêmes propriétés thermiques trouvées dans la caractérisation expérimentale (Tableau IV-1).

On utilisera trois scénarios différents pour l'isolation (Tableau I-1). Chacun de ces niveaux choisis correspond à un niveau de consommation d'énergie à ne pas dépasser pour satisfaire les exigences d'un type de label. Pour le label HPE (Haute Performance Energétique) rénovation, le seuil de consommation d'énergie primaire ($C_{ep, max}$) a été fixé à 150 kWh_{ep}/m².an; 80 kWh_{ep}/m².an pour le niveau BBC rénovation; et pour 50 kWh_{ep}/m².an le niveau BBC neuf. La réglementation pondère ces valeurs avec deux coefficients (a et b) qui dépendent respectivement de la zone géographique et de l'altitude. Pour la région du Nord Pas de Calais, a=1,3 et b=0. On obtient alors nos niveaux énergétiques en multipliant les $C_{ep, max}$ de chaque niveau par la somme (a+b).

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	
Murs en façade ou en pignon	4 (16cm)	5 (20cm)	6 (24cm)	Résistances thermiques m ² .K/W
Rampants de toiture et plafonds des combles	6 (24cm)	8 (32cm)	10 (40cm)	
Plancher de combles perdus	7 (28cm)	8,5 (34cm)	10 (40cm)	
Toiture-Terrasses	5 (20cm)	6,5 (26cm)	8 (32cm)	
Plancher bas sur sous-sol ou vide sanitaire	3 (12cm)	4,5 (18cm)	6 (24cm)	
Plancher bas sur terre plein	3 (12cm)	3,5 (14cm)	4 (16cm)	
Porte d'entrée	1,8	1,8	1,8	Coefficients de transmission W/m ² K
Fenêtre ou portes fenêtres bois	1,4	1,4	1,4	
Fenêtre ou portes fenêtres PVC	1,6	1,6	1,6	

Tableau V-1- Epaisseurs d'isolant à appliquer pour les différents scénarios d'isolation [33]

Les packs se décomposent d'abord en 3 scénarios d'isolation possibles, chacun d'eux vise à atteindre un niveau d'énergie spécifique (plus les résistances utilisées sont grandes, plus le niveau d'énergie est meilleur).

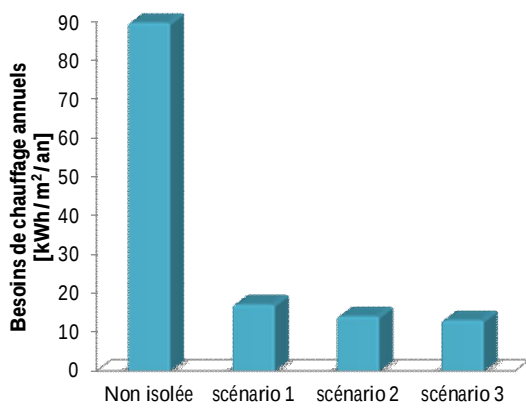
Le scénario 1 correspond aux performances techniques minimales requises pour pouvoir bénéficier des aides de l'Etat (crédit d'impôt s'appliquant aux dépenses effectuées entre le 1er janvier 2005 et le 31 décembre 2015) [99] ; le scénario 3 correspond aux performances thermiques relatives au bâtiment passif BBC (neuf) ; et le scénario 2 correspond à une performance intermédiaire entre les scénarios 1 et 3.

Par exemple, dans le scénario numéro 1, les murs en façade ou en pignon doivent inclure un isolant dont la résistance thermique est égale à 4. Pour cela la composition d'un tel mur dans une maison Lilloise sera de 34 cm de briques, puis 1cm de torchis, environ 16 cm d'isolant (elle dépendra de l'isolant) et une Placoplatre® BA13.

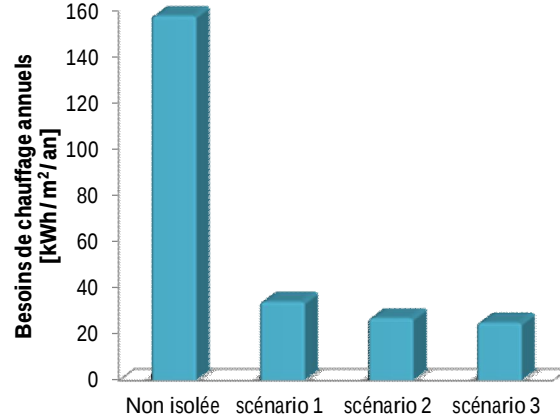
Les techniques de mises en place de l'isolant dépendent de sa nature ; par exemple, pour un isolant rigide tel que le polystyrène, il sera collé directement avec une plaque de plâtre BA13, ou bien vissé sur des tasseaux qu'on aurait fixé dans le mur. Dans le cas d'un isolant qui se présente sous forme de rouleaux tel que la laine de mouton, il faudra fixer des montants verticaux de la même épaisseur que le rouleau d'isolant puis au fur et à mesure de la pose on place des tasseaux horizontalement par exemple tous les 70 cm afin de maintenir le rouleau d'isolant plaqué contre le mur. Puis on vient fixer une plaque de BA13 sur les tasseaux. Une deuxième méthode est envisageable afin d'éviter la lame d'air entre l'isolant et la plaque de BA13. On fixe toujours des montants verticaux entre chaque largeur de rouleaux puis on vientagrafer les rouleaux d'isolant sur le coté des montants. Puis on vient fixer la plaque de BA13 sur les montants.

L'objectif des simulations étant d'évaluer les différents scénarios d'isolation, les autres modifications concernant la ventilation, les menuiseries et la porte d'entrée restent inchangées pour les trois scénarios. On utilise une ventilation double flux avec échangeur ayant un rendement de 80%, des menuiseries double vitrage en PVC ayant un coefficient de transmission thermique surfacique $U_w = 1,4 \text{ W/m}^2.\text{K}$, et une porte d'entrée en bois ayant un coefficient de transmission thermique surfacique $U = 1,8 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

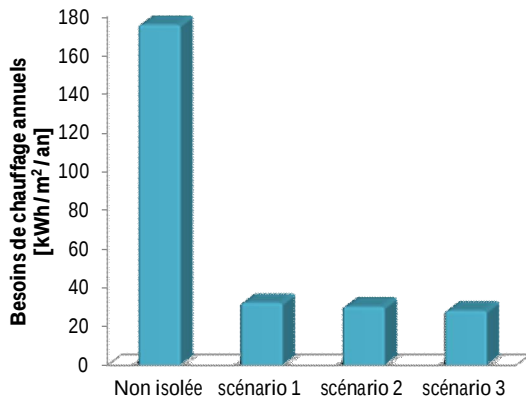
V.4.2 Résultats pour les différents bouquets de travaux et pour les différentes typologies



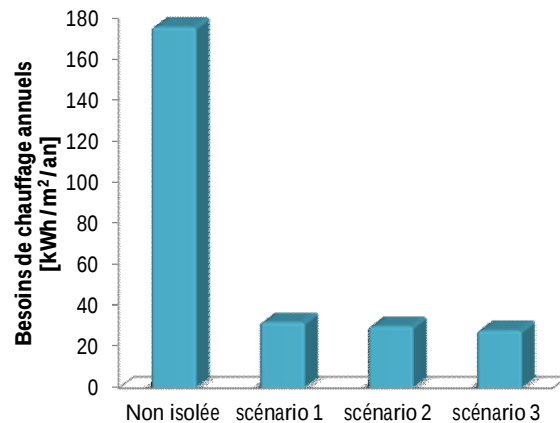
Maison de courée



Maison ouvrière



Maison de ville



Maison bourgeoise

Figure V-10- Besoins énergétiques pour les différents scénarios d'isolation et pour les différentes typologies

La signature énergétique représente une relation linéaire entre les déperditions des bâtiments, caractérisées par la puissance ou la consommation énergétique et la température extérieure. Dans notre cas on considère les besoins quotidiens de chauffage en fonction de la température extérieure quotidienne moyenne.

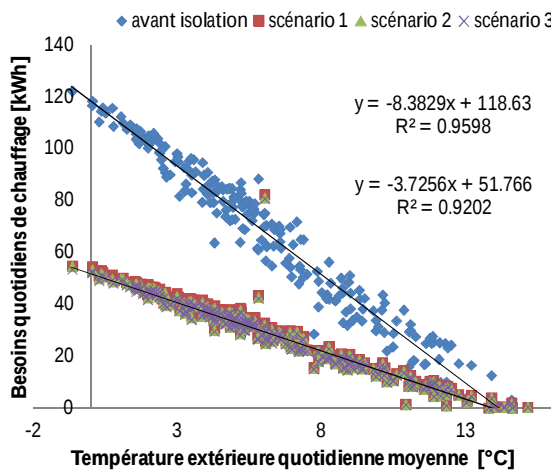
Pour les différentes typologies on remarque qu'une corrélation linéaire caractéristique du nuage de points obtenus peut être établie. La droite est caractérisée par la puissance P_0 à 0°C et la pente H appelée signature énergétique du bâtiment.

$$P = P_0 - H.\theta$$

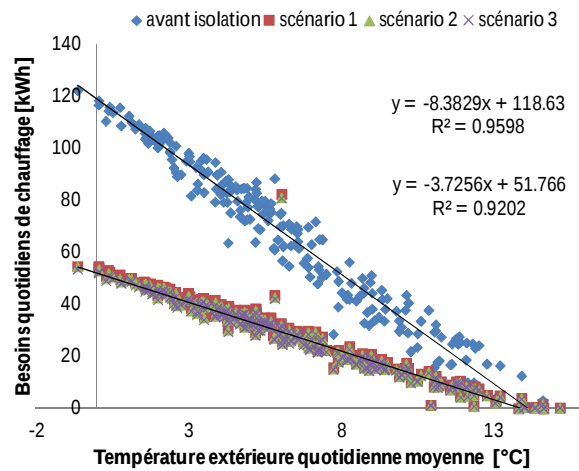
H représente les besoins thermiques bruts spécifiques du bâtiment en W/K ; il est appelé aussi le coefficient de déperditions thermiques du bâtiment.

Pour chaque typologie on peut noter deux familles de points :

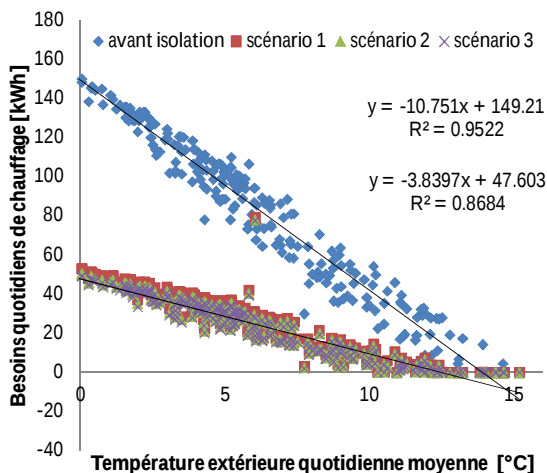
- Une famille de points avant isolation : ce nuage de points en couleur bleue représente la signature énergétique du bâtiment avant toute intervention.
- Une deuxième famille de points après isolation : cette famille englobe les trois scénarios d'isolation déjà définis. On remarque que les trois nuages de points (couleurs rouge, verte et violette) sont très proches et indiscernables. Ceci montre que le scénario 1 est suffisant pour l'amélioration des performances énergétiques de ces différentes typologies et que, les scénarios 2 et 3 ne présentent pas un grand intérêt vu les faibles améliorations énergétiques qui les accompagnent.



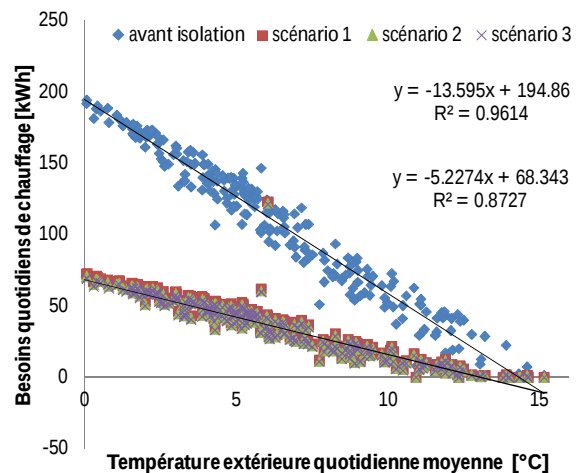
Maison de courée



Maison ouvrière



Maison de ville



Maison bourgeoise

Figure V-11- Signatures énergétiques des différentes typologies

V.4.3 Résultats pour les différents matériaux isolants (cas de la maison ouvrière)

On considère le cas de la maison ouvrière pour la comparaison des différents matériaux isolants.

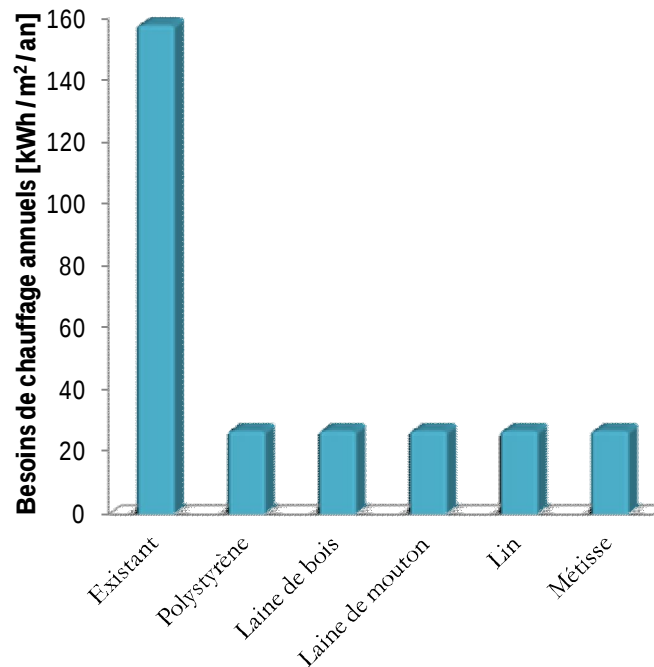


Figure V-12- Comparaison des besoins annuels de chauffage pour une maison ouvrière selon différents types d'isolants employés pour le scénario d'isolation 2

On remarque que le choix d'un matériau isolant spécifique n'a sensiblement pas d'influence sur la consommation énergétique du bâtiment. Donc les critères thermiques ne sont pas primordiaux dans le choix d'un matériau isolant. D'autres critères peuvent être privilégiés comme par exemple le prix, la durée de vie, l'énergie grise, la sensibilité à l'eau...

L'intérêt que présente le polystyrène comparé aux autres matériaux isolants écologiques réside dans le fait qu'il permet de limiter la perte surfacique due à l'épaisseur des isolants.

En vue de comparer le confort thermique d'été des différents matériaux on considère le polystyrène et la laine de mouton et on compare la température de la zone la plus occupée (salon + salle à manger) dans chaque cas. Les résultats montrent que la nature de l'isolant n'a pas d'influence remarquable sur le confort thermique d'été (Figure V-13). En effet, dans le cas de l'isolation thermique intérieure, le mur en maçonnerie est responsable de l'inertie thermique globale de la paroi, l'effet des matériaux isolants en termes d'inertie reste très marginal.

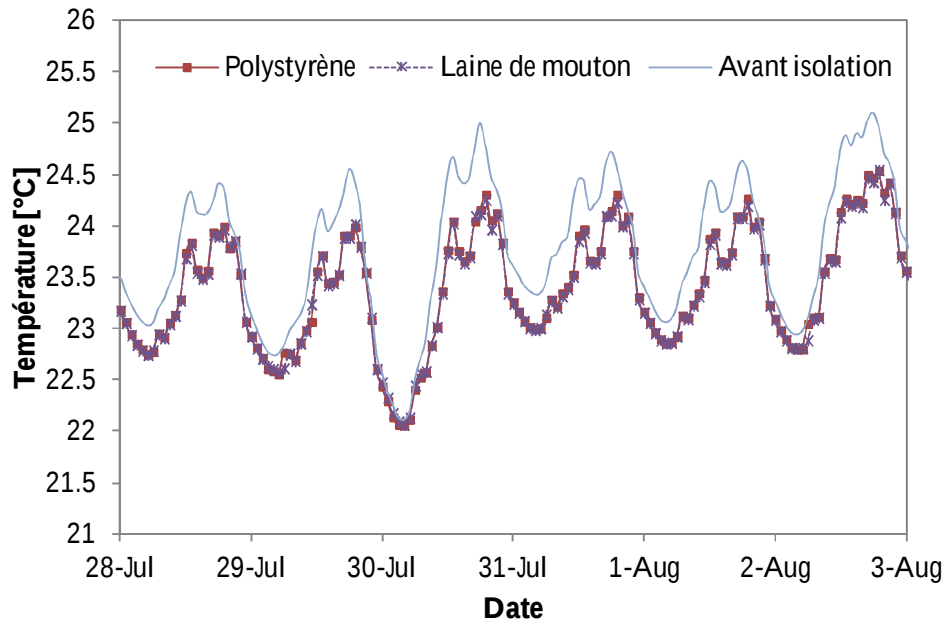


Figure V-13- Influence du type d'isolant sur le confort thermique dans la zone la plus occupée pendant la semaine la plus chaude pour le scénario 2

V.4.4 Comparaison entre isolation intérieure et isolation l'extérieure

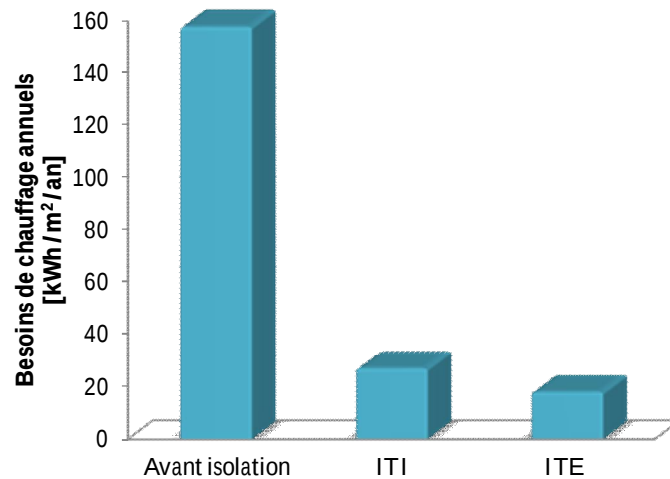


Figure V-14- Comparaison des besoins de chauffage entre l'isolation thermique intérieure et l'isolation thermique extérieure pour une maison ouvrière pour le scénario 2

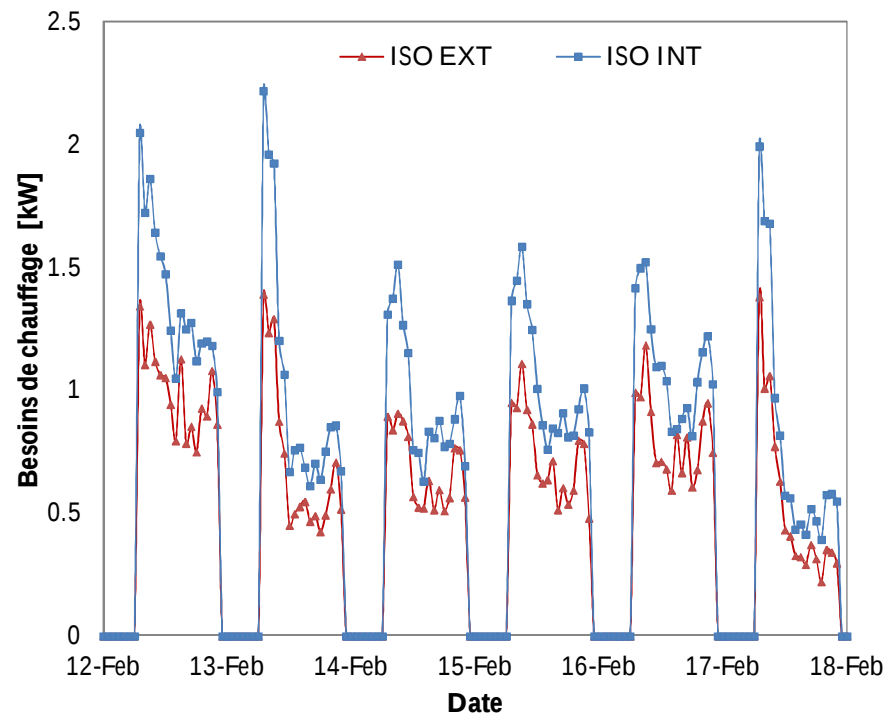


Figure V-15- Evolution des besoins de chauffage pendant la semaine la plus froide pour la maison ouvrière (scénario 2)

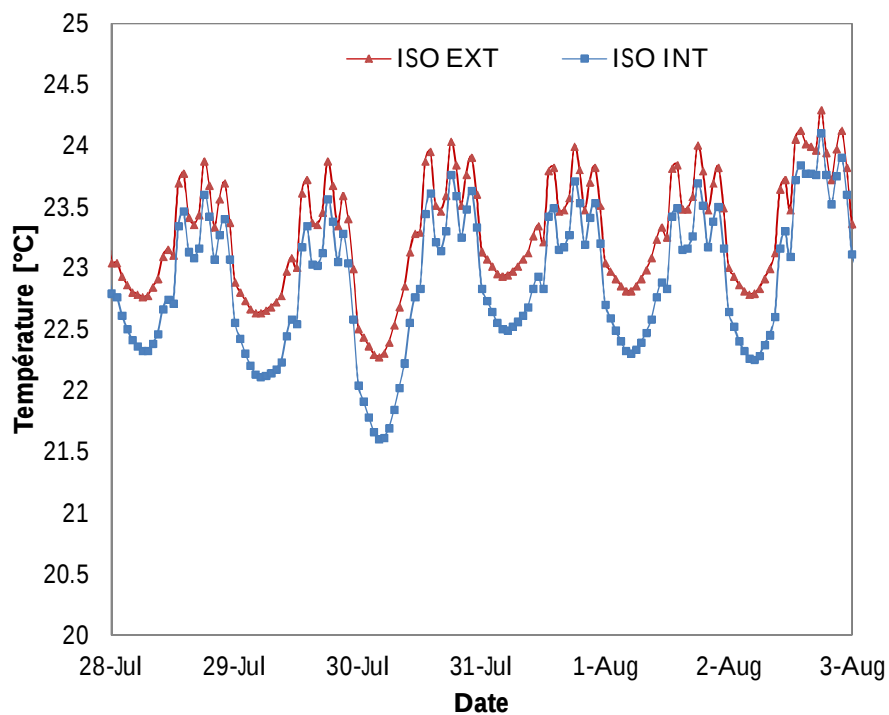


Figure V-16- Influence de l'emplacement de l'isolant sur le confort thermique dans la zone la plus occupée pendant la semaine la plus chaude

Bien que l'isolation par l'extérieur ne soit pas légalement possible puisqu'il est interdit de modifier les façades extérieures des maisons anciennes lilloises, l'isolation par l'extérieur semble tout de même plus efficace puisqu'elle permet de réduire considérablement les besoins de chauffage en augmentant l'inertie du bâtiment et en réduisant aussi les ponts thermiques engendrés par l'isolation (Figure V-14 et Figure V-15). Le problème d'inconfort thermique ne se pose pas pour le climat lillois (Figure V-16).

V.4.5 Confort thermique d'été pendant la période de canicule

La canicule européenne de 2003 est un événement climatique d'ampleur exceptionnelle survenu de juin à août 2003 et qui fut marqué par de nombreux records de température au cours de la première quinzaine du mois d'août. Dans certains pays comme la France les conséquences sur les écosystèmes, la population, et les infrastructures sont importantes et provoquent une crise politique.

Il est intéressant de modéliser le confort thermique dans les maisons anciennes lilloises dans ces périodes là afin de comparer l'inertie du bâtiment à l'état existant, pour une isolation intérieure et une isolation extérieure.

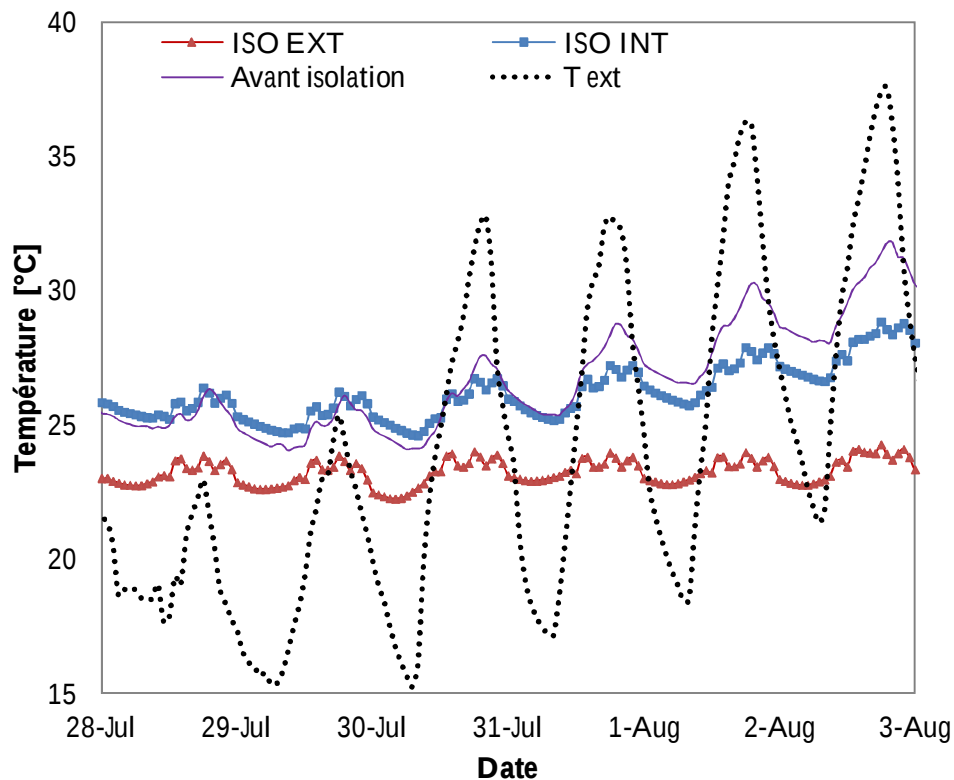


Figure V-17- Influence de l'emplacement de l'isolant sur le confort thermique dans la zone la plus occupée pendant la semaine la plus chaude en période de canicule (été 2003)

Les résultats (Figure V-17) favorisent encore une fois l'isolation par l'extérieur au dépend de l'isolation par l'intérieur. Dans le cas de l'isolation par l'extérieur, la température dans la zone la plus occupée varie peu et est maintenue à des valeurs inférieures à 25°C même quand la température extérieure dépasse les 35°C.

V.5 Synthèse et conclusion

D'après les résultats obtenus, on remarque que les matériaux isolants ont des performances thermiques très voisines ; en revanche, le polystyrène présente une plus faible perte de surface habitable par rapport au reste des isolants écologiques testés.

Les scénarios d'isolation ont des différences et des exigences du point de vue de la thermique néanmoins les scénarios 2 et 3 ne présentent pas de grandes améliorations thermiques par rapport au scénario 1. Ceci justifie les résultats du chapitre IV à l'échelle du mur (Figure IV-29) qui montrent aussi que les premiers centimètres d'isolant sont les plus déterminants dans la réduction des besoins énergétiques et que, à partir d'une certaine épaisseur (~15 cm), l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant peut avoir des effets négligeables sur les performances des parois.

En outre, pour le climat de Lille, quels que soient les matériaux isolants utilisés et quel que soit le scénario d'isolation mis en place, le confort d'été est inexistant. En effet, la température extérieure n'est pas assez élevée pour qu'il fasse plus de 27°C dans la maison notamment pour les maisons de ville, bourgeoise et ouvrière. La maison de Courée avec trois mitoyennetés possède de courtes périodes d'inconfort.

D'un point de vue thermique, il n'y a aucune différence entre les isolants puisque les parois isolées doivent avoir la même résistance thermique selon les isolants ainsi il suffit de changer l'épaisseur de ces isolants pour pouvoir respecter les scénarios. La capacité thermique des matériaux isolants n'a pas une grande influence sur la performance thermique des parois, l'inertie du bâtiment dépend de l'emplacement de l'isolant plutôt que de sa nature.

La démarche d'amélioration énergétique d'un bâtiment doit prendre en compte tout les facteurs et non pas en favoriser un pour délaisser un autre. Par exemple, il serait plus intéressant d'isoler convenablement les parois et traiter les ponts thermiques que d'appliquer des surépaisseurs d'isolant [39].

Conclusion générale et perspectives

Le travail de recherche que nous avons conduit, nous a permis de mieux comprendre le comportement thermique des bâtiments résidentiels anciens du Nord de la France.

Dans le premier chapitre, on a analysé le contexte et les enjeux de la problématique énergétique des bâtiments anciens. Après une présentation du secteur logement, son contexte énergétique, et son cadre réglementaire, on s'est attardé sur le bâti ancien défini comme étant celui construit avant 1948. On a présenté ses spécificités et les risques et problèmes auxquels il est assujéti. On définit aussi dans ce chapitre l'isolation thermique et les différents isolants usuels pour ensuite présenter les différents critères de choix d'un isolant. Enfin, on synthétise les principaux travaux sur la réhabilitation thermique des maisons anciennes.

Dans le deuxième chapitre on a classé les maisons anciennes de la ville de Lille en diverses familles typologiques permettant ainsi d'identifier leurs ressemblances (qui sont d'ailleurs visuellement identifiables) et leurs variantes. Après une présentation brève du contexte historique, une analyse du parc de logements existants à Lille est élaborée. Ensuite, on fait une analyse des différentes études typologiques faites dans la région Nord-Pas-de-Calais pour ressortir la typologie adoptée dont les performances énergétiques seront étudiées dans le dernier chapitre. Cette étude typologique nous permet de tirer quelques constantes, entre autres les murs extérieurs en briques d'épaisseur 34 cm identiques pour les différentes typologies.

Dans le troisième chapitre nous avons étudié en détails le transfert thermique dans un mur en brique caractéristique des typologies étudiées. Une étude expérimentale a été comparée à diverses approches théoriques en divers régimes (régime permanent, régime harmonique et régime quelconque). On présente tout d'abord les différentes méthodes théoriques pour la modélisation du transfert de chaleur en régime permanent et harmonique. Puis, on détermine les propriétés thermiques des matériaux constituant le mur (brique et mortier). Ensuite, et grâce au dispositif expérimental, on détermine les propriétés thermiques équivalentes du mur. Ces propriétés sont comparées aux propriétés équivalentes déterminées à partir des propriétés de la brique et du mortier. Les résultats théoriques selon différentes méthodes (méthode nodale, méthode quadripôle et méthode des éléments finis) en régimes harmoniques sont comparés aux résultats expérimentaux et montrent une très bonne cohérence. Finalement, une méthode théorique issue de la norme ISO 13786 et de la fonction de transfert utilisée en automatique est développée pour la détermination des déperditions énergétiques du mur en régime quelconque ; cette méthode est validée en la comparant aux résultats expérimentaux.

Dans le quatrième chapitre on a caractérisé expérimentalement cinq matériaux isolants pour étudier ensuite leur apport énergétique pour le mur étudié. On a appliqué 3 cm de polystyrène au mur expérimental afin de valider la méthode théorique. Une fois cette dernière validée, une comparaison de différents matériaux isolants et différentes configurations a été établie. Le mur isolé a été étudié dans des conditions climatiques

réelles obtenues par la méthode de la température sol-air qui consiste à ajouter à la température ambiante une température fictive équivalente à celle des gains solaires. Les résultats montrent bien l'importance de l'isolation par l'extérieur en termes d'inertie thermiques ; de plus, ils montrent que les différents matériaux isolants ont quasiment les mêmes performances thermiques à l'échelle du mur.

Dans le chapitre 5, des simulations thermiques dynamiques à l'échelle du bâtiment ont été réalisées pour les différentes typologies dans le but de valider et confirmer les résultats obtenus à l'échelle du mur, de comparer les performances énergétiques des différentes typologies et de quantifier les économies d'énergie possibles pour différents bouquets de travaux d'isolation.

L'objectif de cette conclusion est de synthétiser et réorganiser les éléments développés pour répondre plus directement aux questions soulevées dans l'introduction générale et que nous rappelons ici :

Quels sont les qualités et les défauts du bâti résidentiel ancien du Nord de la France d'un point de vue énergétique ?

L'isolation par l'intérieur est-elle une solution adaptée pour ce type de bâtiment ?

Quelle épaisseur d'isolant est optimale ?

Quels matériaux isolants choisir pour avoir une bonne performance thermique de l'enveloppe ?

Les maisons anciennes lilloises se caractérisent donc par une bonne inertie thermique qu'il faudra conserver, l'isolation par l'intérieur augmente la résistance globale du mur mais réduit sa capacité à emmagasiner et restituer la chaleur, de plus elle crée des ponts thermiques qui altèrent la réduction des besoins énergétiques. Il est donc convenable de remettre en cause l'isolation par l'intérieur et favoriser l'utilisation par l'extérieur et surtout si les murs ne sont pas visibles du côté de la rue. Quant à l'épaisseur d'isolation optimale, elle varie entre 10 et 20 cm dans le cas de l'isolation par l'intérieur et entre 20 et 30 cm pour une isolation par l'extérieur (Figure IV-26 et Figure IV-28). Au-delà de ces épaisseurs, la réduction des besoins de chauffage est très minime ; il est donc plus intéressant de penser à réduire davantage les consommations énergétiques en agissant sur des paramètres autres que les parois opaques verticales comme les infiltrations d'air, les vitrages et la toiture.

Cette étude nous permet aussi de confirmer que les matériaux isolants usuels ont des performances thermiques très comparables ; les matériaux synthétiques, représentés ici par le polystyrène, ont des performances thermiques légèrement supérieures que celles de matériaux reconnus sur le marché comme écologiques (laine de bois, laine de mouton, lin, métisse). Il est donc nécessaire de comparer les autres critères non thermiques (écologiques, sanitaires, économiques, techniques) afin de favoriser un ou des matériaux au dépend des autres.

La méthode utilisée pour le mur initial (chapitre III) et pour le mur isolé (chapitre IV) offre une nouvelle vision de la caractérisation des parois opaques et permet de mieux étudier le comportement dynamique des parois grâce à une analyse fréquentielle. Les

méthodes utilisées en régime quelconque sont validées par comparaison avec les résultats expérimentaux ; de plus, les conclusions tirées dans le chapitre IV à l'échelle du mur sont consolidées dans le chapitre V à l'échelle du bâtiment.

Perspectives :

Cette thèse ouvre de nouvelles perspectives de recherche en vue de continuer et compléter ce travail. Nous venons de voir que les matériaux isolants testés ont des performances thermiques voisines d'où l'intérêt de penser à l'utilisation de matériaux innovants ou bien des matériaux super isolants comme les aérogels et les matériaux super isolants sous vide.

Aussi, cette étude met en avance l'influence de la capacité thermique des murs sur les déperditions de ces derniers et favorise l'isolation par l'extérieur au dépend de l'isolation par l'intérieur. Or, dans le cas des bâtiments résidentiels anciens, l'isolation par l'extérieur est souvent déconseillée voir interdite ; on peut alors penser ou à l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) qui permettent de stocker la chaleur et ainsi de combler la faible capacité thermique des matériaux isolants.

D'autre part, dans le troisième chapitre nous avons caractérisé le mur grâce à deux types de sollicitations (régime permanent et régime sinusoïdal) et ainsi nous avons été capables de déterminer sa résistance thermique et sa capacité thermique. On peut alors penser à utiliser un caisson portable, voir deux de part et d'autre de la paroi, capable(s) d'utiliser la même méthode pour déterminer les propriétés thermiques équivalentes (R et C) de n'importe quelle paroi opaque.

Un outil d'aide à la conception peut aussi être développé afin de comparer et de quantifier diverses solutions d'isolation des parois opaques en utilisant des données climatiques réelles pour diverses régions comme données d'entrée.

L'hygrométrie dans les murs anciens est un critère qui ne doit pas être négligé et notamment pour les études in-situ ; le couplage de transfert de chaleur et de masse en régime dynamique est une approche à envisager afin de modéliser plus précisément le comportement thermique des murs anciens d'une part, et de vérifier les risques de condensation d'autre part.

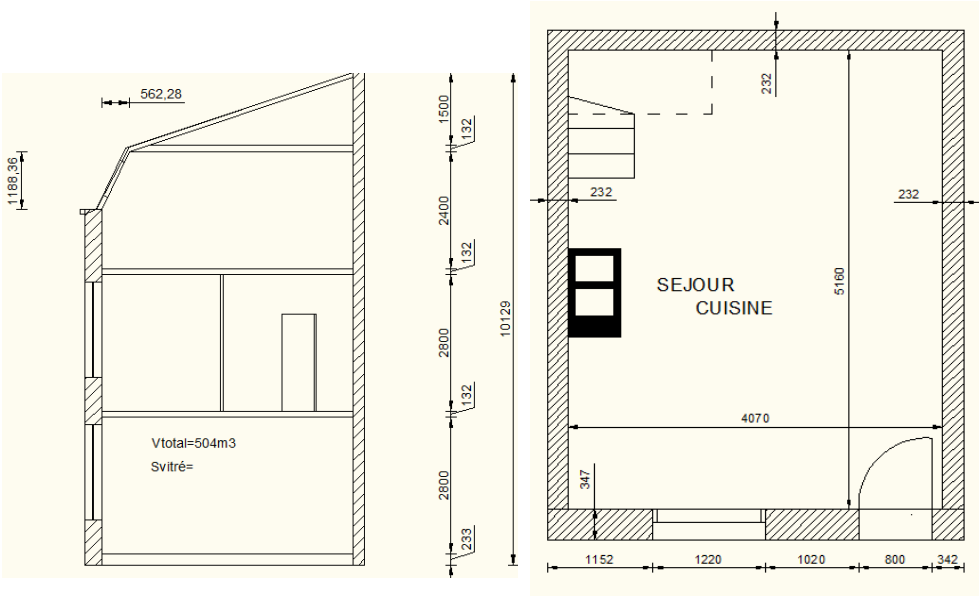
De plus, certaines parties pourraient être complétées et approfondies : en effet, nous avons vu dans le chapitre IV que, d'un point de vue thermique, les matériaux isolants ont des performances très comparables. Ceci rend les critères techniques (mise en œuvre), économiques (prix) et environnementaux (Analyse de Cycle de Vie) intéressants à étudier en vue d'un choix optimal d'isolant.

Finalement, notre travail a porté sur un mur expérimental ; cependant, il est intéressant de valider et compléter cette étude sur une paroi in-situ avec des conditions climatiques réelles. On pourra alors utiliser la méthode de la température sol-air définie dans la partie IV.4.1.a. La chambre sera chauffée alors à une température de consigne constante et sera sollicitée par le climat extérieur, qui, dans notre cas, était représenté par le caisson.

Annexes

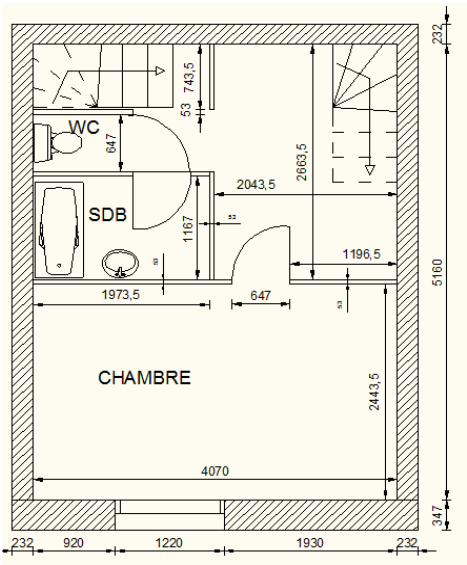
Annexe 1 - Plans des typologies [33]

1.) La maison de courée

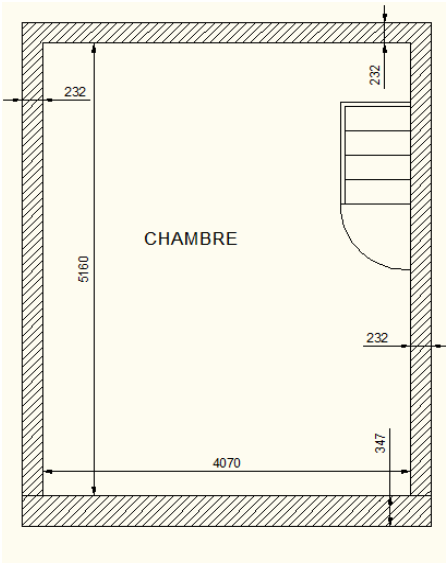


Coupe verticale

Plan RDC



Plan R+1



Plan R+2

Maison de Courée			
Surfaces habitables RDC			
Désignation	Surfaces		
sejour cuisine	21.00	m ²	
Total RDC	21.00	m ²	
SHON Rdc	26.02	m ²	
Surfaces habitables R+1			
Désignation	Surfaces		
Chambre	9.95	m ²	
WC	0.76	m ²	
SdB	2.30	m ²	
Hall	5.73	m ²	
Total R+1	18.74	m ²	
SHON R+1	24.78	m ²	
Surfaces habitables R+2			
Désignation	Surfaces		
Chambre	18.77	m ²	
Total R+2	18.77	m ²	
SHON R+2	22.30	m ²	
Surface Totale (m ²)		243.20	
Surface vitrée (m ²)		5.24	
% Surface vitrée		2.16	
Surface SHON (m ²)		73.10	
Accès à la lumière		7.17	
Surface déperdition		101.90	
Volume Total Habitable (m3)		155.96	
Compacité		0.65	

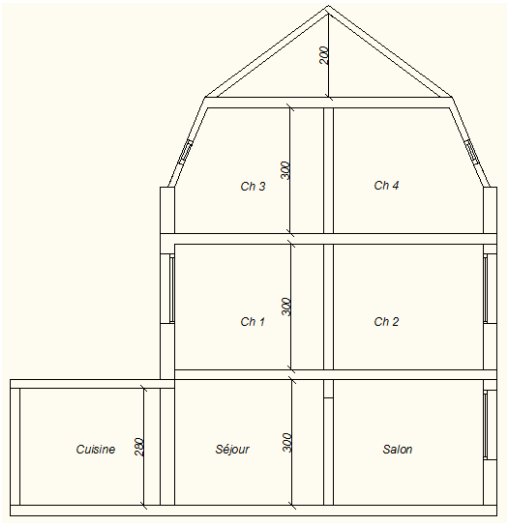
SHON		
SHON RDC	26.02	m ²
SHON R+1	24.78	m ²
SHON R+2	22.30	m ²
SHON total	73.10	m ²

Volumes habitables RDC		
Désignation	Volumes	
cuisine	58.80	m ³
Total RDC	58.80	m ³

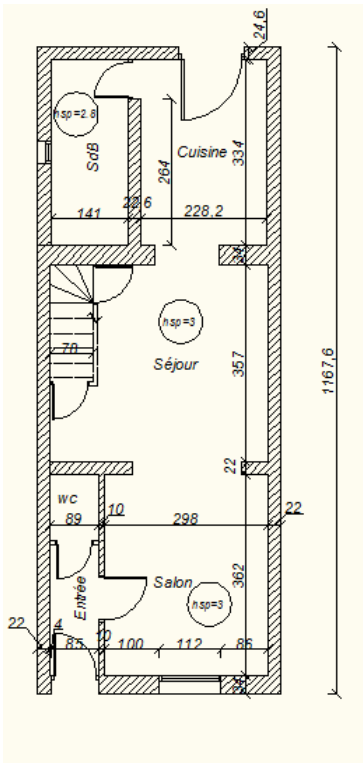
Volumes habitables R+1		
Désignation	Volumes	
Chambre	27.85	m ³
WC	2.12	m ³
SdB	6.45	m ³
Hall	16.05	m ³
Total R+1	52.47	m ³

Volumes habitables R+2		
Désignation	Volumes	
Chambre	44.69	m ³
Total R+2	44.69	m ³

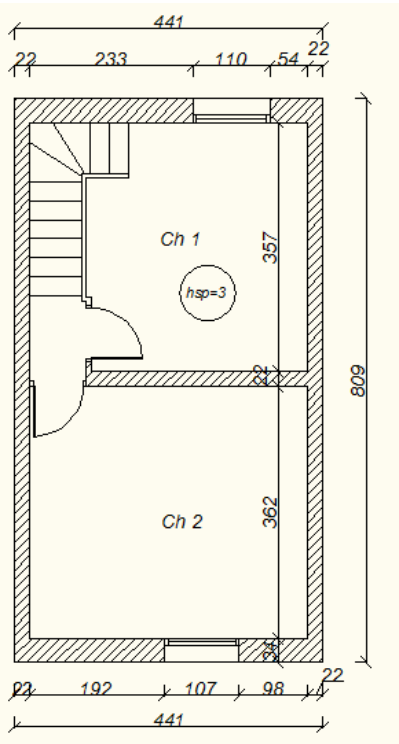
2.) La maison ouvrière



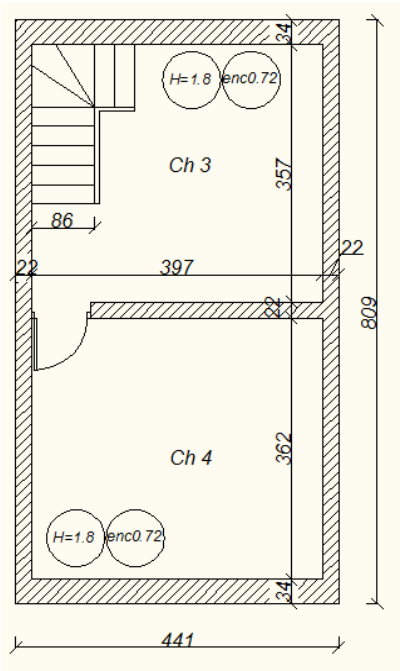
Coupe verticale



Plan RDC



Plan R+1



Plan R+2

Maison Ouvrière			
Surfaces habitables RDC			
Désignation	Surfaces		
cuisine	7.62	m²	
entrée	2.07	m²	
salle à manger	12.03	m²	
salon	10.79	m²	
WC	1.07	m²	
SdB	4.71	m²	
Total RDC	38.29	m²	
SHON Rdc	51.49	m²	
Surfaces habitables R+1			
Désignation	Surfaces		
Chambre 1	10.56	m²	
Palier	2.34	m²	
Chambre 2	14.37	m²	
Total R+1	27.27	m²	
SHON R+1	33.27	m²	
Surfaces habitables R+2			
Désignation	Surfaces		
Chambre 3	7.71	m²	
Palier	2.34	m²	
Chambre 4	11.51	m²	
Total R+2	21.56	m²	
SHON R+2	28.56	m²	
Surface Totale (m²)	243.2		
Surface vitrée (m²)	8.5		
% Surface vitrée	3.4950658		
Surface SHON (m²)	113.32		
Accès à la lumière	7.5008825		
Surface déperdition maison de base	127.449		
compacité maison de base	0.4284864		
Volume Total Habitable (m3)	297.44		
Surface déperdition maison 1	144.4275		
Compacité maison 1	0.4855685		

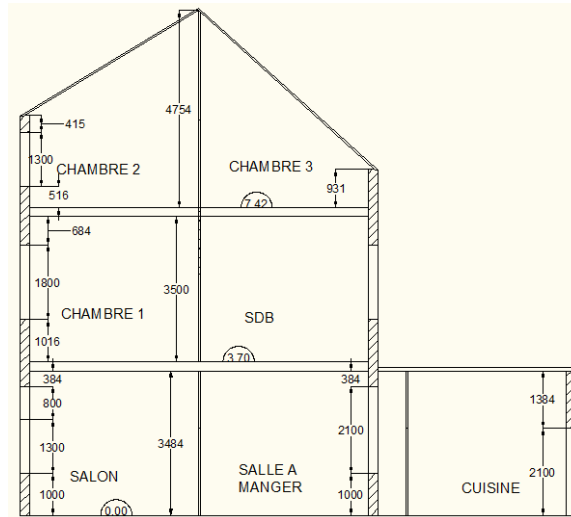
SHON		
SHON RDC	51.49	m²
SHON R+1	33.27	m²
SHON R+2	28.56	m²
SHON total	113.32	m²

Volumes habitables RDC		
Désignation	Volumes	
cuisine	21.34	m³
entrée	6.23	m³
salle à manger	36.09	m³
salon	32.37	m³
WC	3.21	m³
SdB	13.19	m³
Total RDC	112.43	m³

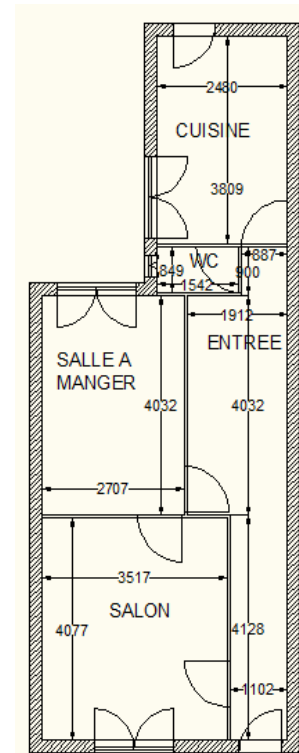
Volumes habitables R+1		
Désignation	Volumes	
Chambre 1	31.69	m³
Palier	7.02	m³
Chambre 2	43.11	m³
Total R+1	81.82	m³

Volumes habitables R+2		
Désignation	Volumes	
Chambre 3	26.27	m³
Palier	7.02	m³
Chambre 4	38.4	m³
Total R+2	71.69	m³

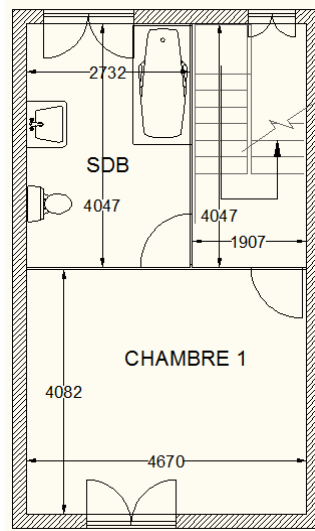
3.) La maison de ville



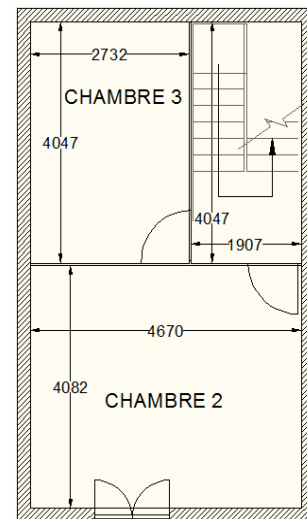
Coupe verticale



Plan RDC



Plan R+1



Plan R+2

Maison de ville			
Surfaces habitables RDC			
Désignation	Surfaces		
cuisine	9.446	m ²	
entrée	13.05	m ²	
salle à manger	10.91	m ²	
salon	14.34	m ²	
WC	1.31	m ²	
Total RDC	49.056	m ²	
SHON Rdc	58.22	m ²	
Surfaces habitables R+1			
Désignation	Surfaces		
chambre 1	19.06	m ²	
SdB	11.06	m ²	
Total R+1	30.12	m ²	
SHON R+1	41.24	m ²	
Surfaces habitables R+2			
Désignation	Surfaces		
chambre 2	19.06	m ²	
chambre 3	8.74	m ²	
Total R+2	27.8	m ²	
SHON R+2	36.65	m ²	
Surface Totale (m ²)	20.31		
Surface vitrée (m ²)	306.548868		
% Surface vitrée	6.625371065		
Accès à la lumière	0.149217545		
Volume Total Habitable (m3)	371.67		
surface déperditive	172.15767		
compacité	0.463200339		

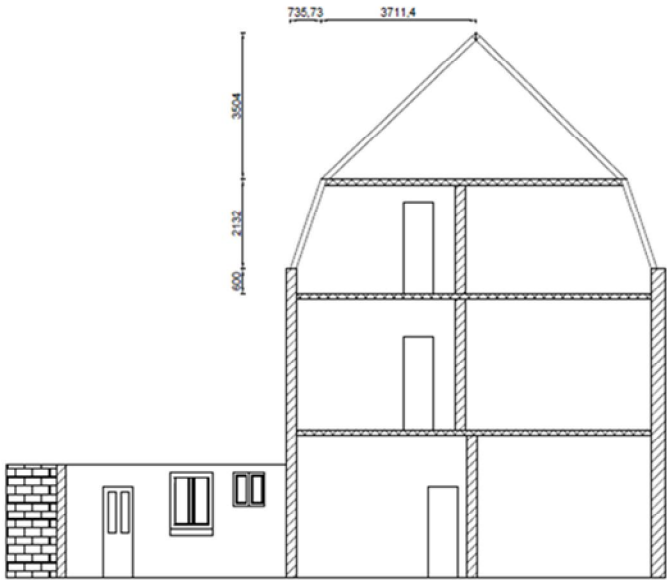
SHON		
SHON RDC	58.22	m ²
SHON R+1	41.24	m ²
SHON R+2	36.65	m ²
SHON total	136.11	m ²

Volumes habitables RDC		
Désignation	Volumes	
cuisine	32.9	m ³
entrée	45.47	m ³
salle à manger	38.01	m ³
salon	49.96	m ³
WC	4.56	m ³
Total RDC	170.9	m ³

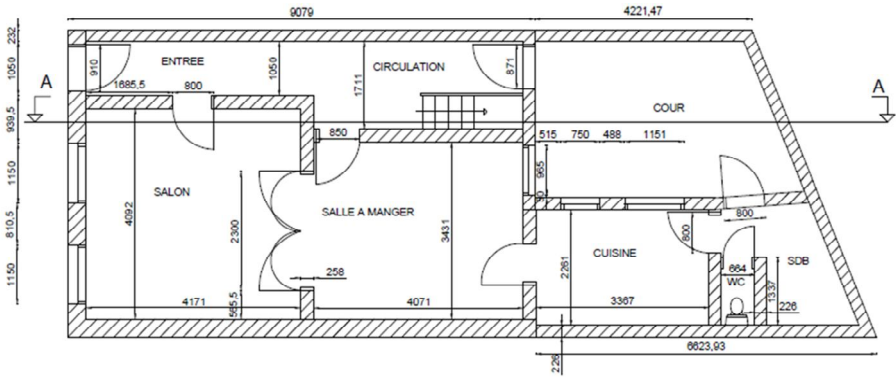
Volumes habitables R+1		
Désignation	Volumes	
chambre 1	66.71	m ³
SdB	38.71	m ³
Total R+1	105.42	m ³

Volumes habitables R+2		
Désignation	Volumes	
chambre 2	66.98	m ³
chambre 3	28.37	m ³
Total R+2	95.35	m ³

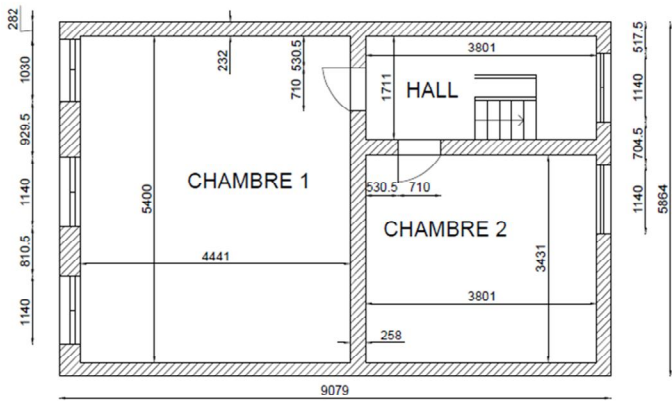
4.) La maison bourgeoise



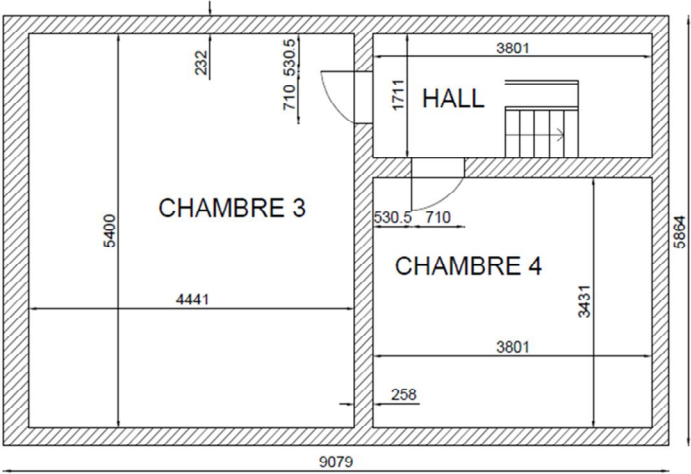
Coupe verticale



Plan RDC



Plan R+1



Plan R+2

Maison bourgeoise		
Surfaces habitables RDC		
Désignation	Surfaces	
cuisine	7.61	m ²
entrée/circulatio	12.53	m ²
salle à manger	13.93	m ²
salon	17.07	m ²
WC	0.89	m ²
SdB	3.63	m ²
Total RDC	55.66	m ²
SHON RdC	60.46	m ²
Surfaces habitables R+1		
Désignation	Surfaces	
Chambre 1	23.98	m ²
hall	6.5	m ²
Chambre 2	13.04	m ²
Total R+1	43.52	m ²
SHON R+1	46.62	m ²
Surfaces habitables R+2		
Désignation	Surfaces	
Chambre 3	23.98	m ²
hall	6.5	m ²
Chambre 4	13.04	m ²
Total R+2	43.52	m ²
SHON R+2	28.56	m ²
Surface Totale (m ²)	142.7	
Surface vitrée (m ²)	27.4	
% Surface vitrée	19.201121	
Surface SHON (m ²)	135.64	
Accès à la lumière	20.200531	
Surface déperdition maison de base	185	
compacité maison de base	0.4223397	
Volume Total Habitable (m3)	438.036	

SHON		
SHON RDC	60.46	m ²
SHON R+1	46.62	m ²
SHON R+2	28.56	m ²
SHON total	135.64	m ²

Volumes habitables RDC		
Désignation	Volumes	
cuisine	25.874	m ³
entrée	42.602	m ³
salle à manger	47.362	m ³
salon	58.038	m ³
WC	3.026	m ³
SdB	12.342	m ³
Total RDC	189.244	m ³

Volumes habitables R+1		
Désignation	Volumes	
Chambre 1	74.338	m ³
Palier	20.15	m ³
Chambre 2	40.424	m ³
Total R+1	134.912	m ³

Volumes habitables R+2		
Désignation	Volumes	
Chambre 3	62.348	m ³
Palier	16.9	m ³
Chambre 4	33.904	m ³
Total R+2	113.152	m ³

Annexe 2 - Méthode des sources virtuelles :

Diffusion dans un milieu d'épaisseur finie limité par deux plans parallèles

Température nulle en +L

Condition initiale : $T_{x,t} = 0$ pour $-L < x < L$ et $t < 0$

Conditions aux limites : $T_{-L,t} = f(t)$ et $T_{L,t} = 0$ pour $t > 0$

Ceci revient à annuler la température en +L

La solution applicable aux milieux semi-infinis sera exploitée pour en déduire la solution d'un mur fini soumis aux mêmes conditions.

Pour les temps courts, aussi longtemps que la température restera négligeable au voisinage de la face opposée, la solution $T(x,t)$ conviendra également pour le mur d'épaisseur finie.

Supposons que la solution soit connue pour un milieu semi infini, de température initiale nulle soumis à une même évolution de la température superficielle: $T(x,t) = F(x,t)$

Lorsque cette contribution deviendra significative en $x=L$ il sera indispensable de la compenser en introduisant un terme correctif. Ce serait la contribution d'un mur virtuel, de même épaisseur, accolé au précédent en $x = L$, soumis à la même sollicitation thermique $T(3L,t) = f(t)$ depuis $t=0$.

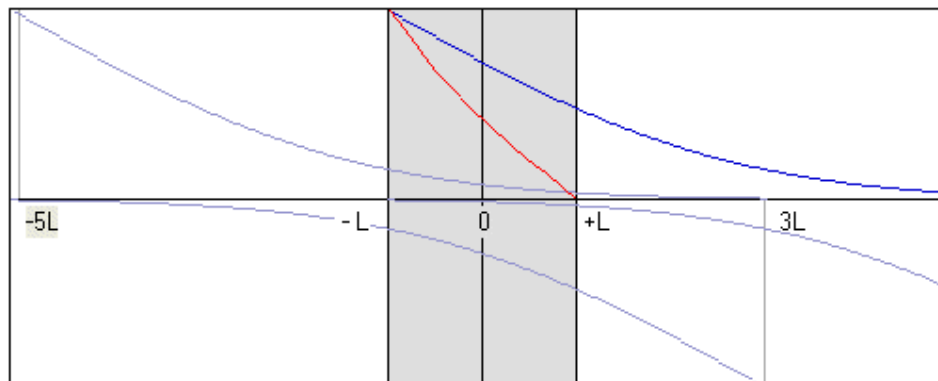
Ainsi, la température globale restera constamment nul en $x = L$. Cet ajout suffira tant que la contribution de cette première source virtuelle restera négligeable en $-L$.

Au delà de ce temps, une seconde source virtuelle, négative, en $-5L$, compensera cette influence.

Les sources virtuelles sont disposées de façon à neutraliser leurs effets en $-L$ et $+L$

En poursuivant ainsi, la répartition des températures en fonction du temps, courbe rouge, sera la somme de toutes ces sources de chaleur :

$$T(x,t) = F(L+x,t) - F(3L-x,t) + F(5L+x,t) - F(7L-x,t) + \dots$$



$f(t)$ peut être une fonction périodique du temps, par exemple : $T(-L, t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

Dans ce cas, la somme des contributions de la source réelle et de toutes les sources virtuelle conduit à :

$$T(x, t) = A \cdot \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n \cdot \exp\left(- (2n+1)L + (-1)^n \cdot x\right) \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot \sin\left(\omega t - \left(- (2n+1)L + (-1)^n \cdot x\right) + \varphi\right)$$

Température nulle en -L

Condition initiale : $T_{x,t} = 0$ pour $-L < x < L$ et $t < 0$

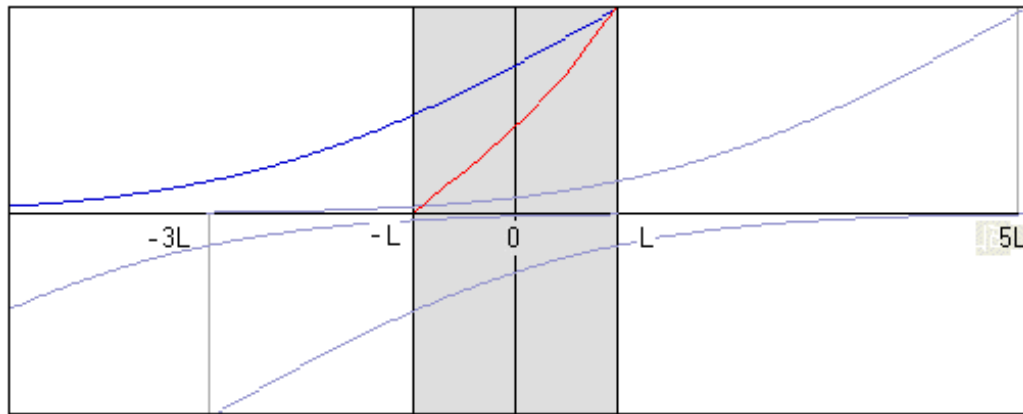
Conditions aux limites : $T_{-L,t} = 0$ et $T_{L,t} = f(t)$ pour $t > 0$

Si, inversement, la face -L était maintenue à 0°C et que la température de face +L oscille avec une amplitude, une pulsation et un déphasage différents :

$$T(+L, t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

L'expression prend alors la forme :

$$T(x, t) = A \cdot \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n \cdot \exp\left(- (2n+1)L - (-1)^n \cdot x\right) \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot \sin\left(\omega t - \left(- (2n+1)L - (-1)^n \cdot x\right) + \varphi\right)$$



Annexe 3- Racines d'un polynôme de degré 4 [66]

On part de l'équation : $x^4 + ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$

On fait le changement de variable suivant :

$$x = z - \frac{a}{4}$$

On obtient une équation réduite de la forme : $z^4 + pz^2 + qz + r = 0$

$$\text{Avec } p = b - \frac{3}{8}a^2 \quad ; \quad q = c - \frac{ab}{2} \quad ; \quad r = d - \frac{ac}{4} + \frac{ba^2}{16} - \frac{3a^4}{256}$$

On a deux cas pour l'équation en z :

- $q=0$: l'équation s'écrit : $z^4 + pz^2 + r = 0$. C'est une équation bicarrée simple à résoudre.
- $q \neq 0$: l'équation s'écrit : $z^4 + pz^2 + qz + r = 0$. On pose alors :

$$2P - Q^2 = p \quad ; \quad -2QR = q \quad ; \quad P^2 - R^2 = r$$

Ce qui revient à résoudre l'équation du troisième degré en P suivante:

$$P^3 - \frac{p}{2}P^2 - rP + \left(\frac{pr}{2} - \frac{q^2}{8} \right) = 0$$

Puis on remonte P, Q, R, puis à z et enfin à x.

Degré 3 :

Soit $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$ un polynôme de degré 3. On effectue le changement de variable $x = z - \frac{a}{3}$ et on obtient une équation du type : $z^3 + pz + q = 0$

$$\text{Avec } p = b - \frac{a^2}{3} \quad ; \quad q = \frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c$$

Ensuite, on applique la méthode de Cardan pour résoudre l'équation $z^3 + pz + q = 0$

On calcule le discriminant et on étudie son signe : $\Delta = q^2 + \frac{4p^3}{27}$

- a.) Si Δ est positif, l'équation possède alors une solution réelle et deux complexes.

$$\text{On pose } u = \sqrt[3]{\frac{-q + \sqrt{\Delta}}{2}} \quad ; \quad v = \sqrt[3]{\frac{-q - \sqrt{\Delta}}{2}}$$

La seule solution réelle est alors : $z_0 = u + v$.

b.) Si Δ est nul,

- Si $p = q = 0$, l'équation possède 0 comme solution triple.
- Dans le cas contraire, l'équation possède deux solutions réelles, une simple et une double :

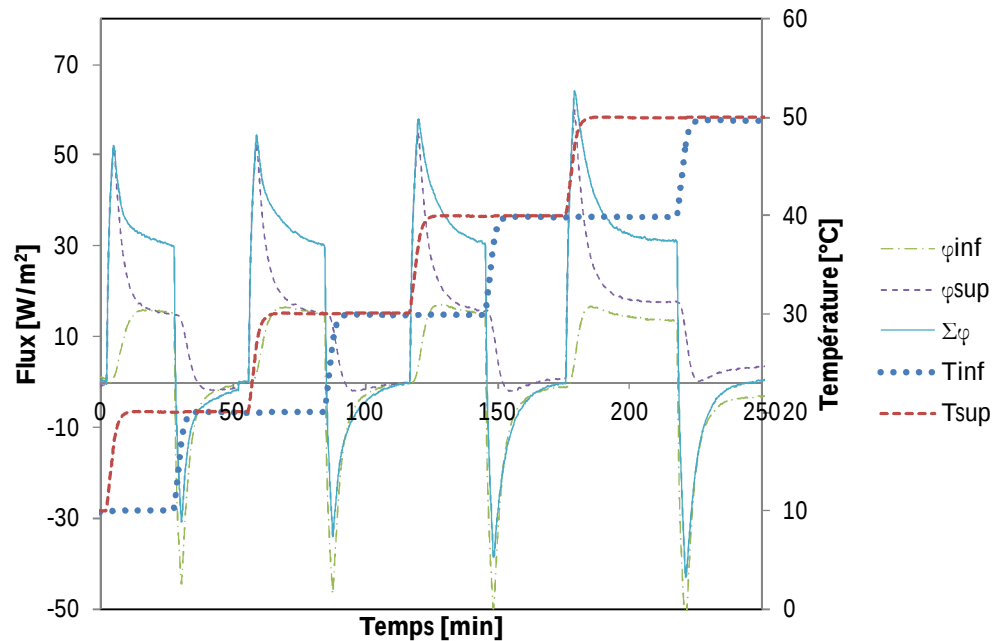
$$\begin{cases} z_0 = \frac{3q}{p} \\ z_1 = z_2 = \frac{-3q}{2p} \end{cases}$$

c.) Si Δ est négatif, l'équation possède alors trois solutions réelles. La forme réelle des solutions est obtenue en écrivant sous la forme trigonométrique, ce qui

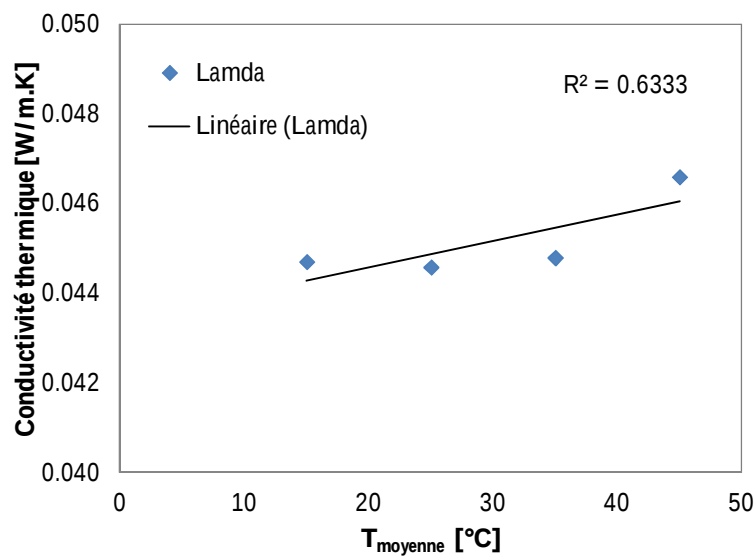
$$\text{donne } z_k = 2\sqrt{\frac{-p}{3}} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(\frac{-q}{2} \sqrt{\frac{-27}{p^3}} \right) + \frac{2k\pi}{3} \right] \quad k \in \{0; 1; 2\}$$

Annexe 4 - Caractérisation des différents matériaux isolants

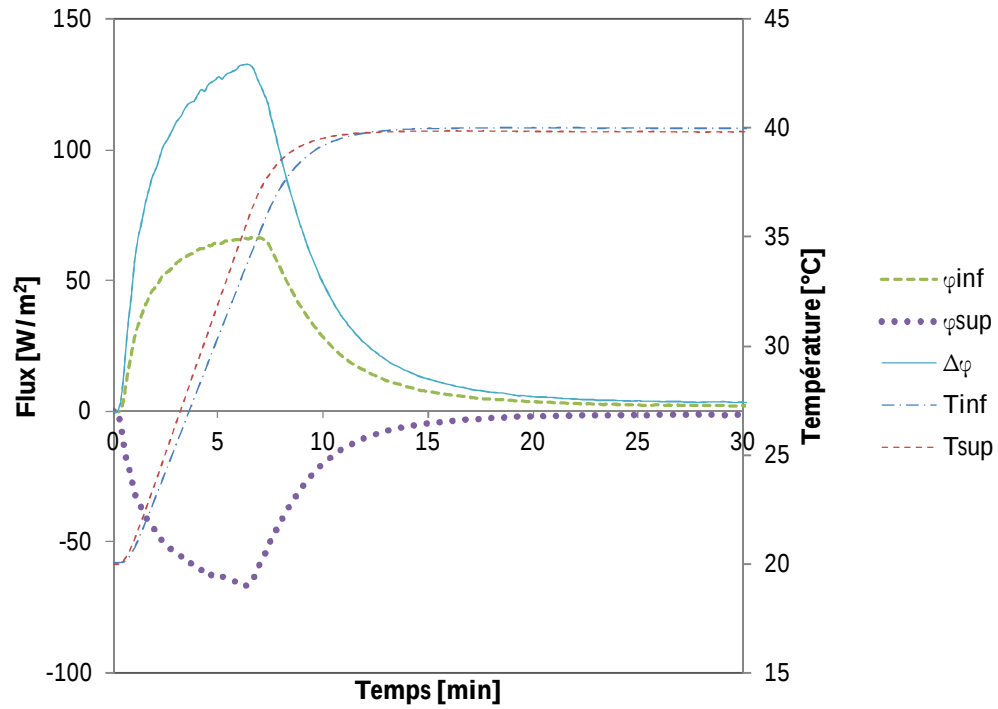
a.) Mesures réalisées pour l'échantillon de laine de bois



Variations de la température et du flux pendant la mesure de la conductivité de la laine de bois



Conductivité thermique de la laine de bois en fonction de la température moyenne imposée



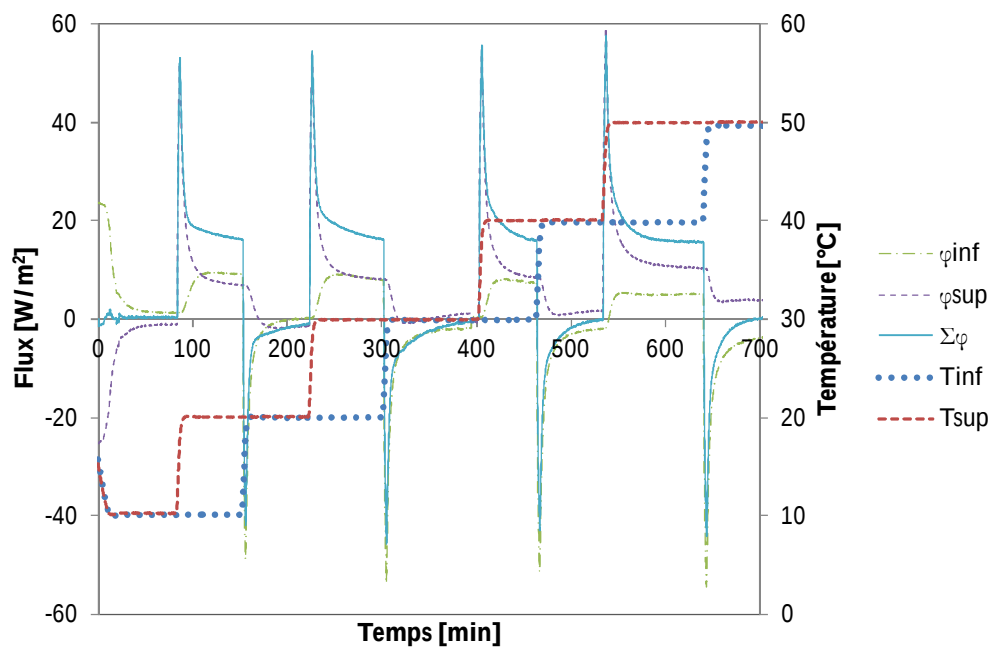
Variations de la température et du flux pendant la mesure de la chaleur massique de la laine de bois

La chaleur massique de la laine de bois est donnée par :

$$C = 2 \frac{\left(\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt \right)}{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}} - C_{fluxmètres} = \frac{2 \times 137040}{40} - 944 = 5908,0 \text{ J} / m^2 . K$$

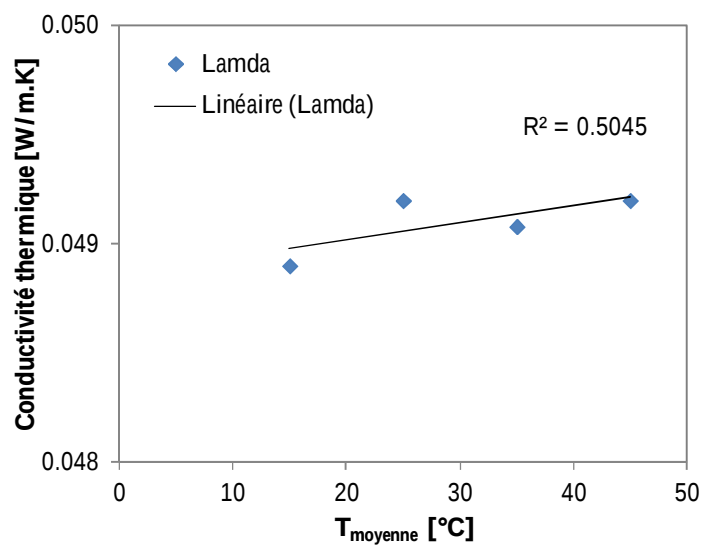
$$c_p = \frac{C}{\rho \cdot e} = \frac{5908,0}{55,6 \times 0,06} = 1771,0 \text{ J} / kg . K$$

b.) Mesures réalisées pour l'échantillon de laine de mouton



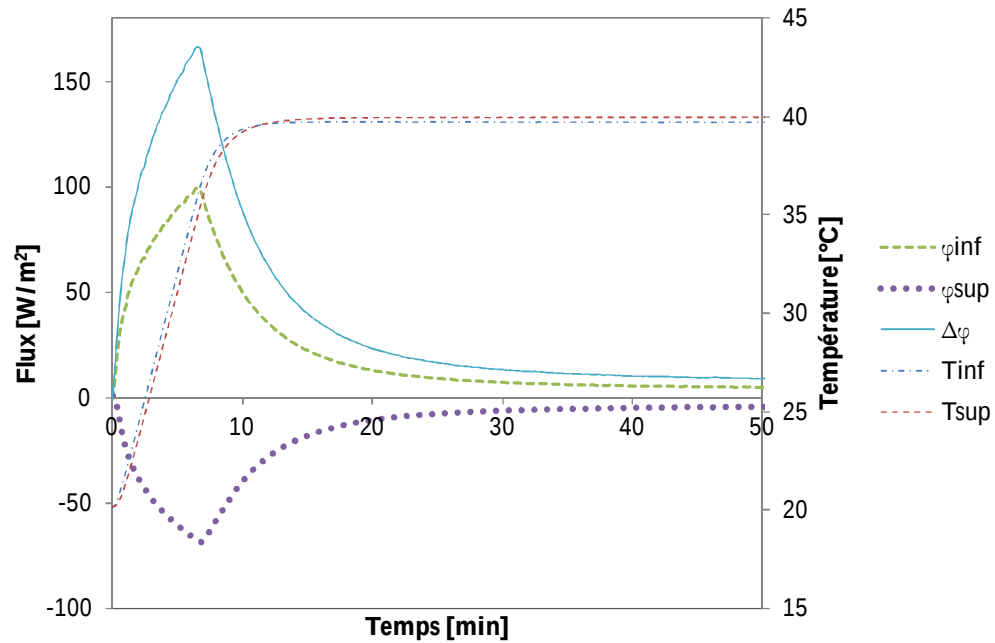
Variations de la température et du flux pendant la mesure de la conductivité de la laine de mouton

En calculant la conductivité correspondant aux températures 15°C, 25°C, 35°C et 45°C, on obtient le graphe suivant :



Conductivité thermique de la laine de mouton en fonction de la température moyenne imposée

On peut noter que la conductivité de la laine de mouton varie très peu dans l'intervalle de température considérée [15°C, 45°C] par rapport aux autres matériaux où elle peut augmenter de 0,005W/m²K (~12%) entre 15°C et 45°C.



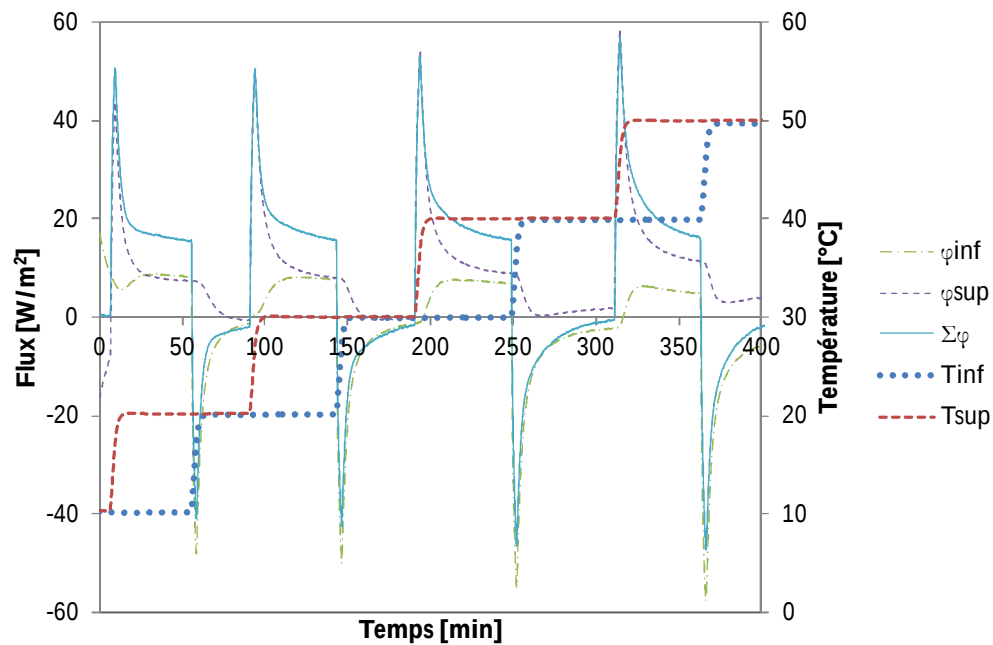
Variations de la température et du flux pendant la mesure de la chaleur massique de la laine de mouton

La chaleur massique de la laine de mouton est donnée par :

$$C = 2 \frac{\left(\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt \right)}{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}} - C_{fluxmètres} = \frac{2 \times 121142}{40} - 944 = 5113,1 \text{ J} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

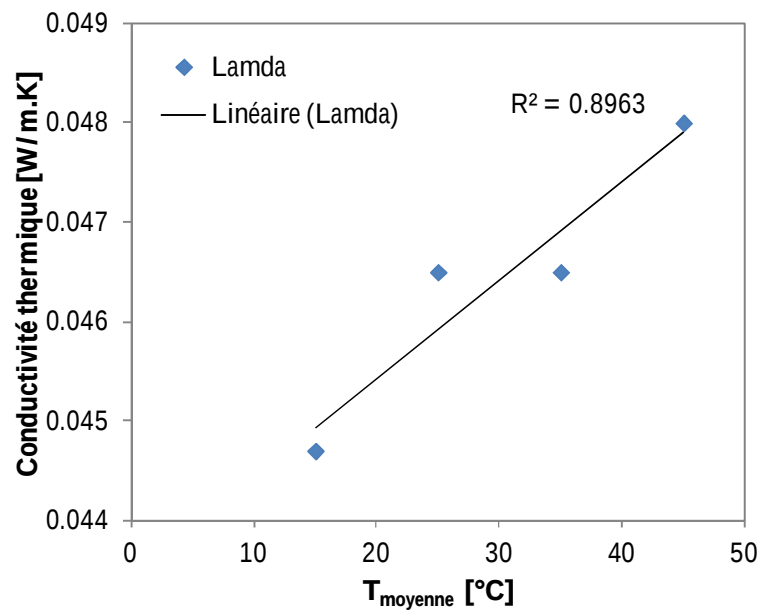
$$c_p = \frac{C}{\rho \cdot e} = \frac{5113,1}{51,74 \times 0,06} = 1647 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

c.) Mesures réalisées pour l'échantillon de lin

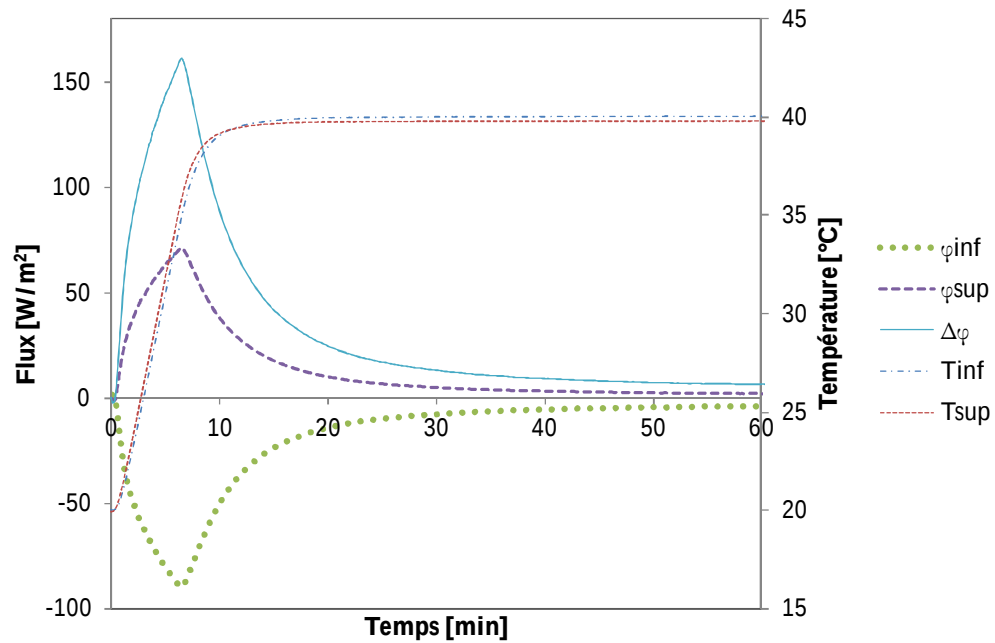


Variations de la température et du flux pendant la mesure de la conductivité du lin

En calculant la conductivité correspondant aux températures 15°C, 25°C, 35°C et 45°C, on obtient le graphe suivant :



Conductivité thermique du lin en fonction de la température moyenne imposée



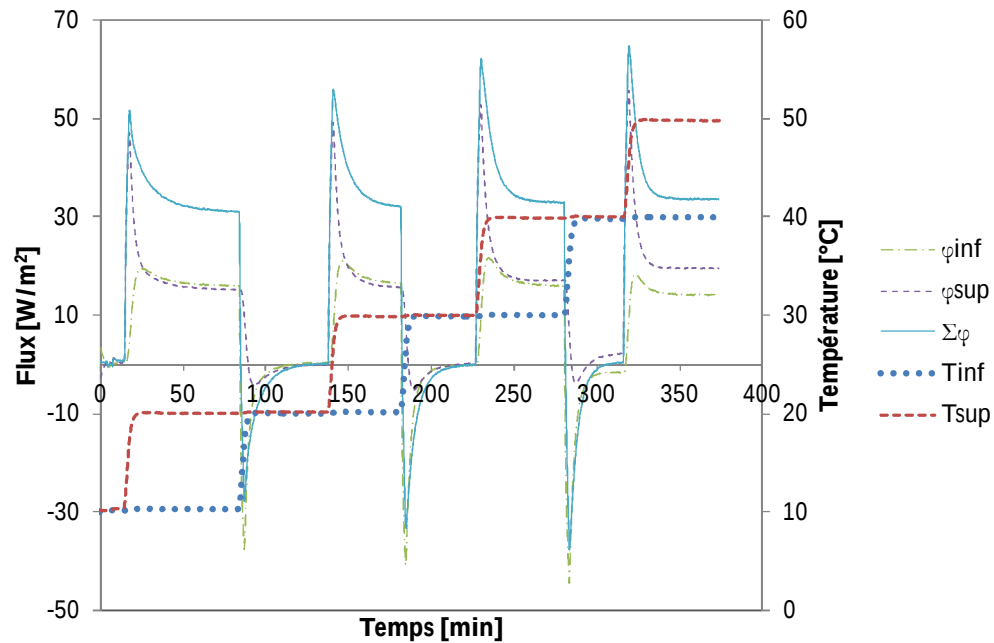
Variations de la température et du flux pendant la mesure de la chaleur massique du lin

La chaleur massique du lin est donnée par :

$$C = 2 \frac{\left(\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt \right)}{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}} - C_{fluxmètres} = \frac{2 \times 121953}{40} - 944 = 5184,3 \text{ J} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

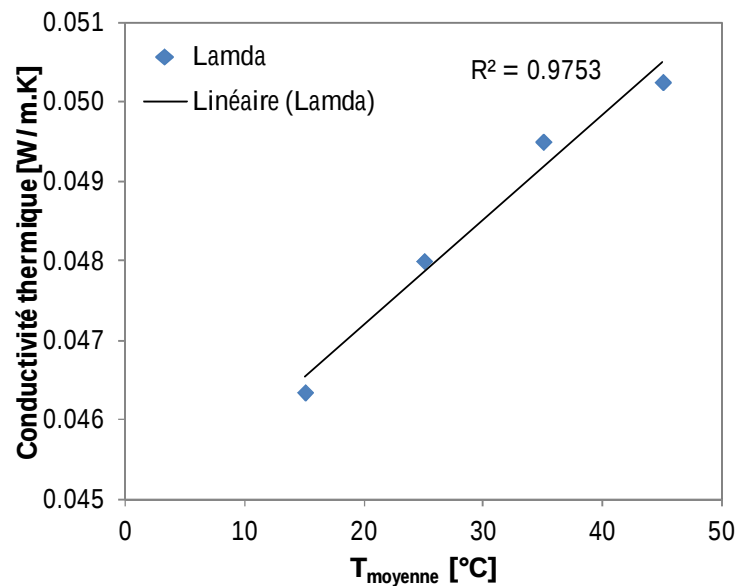
$$c_p = \frac{C}{\rho \cdot e} = \frac{5184,3}{52,75 \times 0,06} = 1638 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

d.) Mesures réalisées pour l'échantillon de métisse



Variations de la température et du flux pendant la mesure de la conductivité du métisse

En calculant la conductivité correspondant aux températures 15°C, 25°C, 35°C et 45°C, on obtient le graphe suivant :

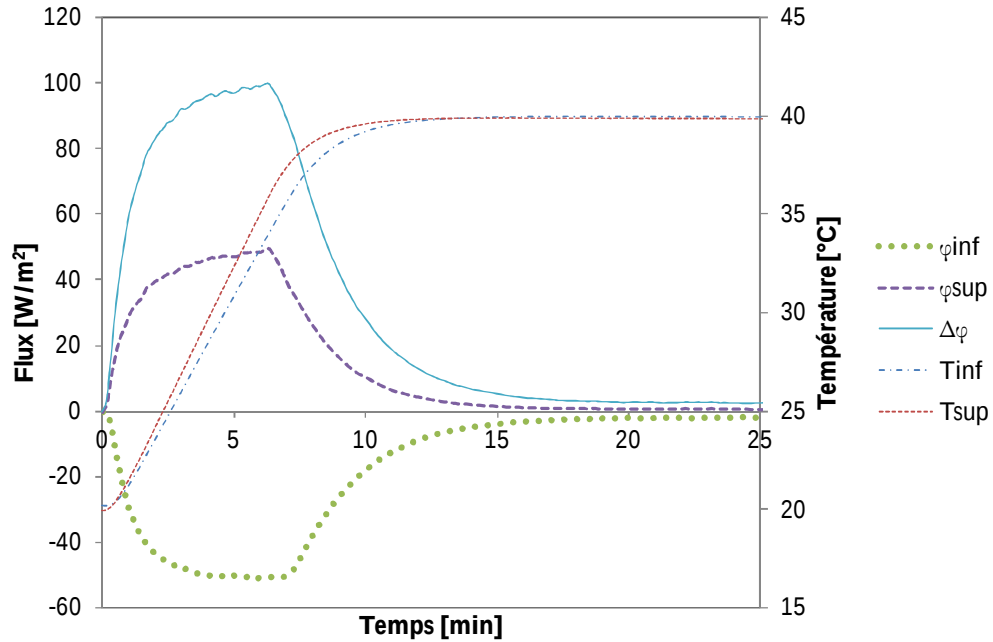


Conductivité thermique du métisse en fonction de la température moyenne imposée

La chaleur massique du lin est donnée par :

$$C = 2 \frac{\left(\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt \right)}{\Sigma T_{finale} - \Sigma T_{initiale}} - C_{fluxmètres} = \frac{2 \times 49136}{40} - 944 = 1512,8 \text{ J} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$c_p = \frac{C}{\rho \cdot e} = \frac{5184,3}{32,93 \times 0,03} = 1531 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$$



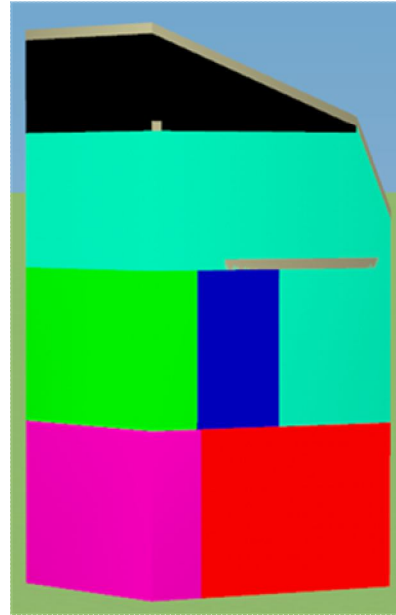
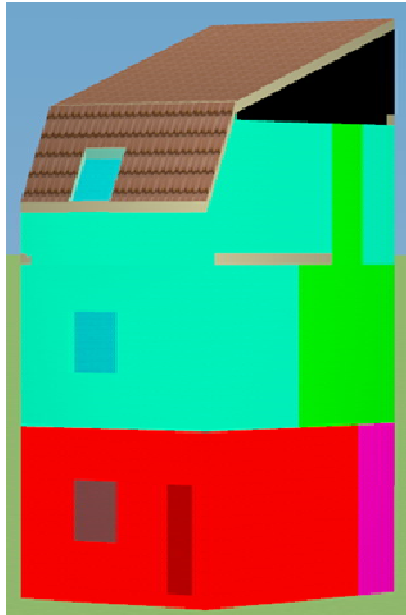
Variations de la température et du flux pendant la mesure de la chaleur massique du métisse

Annexe 5 - Données d'entrée pour les différentes STD

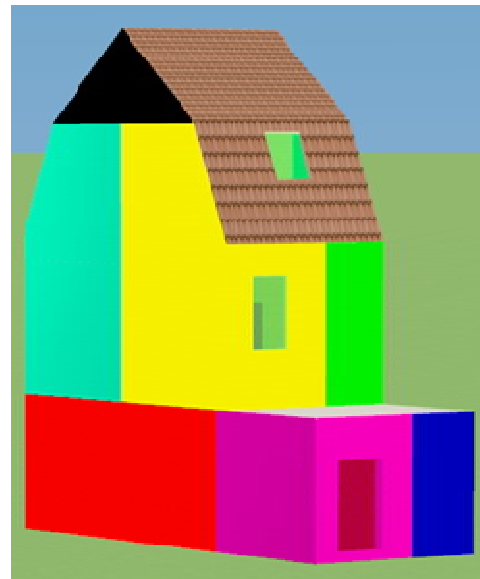
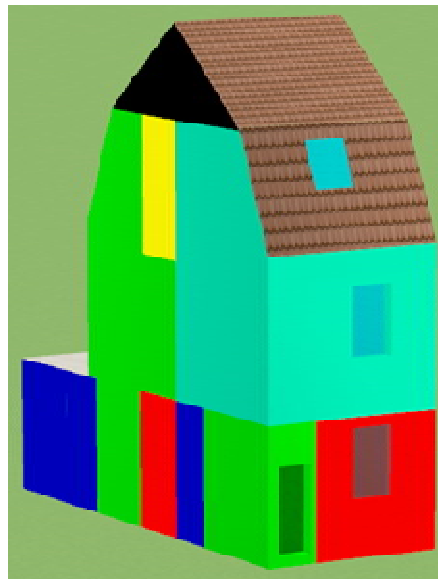
a.) Délimitation des différentes zones thermiques

Les différentes typologies suivent un découpage zonal permettant d'attribuer à chaque zone. Ce découpage est choisi comme suit :

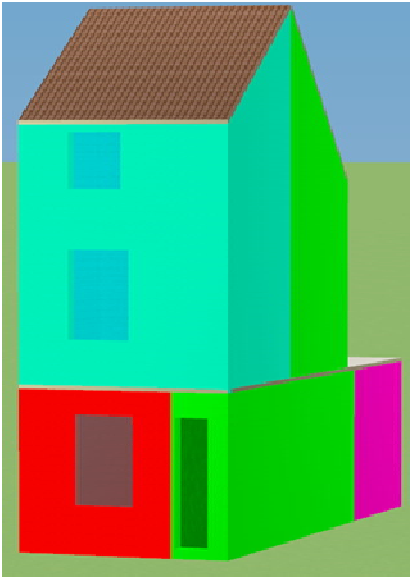
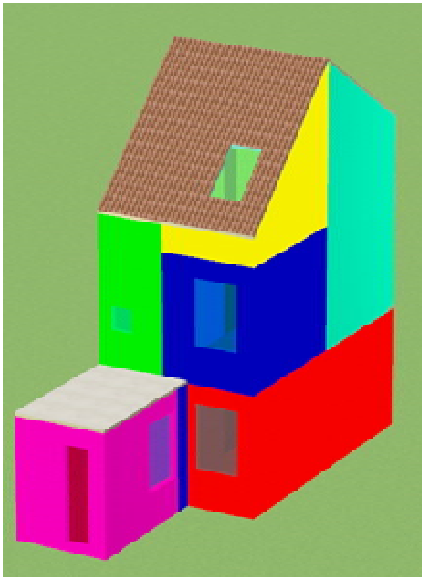
- La zone 1 (couleur verte) comprend l'entrée et les escaliers.
- La zone 2 (couleur rouge) comprend le salon et la salle à manger qui sont souvent côte à côte voire ouverts l'un sur l'autre et sont donc soumis au même comportement d'occupation ou de puissances dissipées.
- La zone 3 (couleur vert clair) comprend la cuisine qui a une utilisation particulière avec des équipements caractéristiques qui dégagent des quantités de chaleur importantes.
- La salle de bain ayant son propre scénario d'occupation, est désignée par zone 4 (couleur bleu foncé)
- Les chambres sont regroupées dans la zone 5 (couleur bleu clair) et la zone 6 (couleur jaune) en fonction de leur orientation (Sud/Nord) dû aux phénomènes thermiques sont sensibles à l'ensoleillement. A noter que la maison de courée qui a la particularité d'avoir trois mitoyennetés, ne comporte pas deux zones distinctes de chambres ; dans ce cas, l'ensemble des chambres se situe dans une même zone.
- Dans le cas des combles non aménagés (maison de courée, la maison ouvrière et la maison bourgeoise), le grenier se situe hors des zones d'étude, il convient néanmoins de lui attribuer une zone sous Pléiade, la zone 7 (couleur rose fuchsia). Pour le cas de la maison de ville les combles sont aménageables et constituent les zones 5 et 6.



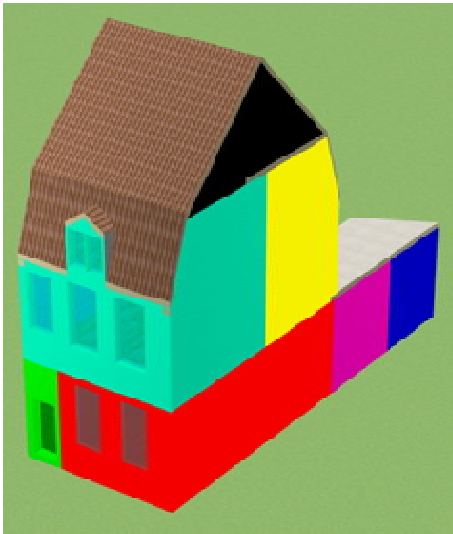
Zones thermiques de la maison de courée



Zones thermiques de la maison ouvrière



Zones thermiques de la maison de ville



Zones thermiques de la maison bourgeoise

Zone 1	
Zone 2	
Zone 3	
Zone 4	
Zone 5	
Zone 6	
Zone 7	

b.) Propriétés des différents matériaux constituant les parois

Eléments	épaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	c (J / Kg.K)	λ (W/m.K)
Brique pleine 22cm	0.22	1850	1000	0.978
Brique pleine de 34 cm	0.34	1850	1000	1.030
Torchis 2cm	0.02	1600	1008	0.650
Enduit ciment 2cm	0.02	1900	850	0.800
Parpaing creux 20cm	0.2	1185	1080	0.910
Lame d'air environ 1cm	0.01	1	1224	0.070
Parpaing plein 20cm	0.2	1300	648	1.050
Placoplatre BA 13	0.013	850	799	0.320
Terre cuite 2cm (tuile)-air ventilé	0.02	1900	900	1.150
Plâtre + cellulose 1,3cm	0.013	1200	800	0.300
Mortier pose 3cm	0.03	2000	840	1.150
Carrelage	0.01	2300	700	1.700
Hourdi de 14cm en terre cuite/ voutain brique	0.14	1111	792	0.760
Béton 18cm	0.18	2300	920	1.750
Lame d'air 7,5cm (chevron)	0.015	1	1224	0.090
lame d'air environ 5cm	0.05	1	1224	0.280
Zinc	0.002	6600	418	113.000

Propriétés des différents matériaux constituant les parois

c.) Les apports internes

Pour la cuisine 5 appareils électroménagers ont été pris en compte :

Le réfrigérateur fonctionne en continue. Sa consommation annuelle est estimée à 500kWh.

Le calcul pour mettre cette donnée au pas horaire est le suivant :

$$\frac{500 \text{ kWh} / \text{an}}{365 \text{ jours} \times 24 \text{ heures}} = 57 \text{ Wh} / \text{h}$$

Le four quand à lui est utilisé à raison de 20 minutes par jour en moyenne et dispose d'une puissance instantanée de 2250W. Comme PLEIADES dispose uniquement d'un planning au pas horaire, il faut moyenner ces valeurs sur une heure. Par exemple pour

une utilisation de 10 minutes du four entre 19h et 20h la valeur entrée dans le logiciel sera 375 W.

On procède de même pour le reste des appareils restant, à savoir : une paire de plaques de cuisson d'une puissance de 2000W, une micro-onde d'une puissance de 1250W, et une cafetière d'une puissance de 750W.

L'utilisation de ces appareils correspondant à une utilisation standard est étalée sur l'ensemble de la journée. On peut identifier 3 périodes d'utilisation :

Entre 6h et 7h : utilisation de la cafetière pendant 10 minutes

Entre 11h et 12h : utilisation du micro onde et des plaques de cuisson pendant 10 minutes.

Entre 18h et 20h : utilisation de la micro-onde pendant 5 minutes et du four et des plaques pendant 20 minutes.

Heure	Lun	Mar	Mer	Jeu	Ven	Sam	Dim
0-6h	57	57	57	57	57	57	57
6-7h	182	182	182	182	182	182	182
7-11h	57	57	57	57	57	57	57
11-12h	598	598	598	598	598	598	598
12-18h	57	57	57	57	57	57	57
18-20h	817	817	817	817	817	817	817
20-24h	57	57	57	57	57	57	57

Apports internes de la cuisine (supposés identiques pour toutes les typologies)

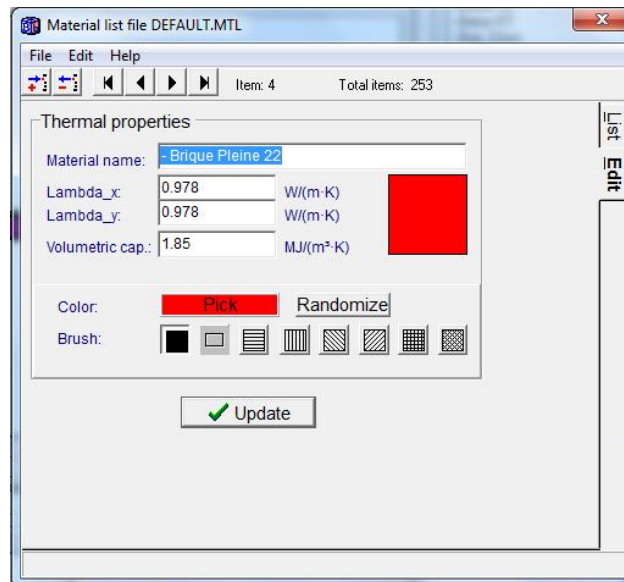
La même méthode est employée pour déterminer les puissances dissipées du salon/salle à manger. On considère dans cette zone la présence d'une télévision type LCD d'une puissance de 175W et d'un ordinateur avec écran plat d'une puissance de 80W, les deux appareils étant utilisés en moyenne 4 heures par jour (de 17h à 19h et de 21h à 23h). Le reste du temps la puissance consommée par ces appareils en mode veille est de 3W chacun.

Heure	Lun	Mar	Mer	Jeu	Ven	Sam	Dim
0-17h	6	6	6	6	6	6	6
17-19h	255	255	255	255	255	255	255
19-21h	6	6	6	6	6	6	6
21-23h	255	255	255	255	255	255	255
23-24h	6	6	6	6	6	6	6

Apports internes du salon et de la salle à manger (supposés identiques pour toutes les typologies)

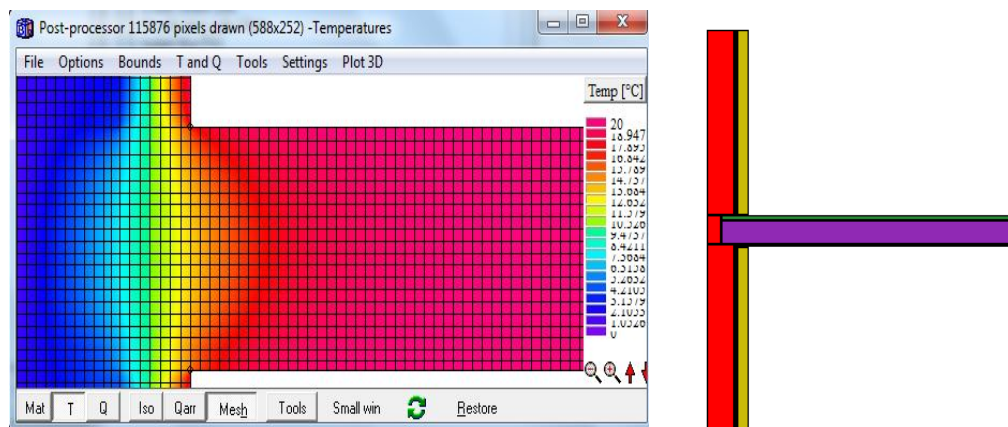
d.) Les ponts thermiques

Les caractéristiques des matériaux sont introduites dans la bibliothèque du logiciel HEAT :



Fenêtre d'édition d'un matériau (logiciel HEAT)

La réglementation impose pour un calcul de pont thermique, un maillage minimum de 2.5 cm par 2.5 cm; et une longueur de paroi pour le calcul du flux d'au moins 1m.



Maillage et profil de température dans la zone du pont thermique (logiciel HEAT)

Après avoir modélisé la paroi, il est possible de calculer les valeurs de Ψ . L'avantage de ce logiciel est qu'il donne le détail de calcul. Le logiciel donne aussi les coefficients de déperditions surfaciques U des différentes parois.

Ci-dessous les valeurs des ψ concernant les habitations lilloises :

Pont Thermique	Etat existant	scénario 1	scénario 2	scénario3
Mur ext (34) / Mur ext (34)	0,2750	0,0230	0,0220	0,0220
Mur ext (34) / Mur ext (22)	0,384	0,3620	0,3410	0,327
Mur ext parpaing / Mur ext parpaing	0,1920	0,0210	0,0213	0,0214
Mur ext (34) / Plancher bas	0,330	0,270	0,270	0,270
Mur ext (22) / Plancher bas	0,330	0,270	0,270	0,270
Mur ext parpaing / Plancher bas	0,330	0,270	0,270	0,270
Mur de refend / Plancher bas	0,340	x	x	x
Rampant / Plancher haut	0,570	0,369	0,336	0,309
Mur 22 Pignon mitoy / Plancher haut	0,4930	0,3120	0,2880	0,2660
Mur de refend 22 / Plancher haut	0,4610	0,0290	0,0240	0,0210
Mur ext Pignon / Rampant	0,419	0,2990	0,2670	0,2410
Mur parpaing / Plafond terrasse	0,214	0,164	0,167	0,170
Mur ext (34) / Pl int	0,466	0,479	0,450	0,422
Mur ext (22) / Pl int	0,5830	0,519	0,482	0,450
Mur ext (22) / Refend (22)	0,5530	0,489	0,451	0,418
Mur ext parpaing / Refend (34)	0,824	0,690	0,643	0,601
Mur ext (34) / Plafond terrasse	0,468	0,380	0,370	0,365

Valeurs des différents coefficients de déperditions linéiques Ψ calculées à l'aide du logiciel HEAT

Il est à noter que l'isolation du plancher bas rend les ponts thermiques entre ce dernier et les murs de refends nuls.

Bibliographie

- [1] GIEC, Bilan 2007 des changements climatiques, 2007.
- [2] J.-L. Puget, «Le changement climatique,» 2010.
- [3] S. Foucher, *Le Pic Pétrolier*, 2006.
- [4] INSEE, *Évolution du parc de logements*, 2013.
- [5] P. Herant, «Réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments : quel contexte national ?,» 2006.
- [6] J. P. Olivia, *L'isolation thermique écologique*, Terre vivante, 2001.
- [7] F. Smir, «Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie,» 2008.
- [8] M. Andersen, *Introduction to Building Technology*, 2006.
- [9] RT, «Réglementation thermique française,» 2005.
- [10] Legifrance, *Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants*, 2007.
- [11] O. Sidler, «Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France,» 2007.
- [12] C. Flory-Celini, «Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant,» 2008.
- [13] T. Marchal, «Amélioration de performance énergétique - préservation du patrimoine bâti ancien,» 2008.
- [14] S. Wehrung, *Bâti ancien : des qualités thermiques méconnues*, 2009.
- [15] P. ATHEBA, «Amélioration THERmique du Bâti Ancien,» 2010.
- [16] BATAN, «CONNAISSANCE DES BATIMENTS ANCIENS \& ECONOMIES D'ENERGIE,» 2007.
- [17] J. C. Tremsal, «Le concept de parois respirantes,» 1998.
- [18] A. Branders, «ISOLATION THERMIQUE PAR L'INTERIEUR DES MURS EXISTANTS EN BRIQUES PLEINES,» 2011.
- [19] F. Lebon, «Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées,» 2006.
- [20] F. Fouchal, «Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées,» 2006.
- [21] A. B. Larbi, «Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings,»

- Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 945-951, 2005.
- [22] T. Theodosiou et A. Papadopoulos, «The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions,» *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 2083-2089, 2008.
- [23] R. Bynum, *Insulation Handbook*, McGraw-Hill, 2001.
- [24] C. Langlais et S. Klarsfeld, «Isolation thermique à température ambiante - Propriétés,» *Techniques de l'ingénieur*, vol. BE9862, 2004.
- [25] S. Klarsfeld et C. Langlais, «Isolation thermique à température ambiante - Isolants,» *Techniques de l'ingénieur*, vol. BE9858, 2004.
- [26] A. Wignacourt, «Caractérisation, mesure et évaluation des indicateurs techniques, économiques et financiers des éco-matériaux : Application au secteur du bâtiment,» 2009.
- [27] CSTB, «Définition et Exemples d'usages des propriétés certifiées ISOLE,» 2007.
- [28] D. Samri, «Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique,» 2008.
- [29] P. LeGoarnig, *L'isolation bio de la maison ancienne*, G. Eyrolles, Éd., 2009.
- [30] S. Lemaire, «Aide au choix des produits de construction sur la base de leurs performances environnementales et sanitaires,» 2006.
- [31] BruxellesEnvironnement, «Matériaux d'isolation acoustique: choisir des matériaux sains avec un écobilan favorable,» 2010.
- [32] J. Coignet, *La maison ancienne*, Groupe Eyrolles, 2003.
- [33] URPACT, «Réhabilitation durable du parc de logements anciens privés dans le Nord Pas – de – Calais : Outils d'aide à la décision et d'accompagnement des ménages aux revenus modestes,» 2009.
- [34] E. Vanneufville, *Histoire de Lille - Des origines au XXe siècle*, France-Empire, Éd., 1999.
- [35] Mairie-Lille, 2013.
- [36] B. Filippi, H. Nabos, G. Gabillard, S. C. Ziza et L.-B. Deroo, «Les parcs de logements et leur occupation,» 2008.
- [37] V. d. Lille, «Guide technique intégral-Bien rénover son logement,» 2011.
- [38] S. Humbert, «note D2DPE n°37- La précarité énergétique en 2006 dans le Nord-Pas-de-Calais,» 2010.
- [39] ADEME, «L'isolation thermique - Améliorez le confort de votre maison,» 2008.

- [40] T. Thieffry, *Thermographie aérienne des bâtiments à Lille*, 2008.
- [41] TABULA, «Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stocks.,» 2010.
- [42] V. Anna-Maria, «Evaluation of a sustainable Greek vernacular settlement and its landscape: Architectural typology and buiding physics,» *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1095-1106, 2009.
- [43] C. Haté-Lecocq et G. Bonacorsi, «Morphologie, structure urbaine et typologie de l'habitat,» 1993.
- [44] A. Vanderheeren, «Patrimoine Urbain Remarquable du Nord - Typologies,» 2006.
- [45] CREPAH, «Le bâti ancien en flandre-artois. Connaissance de l'habitat existant.,» 1982.
- [46] Energies-Demain, «Etude efficacité énergétique en Nord-pas-de-Calais,» 2011.
- [47] D. Mons, «Mémoire de l'habitat du Nord-Pas-de-Calais,» 1990.
- [48] A. Vanderheeren, «Patrimoine urbain remarquable du Nord - Evolutions et modifications,» 2006.
- [49] A. Degiovanni, «Transmission de l'énergie thermique - Conduction,» *Techniques de l'ingénieur*, vol. BE8200, 1999.
- [50] R. Itterbeek, *Conduction unidirectionnelle en régime variable*, 2011.
- [51] P. Lagonotte, Y. Bertin et J.-B. Saulnier, «Analyse de la qualité de modèles nodaux réduits à l'aide de la méthode des quadripôles,» *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 38, pp. 51-65, 1999.
- [52] C. Peng et Z. Wu, «Thermoelectricity analogy method for computing the periodic heat transfer in external building envelopes,» *Applied Energy*, vol. 85, pp. 735-754, 2008.
- [53] N. E. ISO13786, «Performance thermique des composants de bâtiment - Caractéristiques thermiques dynamiques - Méthodes de calcul,» 2008.
- [54] V. Sambou, «Transferts thermiques instationnaires: vers une optimisation de parois de bâtiments,» 1984.
- [55] Y. Jannot, *Transferts thermiques*, 2011.
- [56] H. Asan, «Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials,» *Building and Environment*, vol. 41, pp. 615-620, 2006.
- [57] C. Saint-Blanquet et B. Fourcher, *Heat conduction*, 2012.
- [58] E. Sassine, Z. Younsi, Y. Chérif et E. Antczak, «Detailed Dynamic Heat Transfer in Thick Brick Walls Typical of Lille Metropolis,» *EPJ Web of Conferences*, vol. 33, 2012.

- [59] T. Wu, «Formalisme des impédances thermiques généralisées, application à la caractérisation thermique de parois de bâtiments,» 2011.
- [60] Y. Cherif, A. Joulin, L. Zalewski et S. Lassue, «Superficial heat transfer by forced convection and radiation in a horizontal channel,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, pp. 1696-1706, 2009.
- [61] G. C. Midi, «Quick start guide, 1st edition,» 2010.
- [62] E. Sassine, Z. Younsi, Y. Chérif et E. Antczak, «Understanding the Dynamic and Static Thermal Transfer in Brick Walls,» *Advanced Materials Research*, Vols. %1 sur %2512 - 515, pp. 2834-2837, 2012.
- [63] P. Ngendakumana, «Modélisation simplifiée du comportement thermique d'un bâtiment et vérification expérimentale,» 1988.
- [64] J. Sala, A. Urresti, K. Martin, I. Flores et A. Apaolaza, «Static and dynamic thermal characterization of a hollow brick wall: Tests and numerical analysis,» *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 1513-1520, 2008.
- [65] G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie et G. Achard, «Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy,» *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 1017-1031, 2002.
- [66] G. Eguether, *Cours EQUATIONS DE DEGRE 3 ET 4*, 2012.
- [67] S. Balac, *Cours Les Séries de Fourier*, 2012.
- [68] A. Gasparellaa, G. Pernigottob, M. Baratieria et P. Baggioc, «Thermal dynamic transfer properties of the opaque envelope: Analytical and numerical tools for the assessment of the response to summer outdoor conditions,» *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 2509-2517, 2011.
- [69] J.-J. Roux, «Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments,» 1984.
- [70] X. Xinhua, «Model-Based Building Performance Evaluation and Diagnosis,» 2005.
- [71] M. Al-Momoud, «Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials,» *Building and Environment*, vol. 40, pp. 353-366, 2005.
- [72] J. Yu, C. Yang, L. Tian et D. Liao, «A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China,» *Applied Energy*, vol. 86, pp. 2520-2529, 2009.
- [73] A. Ucar et F. Balo, «Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different exterior walls,» *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 88-94, 2010.

- [74] O. Kaynakli, «A study on residential heating requirement and optimum insulation thickness,» *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1164-1172, 2007.
- [75] T. Mahlia, B. Taufiq, Ismail et H. Masjuki, «Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulaion materials for building wall,» *Energy and Buildings*, vol. 39, pp. 182-187, 2007.
- [76] M. Ozel, «Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method,» *Applied Energy*, vol. 88, pp. 2429-2435, 2011.
- [77] M. Ozel, «Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 3854-3863, 2011.
- [78] V. Sambou, B. Lartigue, F. Monchoux et M. Adj, «Thermal optimization of multilayered walls using genetic algorithms,» *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 1031-1036, 2009.
- [79] S. Al-Sanea, M. Zedan et S. Al-Hussain, «Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential,» *Applied Energy*, vol. 89, pp. 430-442, 2009.
- [80] M. Wang, J. He, J. Yu et N. Pan, «Lattice Boltzman modeling of the effective thermal conductivity for fibrous materials,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 848-855, 2007.
- [81] M. Tahir, H. V. Tafreshi, S. Hosseini et B. Pourdehimi, «Modeling the role of microstructural parameters in radiative heat transfer through disordered fibrous media,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 4629-4637, 2010.
- [82] A. Kaemmerlen, F. Asllanaj, H. Sallée, B. Baillis et G. Jeandel, «Transient modeling of combined conduction and radiation in wood fibre insulation and comparison with experimental data,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 2169-2176, 2010.
- [83] METEOCIEL, 2013.
- [84] O. Al-Rabghi et k. Al-JohaniAl-Rabghi1997, «Utilizing transfer function method for hourly cooling load calculations,» *Enrgy Convers. Mgmt*, vol. 38, pp. 319-332, 1997.
- [85] K. Ulgen, «Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor,» *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 273-278, 2002.
- [86] J. Duffie et W. Beckman, «Solar engineering of thermal processes,» 2006.
- [87] C. Seerban, «Estimating Clear Sky Solar Global Radiation Using Clearness Index, for Brasov Urban Area,» *Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime and Naval Science Engineering*, pp. 150-153, 2010.

- [88] M. Jurado, J. Caridad et V. Ruiz, «Statistical distribution of the clearness index with radiation data integrated over five minute intervals,» *Solar Energy*, vol. 55, pp. 469-473, 1995.
- [89] RETScreen, «ANALYSE DE PROJETS D'ÉNERGIES PROPRES,» 2004.
- [90] E. Sassine, Z. Younsi, Y. Chérif et E. Antczak, «VERS UN CHOIX D'ISOLANT OPTIMAL POUR LA RÉHABILITATION DURABLE DU PARC DE LOGEMENTS ANCIENS PRIVÉS DE LA VILLE DE LILLE - TYPOLOGIE DE BÂTIMENTS ET COMPARATIF D'ISOLANTS,» *Annales du bâtiment et des travaux publics*, pp. 25-35, 2012.
- [91] D. Anastaselos, E. Giama et A. M. Papadopoulos, «An Assessment tool for the energy, economic and enviromental evaluation of thermal insulation solutions,» *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 1165-1171, 2009.
- [92] Cd2E, «Guide de choix isolation,» 2008.
- [93] E. Serodio, L. Bureau, S. Bonnaud et T. Salomon, «Simulation climat 2030 - 2050 des bâtiments BBC,» 2010.
- [94] CSTB, «Th-CE 2005,» 2010.
- [95] G. Lefebvre, «Comportement thermique dynamique des bâtiments: simulation et analyse,» *Techniques de l'ingénieur*, vol. B2041, 1994.
- [96] Infoclimat, *Normales et records des stations de météo France*, 2013.
- [97] N. E. ISO12831, «systèmes de chauffage dans les bâtiments,» 2004.
- [98] O. Sidler, *Infiltrations selon EN13790*, 2013.
- [99] Rénovation, *Rénover sans se tromper*, 2013.