



HAL
open science

Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment

Laure Wirbel - Ducoulombier

► **To cite this version:**

Laure Wirbel - Ducoulombier. Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment. Génie civil. Ecole Centrale de Lille, 2014. Français. NNT : 2014ECLI0013 . tel-02372099

HAL Id: tel-02372099

<https://theses.hal.science/tel-02372099>

Submitted on 20 Nov 2019

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

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



N° d'ordre : 250

ECOLE CENTRALE DE LILLE

THESE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Génie Civil

Par

Laure DUCOULOMBIER

DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE

Titre de la thèse :

Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment

Soutenue le 03 novembre 2014 devant le jury d'examen:

Président	Lyesse LALOUI	Professeur et Directeur de Laboratoire, EPFL
Rapporteur	Agnès JULLIEN	Directrice de Recherche, Directrice du laboratoire EASE, IFSTTAR Nantes
Rapporteur	Richard GAGNE	Professeur, Université de Sherbrooke
Membre	Daniel ZIRKELBACH	Fraunhofer Institute for Building Physics
Membre	Henk VISSCHER	Professeur, Université de Delft
Invité	Alexandre GARCIN	Responsable Construction Durable, Norpac
Invité	Philippe VAN DE MAELE	Directeur innovation et construction durable, Bouygues Construction
Directeur de thèse	Zoubeir LAFHAJ	Professeur, Ecole Centrale de Lille

Thèse préparée dans le Laboratoire de Mécanique de Lille UMR CNRS 8107

Ecole Doctorale SPI 072

PRES Université Lille Nord-de-France

Dédicaces

*A ma famille
A mon mari
A pioupiou*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Zoubeir LAFHAJ qui a dirigé cette thèse. Il a su m'apprendre la rigueur scientifique, me guider et m'épauler. Je lui serai toujours reconnaissante pour son amitié, les conseils constructifs et la motivation qu'il m'a donnés. Je n'oublierai pas son rôle majeur dans les opportunités que j'ai pu saisir et dont fait partie cette thèse. J'espère pouvoir trouver de multiples occasions de travailler en collaboration avec lui dans la suite de ma carrière.

Je remercie également chaleureusement Antoine GIBOUR, sans qui je ne me serai sans doute jamais lancée dans cette aventure, pour son accompagnement en démarrage de thèse, sa sympathie, et pour nos nombreux échanges amicaux par la suite.

Je remercie également Alexandre GARCIN, mon tuteur chez Norpac, de m'avoir donné l'autonomie et les moyens nécessaires au bon déroulement de cette thèse.

Je remercie Patrick DUBOURG et Thierry MICHAUD, respectivement Directeur Adjoint et Directeur Technique de Norpac pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me confiant ce travail, ainsi que pour le suivi qu'ils ont effectué tout au long de la thèse. Je les remercie également de me renouveler cette confiance pour la suite de mon parcours professionnel chez Norpac.

Je souhaite ensuite exprimer ma reconnaissance au professeur Lyesse LALOUÏ qui a accepté de présider mon jury, ainsi qu'aux professeurs Agnès JULLIEN et Richard GAGNE qui ont accepté d'être rapporteurs de ce mémoire. Merci également aux autres membres du jury Daniel ZIRKELBACH, Pr. Henk VISCHER et Phillippe VAN DE MAELE. Je tiens sincèrement à les remercier pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à mes anciens stagiaires, et plus particulièrement Zakaria et Imane, pour leur contribution dans le cadre de cette thèse, et pour avoir subi mes premières expériences de management.

Je remercie l'ensemble des partenaires du projet Isolpac qui ont travaillé en étroite collaboration avec moi : Mesdames DURIBREUX, HENRY, SOUPLY et VARIERAS, Messieurs BERTIN-MOUROT, BLONDEL, BRACQ, GUIBERT, PIEGARD, RAGUET, RAYMOND, SACQUET, VIENOT, WINTERS, et ZAHRA. Je les remercie vivement pour la confiance qu'ils ont su accorder à une jeune fille de 23 ans sans expérience.

Je remercie chaleureusement l'ensemble de mes collègues chez Norpac. Une pensée particulière pour Antoine, Romain et Florine pour leur bonne humeur (quasi) permanente, ainsi que pour Christine pour les papotages lors de nos footings.

Un grand merci aussi à mes collègues de l'Ecole Centrale de Lille, en particulier à la « team Zoubeir » : Fayçal, Essia, Naeem, Amel, Zakaria, Qiang, Ismaël, Amale... pour l'esprit d'équipe qu'ils ont réussi à créer, ce qui ne rend que plus difficile mon départ. Je leur souhaite beaucoup de réussites par la suite.

J'ai évidemment une pensée pour toutes celles et ceux qui m'ont permis de mener à bien cette thèse, à savoir ma famille, ma belle-famille et mes amis. Un grand merci à eux pour avoir été à l'écoute dans les périodes plus tendues, et d'avoir été présents pour profiter des bons moments.

Une pensée pour mon Emeric, qui m'a donné la confiance ainsi que le soutien nécessaire à la thèse, et qui a été le premier à entendre et réentendre mes déboires, sans jamais se plaindre.

Enfin, un merci particulier à tout ceux qui ont eu le courage de faire une relecture de ma thèse. Il en faut !

Résumé

Suite à la première conférence des Nations Unies sur l'environnement en 1972, est née une prise de conscience mondiale sur l'importance de prendre en compte l'environnement dans les grandes décisions politiques. En France, Le secteur du bâtiment représente 40% de la consommation énergétique et 25% des émissions de CO₂. Afin de réduire ces impacts, une nouvelle Réglementation Thermique 2012 (RT2012), est rentrée en application le 1er novembre 2011 pour le tertiaire et les logements ANRU et le 1er janvier 2013 pour les autres bâtiments. Une importante isolation des nouveaux logements est devenue obligatoire. C'est un moyen efficace de réduire les dépenses de chauffage tout en améliorant le confort. En réhabilitation, l'isolation est le premier point à améliorer pour obtenir de meilleures performances énergétiques.

C'est dans ce contexte que l'Ecole Centrale de Lille et l'entreprise Norpac, filiale du groupe Bouygues Construction, ont choisi d'engager une thèse CIFRE dans le but de développer un nouveau système d'isolation thermique par l'extérieur pour le bâtiment. De par l'ancrage de ces deux entités dans la région Nord-Pas-de-Calais, le choix s'est porté sur l'utilisation de matériaux textiles pour composer ce système, en partenariat avec les entreprises Dickson, PEG et BHD, et l'association CLUBTEX. L'ensemble de ces acteurs ont formé un consortium afin de mener à bien le développement du nouveau système appelé « Isolpac ». La thèse s'est effectuée au centre de ce projet de recherche et a permis d'assurer une rigueur et une exigence scientifique tout au long des travaux.

Dans un premier temps, les travaux de recherche ont été consacrés à la caractérisation thermique, hygrothermique, mécanique et chimique des différents matériaux qui composent le nouveau panneau d'isolation. L'objectif de ce travail est de définir les propriétés intrinsèques de différents matériaux, de les comparer avec des matériaux classiques, afin de pouvoir valider le choix de matériaux pour le nouveau système d'isolation, et de les qualifier. Deux méthodes d'essais de vieillissement accéléré, l'une normée et l'autre créée spécifiquement ont été appliquées aux toiles.

Dans un second temps, le panneau réalisé par assemblage des différents matériaux qui le composent est qualifié. Un intérêt particulier a été porté sur l'équilibre hygrothermique du panneau, à travers une simulation thermique dynamique sur le logiciel Wufi® réalisée suite à la caractérisation réalisée au préalable. Ce travail a pour but de prouver qu'il n'y a pas de risque de condensation de la vapeur d'eau dans les parois isolées avec le système Isolpac. En outre, les travaux se sont intéressés à l'étude de la réaction au feu des panneaux et sur les perspectives d'essais pour garantir les performances mécaniques.

Enfin, la recherche de techniques de fixation et d'assemblage des panneaux a fait l'objet de recherches spécifiques. Un ensemble de techniques ont été envisagées et des essais de pose in situ à l'échelle 1 ont été réalisés. Les perspectives d'essais liés à la résistance mécaniques et la résistance au feu du système d'isolation sont présentées. Un projet de façade démonstratrice à grande échelle est décrit. L'objectif de cette dernière est de pouvoir être le support d'une demande d'avis technique expérimental, qui permettra d'anticiper la procédure d'attribution d'avis techniques du CSTB.

Mots clefs : Isolation, Hygrothermie, Textiles Techniques, Bâtiment, ITE, essais in situ, sorption, durabilité, diffusion, réaction au feu

Abstract

After the first United Nations Conference on the Human Environment in 1972, a global consciousness about the significance of taking into account the environment in the major policy decisions appeared. In France, the building industry represents 40% of the total energy consumption and 25% of the total carbon dioxide emissions. In the objective of decreasing those impacts, a new thermal regulation called “Réglementation Thermique 2012” (RT2012), has been applied since the 1st November 2011 for the tertiary sector and some priority housing (“logements ANRU”), and since the 1st January 2013 for all the other buildings. A substantial insulation of the new buildings has become mandatory. It is an effective mean to reduce the heating expenses as well as increasing comfort. Regarding the refurbishment, the thermal insulation is the first item to improve to obtain a better energy efficiency.

It is in that context that the Ecole Centrale de Lille and the company Norpac, a subsidiary of Bouygues Construction, have chosen to engage a CIFRE thesis in order to develop a new external thermal insulation system for buildings. As they are both implanted in the Nord-Pas-de-Calais region, it was chosen to use textile materials to compose that system, in partnership with Dickson, PEG and BHD companies, and the CLUBTEX association. All these entities have formed a consortium to lead the development of the new system called “Isolpac”. The thesis was carried out in the center of this project and was able to ensure the rigor and the scientific exigency all along the work.

At first, the research work was devoted to the thermal, hygrothermal, mechanical and chemical characterisation of the different materials composing the new insulation panel. The objective of this work is to define the intrinsic properties of different materials and to compare them with conventional materials, in order to validate the choice of materials for the new insulation system, and to qualify them. Two accelerated ageing methods, one under standards and the other one specifically developed were applied on the fabrics.

In a second time, the panel made from the assembling of these different materials is qualified. A particular interest is focused on the hygrothermal equilibrium of the panel by using a dynamic thermal simulation on the software Wufi® following the previous characterization. This work aims to prove that there is no risk of condensation of water vapour in the walls insulated with the Isolpac system. Moreover, a work on the fire reaction of the panel and on the perspectives of other tests needed to guarantee the mechanical strength was carried out.

Finally, the search of fixation and assembling techniques for the panels has been the subject of specific research. Several techniques were considered and tests of installation in situ at scale one were made. The perspectives of tests for qualifying the mechanical strength and the fire resistance are described. A project of a demonstrating façade is presented. The objective of this façade is to be the support for a demand of an Experimental Technical Agreement, which will allow the anticipation of the procedure to obtain a Technical Agreement of the CSTB.

Keywords : Insulation, Hygrothermal, Technical textiles, Building, External Thermal Insulation, In situ tests, sorption, durability, diffusion, fire reaction

Sommaire

Dédicaces	3
Remerciements	5
Résumé	7
Abstract	9
Liste des figures	15
Liste des tableaux	19
Introduction Générale.....	21
1 Contexte de la thèse et analyse bibliographique : Evolution des réglementations, notions de base sur l'isolation thermique des bâtiments et présentation du partenariat et du projet de recherche	24
1.1. Evolution réglementaire et efficacité énergétique des bâtiments	24
1.1.1 La prise de conscience des enjeux environnementaux à l'échelle mondiale	24
1.1.2 Les engagements à l'échelle de l'Union Européenne	25
1.1.3 Les engagements pris par la France	26
1.1.3.1 Le Grenelle de l'environnement	26
1.1.3.2 L'évolution des réglementations thermiques françaises	28
1.1.4 Le Bâtiment Basse Consommation	30
1.1.5 La Réglementation Thermique 2012 (RT2012)	31
1.1.6 Le Plan climat régional du Nord-Pas-de-Calais	31
1.2 L'isolation thermique des bâtiments : enjeux, solutions et techniques	34
1.2.1 La bonne conception d'un bâtiment pour économiser l'énergie	34
1.2.2 L'isolation thermique : fonctionnement, solutions et contraintes	35
1.2.2.1 Présentation des matériaux d'isolations.....	35
1.2.2.2 Paramètres clés de l'isolation thermique	40
1.2.2.3 L'isolation par l'intérieur : historique et techniques.....	42
1.2.3 L'isolation par l'extérieur : techniques et avantages.....	43
1.2.3.1 Présentation des modes constructifs, synthèse et analyse.....	43
1.2.3.2 Performance thermique de l'isolation par l'extérieur	44
1.2.3.3 Influence du type d'isolation sur l'inertie du bâtiment.....	46
1.3 Les Textiles techniques : définition et présentation et liens avec l'industrie du bâtiment	48
1.3.1 Définition et présentation des textiles techniques	48
1.3.2 Utilisation des textiles techniques dans le secteur du bâtiment	52
1.4 Présentation du projet de recherche.....	54
1.4.1 Cadre de la recherche	54

1.4.1.1	Le contexte partenarial entre l'Ecole Centrale de Lille et l'entreprise Norpac	54
1.4.1.2	Présentation des différents partenaires et de leur rôle dans le projet de recherche	54
1.4.1.3	Financement du Fond Unique Interministériel (FUI)	55
1.4.2	Idée générale du projet de recherche	56
1.4.2.1	Le nouveau complexe isolant : description et contraintes identifiées	57
1.4.2.2	Assemblage des panneaux : contraintes et idées	58
1.4.2.3	Fixation du complexe textile sur le bâtiment : enjeux et idées	59
1.5	Conclusion du premier chapitre	60
2	Développement et caractérisation mécanique, thermique et hygrothermique des matériaux composant le panneau	62
2.1	Développement, caractérisation et qualification de l'isolant	62
2.1.1	Présentation de l'isolant, composition et mode de fabrication	62
2.1.1.1	Le polyéthylène téréphtalate	62
2.1.1.2	Fibres recyclées	62
2.1.1.3	Propriétés morphologiques	64
2.1.1.4	Chaîne de production	66
2.1.2	Caractérisation hygrothermique de l'isolant développé et comparaison avec d'autres isolants du marché	68
2.1.2.1	Objectif de la caractérisation hygrothermique	68
2.1.2.2	Présentation des matériaux étudiés	70
2.1.2.3	Méthodes de caractérisation hygrothermique	72
2.1.2.4	Résultats et analyse	75
2.1.3	Conclusion de la caractérisation hygrothermique de l'isolant	86
2.2	Caractérisation mécanique, de la perméabilité et de la réaction au feu de Toiles du marché et développement de toiles spécifiques	87
2.2.1	Méthode de sélection des toiles du marché à caractériser	87
2.2.1.1	Les matériaux textiles dans la construction	87
2.2.1.2	Présentation des textiles du marché caractérisés	87
2.2.2	Caractérisation mécanique, de la perméabilité et de la réaction au feu des toiles du marché	89
2.2.2.1	Caractérisation mécanique	89
2.2.2.2	Détermination de l'étanchéité des toiles	92
2.2.2.3	Mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau des toiles	95
2.2.2.4	Détermination de la Chaleur massique des toiles	96
2.2.2.5	Analyse des classements de réaction au feu des toiles	96
2.2.2.6	Conclusion de la caractérisation mécanique, de perméabilité et de réaction au feu des différentes toiles du marché	97

2.2.2.7	Développement d'une nouvelle toile « extérieure »	99
2.2.2.8	Choix de la toile intérieure.....	100
2.2.3	Estimation de la durabilité dans le temps.....	101
2.2.3.1	Introduction à l'analyse bibliographique sur les essais de vieillissement accéléré	101
2.2.3.2	Essais de vieillissement accéléré par UV.....	102
2.2.3.3	Essais de vieillissement par hydrolyse.....	104
2.3	Conclusion du deuxième chapitre.....	117
3	Développement des panneaux : fabrication, équilibre hygrothermique, réaction au feu et résistances mécaniques	120
3.1	Méthodes et moyens de confection du panneau	120
3.2	La gestion du risque de condensation dans les parois du bâtiment	121
3.2.1	Les Flux hygrothermiques dans les parois du bâtiment	121
3.2.2	Impact de l'humidité sur la conductivité des isolants	124
3.2.3	Problème de condensation dans l'enveloppe du bâtiment	125
3.2.4	Contraintes sur les toiles utilisées dans le panneau Isolpac	128
3.2.5	Analyse bibliographique des méthodes dynamiques de prédiction des flux hygrothermiques dans les parois et validation de ces méthodes.....	129
3.2.6	Méthodologie de notre étude du comportement hygrothermique du panneau.	131
3.2.7	Présentation du modèle dynamique utilisé.....	132
3.2.8	Modélisation du problème.....	134
3.2.8.1	Configuration de la paroi modélisée	134
3.2.8.2	Climat extérieur utilisé pour la simulation.....	135
3.2.8.3	Climat intérieur utilisé pour la simulation	136
3.2.9	Résultats et analyse de la simulation hygrothermique dynamique	137
3.3	Réaction au feu : normes, exigences, essais et résultats	140
3.3.1	Exigences, normes et réglementation concernant la réaction au feu.....	140
3.3.1.1	Essais de réaction au feu	140
3.3.1.2	Réglementation vis-à-vis de la réaction au feu des matériaux de construction	143
3.3.2	Essais d'orientation au feu réalisés sur nos matériaux.....	144
3.3.2.1	Méthode d'essai d'orientation de réaction au feu	144
3.3.2.2	Résultats des essais d'orientation au feu.....	145
3.3.3	Les Essais Euroclasses concernant la réaction au feu	147
3.3.3.1	Méthode d'essais Euroclasses pour la réaction au feu.....	147
3.3.3.2	Résultats des essais Euroclasses de réaction au feu réalisés sur les panneaux Isolpac	148
3.3.4	Perspectives concernant les essais de réaction au feu	151

3.4	Résistance mécanique du panneau	152
3.4.1	Résistance à la pénétration du panneau	152
3.4.1.1	Principe de l'essai de mesure de la résistance à la pénétration du panneau 152	
3.4.1.2	Observations et perspectives concernant l'essai de pénétration	153
3.4.2	Essais de résistance aux chocs du panneau	153
3.4.2.1	Principe de l'essai de résistance aux chocs	153
3.4.2.2	Perspectives concernant l'essai de résistance aux chocs	154
3.5	Conclusion du chapitre 3	154
4	Conception d'un système d'accroche adapté : fonctionnement, résistance mécanique, résistance au feu et essais in situ	157
4.1	Premières idées pour le système d'accroche et d'assemblage	157
4.1.1	L'accroche des panneaux sur le mur	157
4.1.1.1	Fixation des panneaux sur le mur par bandes auto-agrippantes	157
4.1.1.2	Fixation des panneaux sur le mur par rails métalliques	158
4.1.1.3	Fixation des panneaux sur le mur par vissage de débords de toile	159
4.1.2	L'assemblage des panneaux entre eux	159
4.1.2.1	Assemblage des panneaux par fermetures éclair	159
4.1.2.2	Assemblage des panneaux par bandes auto-agrippantes	160
4.1.2.3	Assemblage des panneaux par rail et par jonc	161
4.2	Résistance mécanique du système d'accroche et d'assemblage	162
4.2.1	Actions du vent	162
4.3	Résistance au feu	165
4.3.1	Réglementation	165
4.3.2	Perspectives	166
4.4	Essais de pose in situ et à l'échelle 1	166
4.4.1	Choix du prototypage et méthode de pose in situ	166
4.4.2	Analyse de la pose après essais in situ	167
4.4.2.1	Essais in situ de la technique de fixation par vissage de débords de toile	168
4.4.2.2	Essais in situ de la technique de pose par rails métalliques	170
4.4.2.3	Essais in situ de fixation des panneaux par bandes auto-agrippantes	170
4.4.2.4	Essais in situ de fixation des panneaux par vissage de débords de toile et assemblage par rails	171
4.4.3	Conclusion des essais de pose in situ	172
4.5	Technique finale d'accroche et d'assemblage retenue	173
4.5.1	Description détaillée du panneau final	173
4.5.2	Le rail de fixation : description et perspectives	174
4.5.3	Le mode opératoire de pose	175

4.6	Validation de l'ensemble par un essai in situ à grande échelle : projet de façade démonstratrice	177
4.6.1	Nécessité de l'essai à grande échelle : avis technique et avis techniques expérimentaux.....	177
4.6.1.1	La procédure d'avis technique du CSTB	177
4.6.1.2	Une première étape, les avis techniques expérimentaux.....	178
4.6.2	La façade démonstratrice : description et problématiques.....	178
4.6.2.1	Description du projet de façade démonstratrice.....	178
4.6.2.2	Techniques particulières pour les points singuliers de la façade	180
4.6.3	Perspectives.....	181
4.6.3.1	Finalisation du nouveau système	181
4.6.3.2	Réalisation de la façade démonstratrice.....	182
4.6.3.3	Obtention d'un avis technique expérimental	182
4.7	Conclusion du dernier chapitre.....	182
	Conclusion Générale	184
	Références bibliographiques	187

Liste des figures

Figure 1 : Schéma définissant la notion de Développement Durable (DD).....	25
Figure 2 : Les six groupes de travail du Grenelle	26
Figure 3 : Le plan bâtiment Grenelle	27
Figure 4 : Schéma d'évolution des réglementations thermiques françaises	28
Figure 5 : Illustration de l'application de la RT2005 (Source FFB).....	28
Figure 6 : Carte des coefficients de rigueur climatiques pour le label BBC.....	30
Figure 7 : Répartition des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité en France et dans le Nord-Pas-de-Calais en 2008 (Source : Norclimat - CITEPA).....	32
Figure 8 : Taux d'évolution des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité dans le Nord-Pas-de-Calais et en France entre 1990 et 2005 (Source : Norclimat - CITEPA).....	32
Figure 9 : Facteurs clés pour la conception d'un bâtiment BBC (source : Région Alsace)	34
Figure 10 : Photos de différents isolants : (1) Laine de verre, (2) Laine de roche,.....	37
Figure 11 : Photos de différents isolants : (1) Laine de bois, (2) Ouate de cellulose,.....	39
Figure 12 : Illustration du phénomène de conduction (Oliva J-P., 2010)	40
Figure 13 : Illustration du phénomène de convection (Oliva J-P., 2010)	40
Figure 14 : Illustration du phénomène de rayonnement (Oliva J-P., 2010).....	41
Figure 15 : Schéma représentatif des murs construits en France dans les années 60.	42
Figure 16 : Schéma représentatif des murs construits en France à partir de 1975	42
Figure 17 : Systèmes d'isolation par l'intérieur sous contre-cloison (a) et avec complexe isolant+plâtre (b) (Source : ADEME)	43
Figure 18 : Solutions d'isolation par l'extérieur avec enduit (a), avec vêtture (b) et sous bardage (c) (Langlais C., 2004)	44
Figure 19 : Comparaison entre isolation par l'intérieur (a) et par l'extérieur (b) au niveau de la dalle (Langlais C., 2004).....	44
Figure 20 : Variation du coefficient de transmission surfacique global en fonction de l'épaisseur d'isolation (Langlais C., 2004).....	46
Figure 21 : Différentes configurations testées (Kossecka E., 2002)	47
Figure 22 : Ratio des Amplitudes des températures intérieures et extérieures pour chacun des murs étudiés.....	47
Figure 23 : Consommation avec isolation par l'intérieur (mur 4) moins consommation avec isolation par l'extérieur (mur 3) en kWh/m ² /an dans six villes différentes.....	48
Figure 24 : Schéma de fonctionnement de la filière textile (Carlac'h D., 8 mars 2006)	49
Figure 25 : Différents types d'armures (Caramaro L., 2006)	49
Figure 26 : Différents modes de tricotage (Caramaro L., 2006)	50
Figure 27 : Image MEB d'un non-tissé consolidé par un liage chimique (Coste G., 2004).....	50
Figure 28 : Image MEB d'un non-tissé consolidé par un liage mécanique (Coste G., 2004) ..	51
Figure 29 : Image MEB d'un non-tissé consolidé par un liage thermique (Coste G., 2004) ...	51
Figure 30 : Tissus à entrelacement (Caramaro L., 2006)	52
Figure 31 : Les divers acteurs du projet de recherche.....	55
Figure 32 : Schéma représentatif du nouveau complexe isolant	57
Figure 33 : Schéma d'assemblage des lés	59
Figure 34 : Schéma de fixation de l'isolant	59
Figure 35 : Forme développée du polyéthylène téréphtalate	62
Figure 36 : Fibres de polyester recyclées	63
Figure 37 : Emissions en tonne équivalente de CO ₂ calculées pour une tonne de fibres de PET selon les différents modes de recyclage (Shen L., 2010)	63
Figure 38 : Comparaison de la consommation en Energie non renouvelable en GJ/t pour la production de différentes fibres (Shen L., 2010).....	64

Figure 39 : Evolution estimée de la conductivité thermique (en W/mk) en fonction de la densité (en kg/m ³) pour une laine de verre (Dominguez-Munoz F., 2010).....	65
Figure 40 : Evolution estimée de la conductivité thermique (en W/mk) en fonction de la densité (en kg/m ³) pour une ouate de polyester (Dominguez-Munoz F., 2010).....	65
Figure 41 : Images microscopes de l'EcoPEG 39. (a) Superposition des nappes de fibres (zoom x20). (b) Liaison entre deux nappes par voie mécanique (zoom x40).....	67
Figure 42 : Images MEB de l'EcoPEG 39. (a) Fibres liées entre elles thermiquement. (b) fibre bi-composant.....	67
Figure 43 : Processus industriel de production des non-tissés en polyester de l'industriel PEG.....	68
Figure 44 : Photos prises au microscope des 6 isolants étudiés. (a) Ouate de polyester (zoom x30), (b) laine de roche (zoom x30), (c) Polystyrène Expansé (zoom x20).....	71
Figure 45 : Schéma illustrant le fonctionnement d'une plaque chaude gardée.....	73
Figure 46 : Schéma représentant l'essai de mesure du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.....	74
Figure 47 : Schéma représentatif de l'essai de mesure du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle.....	75
Figure 48 : Conductivité thermique (W/mK) des isolants étudiés en fonction de la température moyenne des échantillons.....	79
Figure 49 : Détermination du coefficient d'absorption par immersion partielle de la LDV (a), de la LDR (b), du PSE (c), du PFB (d) et de la OP (e).....	83
Figure 50 : Dispositif d'essai de mesure de la résistance à la déchirure au clou (AFNOR, Décembre 1999).	91
Figure 51 : Dispositif d'essai de mesure de l'étanchéité d'une toile.....	93
Figure 52 : Photo de l'appareil WSP 3600 de l'Ecole Centrale de Lille.....	94
Figure 53 : Schéma illustrant l'obtention de la toile 11.....	99
Figure 54 : Photo prise au microscope de la toile 11.....	99
Figure 55 : Perte de masse (%) de l'Arcade en fonction de la durée de vieillissement (j) en milieu basique.	110
Figure 56 : Perte de masse (%) de l'Arcade en fonction de la durée de vieillissement (j) en milieu basique.	110
Figure 57 : Résistance à la traction (N/50mm) mesurée en fonction de l'allongement (mm) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE, neuf et vieilli en milieu basique.....	111
Figure 58 : Résistance à la rupture (N/50mm) en fonction de la durée de vieillissement en milieu basique (j) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE.....	112
Figure 59 : Modules d'Young (kPa) obtenues en fonction de la durée de vieillissement en milieu basique (j) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE.....	112
Figure 60 : Résistance à la traction (N/50mm) de traction mesurée en fonction de l'allongement (mm) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE, neuf et vieilli en milieu acide.....	113
Figure 61 : Moyennes de résistance à la rupture (N) obtenues en fonction de la durée de vieillissement en milieu acide (j) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE.....	114
Figure 62 : Modules d'Young (kPa) obtenues en fonction de la durée de vieillissement en milieu acide (j) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE.....	114
Figure 63 : Résistance à la déchirure au clou (N) en fonction du temps de vieillissement (j) de l'arcade (a) et du Sunworker PTFE (b) en milieu basique.....	115
Figure 64 : Résistance à la déchirure au clou (N) en fonction du temps de vieillissement (j) de l'arcade (a) et du Sunworker PTFE (b) en milieu acide.....	116
Figure 65 : Vue éclatée d'un panneau Isolpac.....	120
Figure 66 : Courbe de pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température .	122

Figure 67 : Phénomènes de diffusion, d'adsorption et de transport capillaire dans les pores des matériaux.....	123
Figure 68 : Les différents processus subis par l'eau impliquant un changement de phase (Kumaran M.K., 2009).....	123
Figure 69 : Conductivité thermique (en W/mK) des différents échantillons secs, humides et après séchage.....	125
Figure 70 : Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (en 10^{-10} kg/(m.s.Pa) en fonction de la pression barométrique à 23°C (en hPa).....	126
Figure 71 : Variation de la température sur une vue en coupe d'un mur béton isolé avec le nouveau système d'isolation par l'extérieur.....	127
Figure 72 : Variation de la pression partielle et de la pression de saturation sur une vue en coupe d'un mur béton isolé avec le nouveau système d'isolation par l'extérieur.....	128
Figure 73 : Condensation dans une toiture selon le calcul Wufi, Wufi sans radiations solaires et Glaser (Künzel H.M., September 2000).....	130
Figure 74 : Taux d'humidité mesuré et calculé en fonction du temps dans un échantillon de maçonnerie imprégné pour repousser l'eau (Krus M., 10-11 September 1998).....	130
Figure 75 : Méthodologie de travail pour l'analyse des flux hygrothermiques dans le complexe isolant.....	132
Figure 76 : Vue en coupe de la paroi modélisée.....	135
Figure 77 : Température (°C) moyenne à Lille en fonction du temps (heures) au cours d'une année.....	135
Figure 78 : Humidité relative (%) moyenne à Lille en fonction du temps (heures) au cours d'une année.....	136
Figure 79 : Evolution de la température intérieure (°C) en fonction de la température extérieure (°C).....	136
Figure 80 : Evolution de l'humidité relative intérieure (%) en fonction de la température extérieure (°C).....	137
Figure 81 : Teneur en eau (kg/m^3) en fonction du temps (années) dans l'isolant obtenue après simulation.....	138
Figure 82 : Teneur en eau (kg/m^3) en fonction du temps (années) dans le béton obtenue après simulation.....	139
Figure 83 : Teneur en eau (kg/m^3) en fonction du temps (années) dans la plaque de plâtre obtenue après simulation.....	139
Figure 84 : Classes de performances de réaction au feu pour les produits de construction, hormis les revêtements de sol et les produits d'isolation thermique pour conduites linéaires (AFNOR, Septembre 2007).....	142
Figure 85 : Photo du dispositif d'essai d'orientation au feu avec attaque sur la face (a) ou sur la tranche (b).....	144
Figure 86 : Photo des échantillons après essai d'orientation au feu sur les toiles avec attaque sur la face. De gauche à droite : toile 11, toile 1 et toile 3.....	146
Figure 87 : Photo des échantillons après essai d'orientation au feu sur les toiles avec attaque sur la tranche. De gauche à droite : toile 11, toile 3 et toile 1.....	146
Figure 88 : Photo de l'échantillon d'isolant après essai d'orientation au feu.....	147
Figure 89 : Schéma de montage de l'essai SBI.....	148
Figure 90 : Photos des éprouvettes après l'essai SBI : à gauche la configuration 1, à droite la configuration 2.....	150
Figure 91 : Dispositif de pénétration selon la norme NF EN 13498.....	152
Figure 92 : Appareillage de test de la résistance au choc d'un système d'isolation selon la norme NF EN 13497.....	153
Figure 93 : Schéma de fixation des panneaux Isolpac par Velcro©.....	158

Figure 94 : Photos de joncs	158
Figure 95 : Schéma de fixation des panneaux Isolpac par vissage de débords	159
Figure 96 : Schéma d'assemblage par fermetures éclaircs des panneaux Isolpac	160
Figure 97 : Schéma d'assemblage par rabats auto-agrippants des panneaux Isolpac	160
Figure 98 : Schéma représentant l'assemblage par rails et joncs des panneaux Isolpac.....	161
Figure 99 : Carte des zones des vents en France métropolitaine (CSTB, février 2009)	163
Figure 100 : Dispositif pour la mesure de la résistance à l'arrachement d'un système d'isolation tel que définit dans la norme NF EN 13495.....	164
Figure 101 : Schéma du dispositif d'essai au feu LEPiR 2	165
Figure 102 : Disposition des panneaux posés in situ	167
Figure 103 : photos du panneau 1 posé : à gauche le panneau posé, à droite un zoom sur la fixation d'angle.	168
Figure 104 : Photos de la pose du second et du troisième panneau : à gauche la pose du deuxième panneau, à droite les trois premiers panneaux posés	169
Figure 105 : Photos du deuxième groupe de panneaux posés in situ. A gauche la pose du panneau 5, à droite le résultat final.	169
Figure 106 : Photos de la pose in situ des panneaux avec la technique rails et joncs. A gauche un rail, au centre les deux rails fixés verticalement, à droite le panneau fixé par rail.	170
Figure 107 : Photos de la pose in situ des panneaux fixés par bandes auto-agrippantes. A gauche la bande auto-agrippante vissé au mur, à droite les deux panneaux posés.	171
Figure 108 : Photos de la pose in situ des panneaux, avec la méthode d'assemblage mixte rails+joncs et velcro. A gauche l'assemblage horizontal en velcro, à droite l'assemblage vertical par rail PVC.....	171
Figure 109 : Photos de la pose in situ des prototypes. A gauche le groupe 5 posé, à droite le groupe 6 posé.	172
Figure 110 : Schéma du panneau Isolpac	174
Figure 111 : Schéma en coupe représentant le rail de fixation dans sa dernière version.....	175
Figure 112 : Les étapes successives de la pose du système Isolpac.....	176
Figure 113 : Phasage et principaux délais de la procédure d'Avis Technique (CSTB).....	177
Figure 114 : Photo de la façade qui servira de façade démonstratrice une fois isolée avec le système Isolpac	179
Figure 115 : Représentation 3D du calepinage de la façade démonstratrice.....	180
Figure 116 : Schéma des acrotères avec isolation avec le système Isolpac	181

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les cinq labels associés à la RT2005 (Source FFB)	29
Tableau 2 : Principales orientations présentées dans SRCAE de la région Nord-Pas-de-Calais	33
Tableau 3 : Comparatifs de quelques isolants du marché (Papadopoulos A.M, 2007).....	39
Tableau 4 : Objectifs à atteindre pour le nouveau système, en comparaison avec les systèmes existants	56
Tableau 5 : Densité et conductivité thermique déclarées par les fabricants.....	72
Tableau 6 : Masses volumiques apparentes (kg/m^3) mesurées et comparaison avec les masses volumiques déclarées	76
Tableau 7 : Résultats des mesures de conductivité thermique pour les 5 isolants considérés .	77
Tableau 8 : Coefficient directeur, ordonnée à l'origine et coefficient de corrélation des courbes de tendances de la Figure 50.....	79
Tableau 9 : Comparaison entre les valeurs de conductivité déclarées et les valeurs mesurées	79
Tableau 10 : Valeurs de chaleur massique ($\text{J}/(\text{kg.K})$) mesurées pour les isolants étudiés	80
Tableau 11 : Mesures des propriétés de transmission de la vapeur d'eau	80
Tableau 12 : Résultats des mesures des coefficients d'absorption d'eau par immersion partielle	81
Tableau 13 : Résultats de mesure de la teneur en eau de la LDV en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant	84
Tableau 14 : Résultats de mesure de la teneur en eau de la LDR en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant	84
Tableau 15 : Résultats de mesure de la teneur en eau du PFB en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant	85
Tableau 16 : Résultats de mesure de la teneur en eau de la OP en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant	85
Tableau 17 : Fournisseurs et références des 11 premières toiles caractérisées	88
Tableau 18 : Résultats des mesures de résistance à la traction et des calculs de module d'Young	90
Tableau 19 : Résultats des mesures de résistance à la déchirure au clou en chaîne et en trame pour les 11 toiles étudiées	91
Tableau 20: Résultats des essais de mesure d'étanchéité à une pression de 200mm de colonne d'eau pendant 2h, sur les toiles 1 à 10 et pour chacun des échantillons testés.	94
Tableau 21 : résultats de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau des toiles considérées .	95
Tableau 22: Résultat des mesures de chaleur massique	96
Tableau 23 : Classement au feu des 11 toiles considérées	97
Tableau 24 : Synthèse des résultats obtenus pour les 11 toiles considérées	98
Tableau 25 : Résultats d'essais de caractérisation de la toile extérieure	100
Tableau 26 : Résultats d'essais de caractérisation de la toile intérieure	101
Tableau 27 : Résultats des essais de résistance à la traction sur des échantillons neufs et vieillis pendant 4000h ou 5000h.	103
Tableau 28 : Récapitulatif des conditions d'essais	107
Tableau 29 : Propriétés des matériaux tels qu'ils ont été modélisés	135
Tableau 30 : Teneur en eau (kg/m^3) initiale, finale, minimale et maximale pour chacun des matériaux obtenues après simulation	137
Tableau 31 : Classification des familles d'habitation collective et classement au feu des façades exigé	143
Tableau 32: Résultats des essais d'orientation au feu avec attaque sur la face	145
Tableau 33: Résultats des essais d'orientation au feu avec attaque sur la tranche	145
Tableau 34: Résultats des essais d'orientation au feu sur l'isolant.....	147

Tableau 35 : Résultat des essais d'allumabilité (attaque sur le bord)	149
Tableau 36 : Résultat des essais d'allumabilité (attaque sur la surface).....	149
Tableau 37 : Résultats de l'essai SBI pour deux configurations de panneau	150
Tableau 38 : Valeurs normales et extrêmes des pressions dynamiques dues au vent selon la zone concernée (CSTB, février 2009)	162
Tableau 39 : Description des différents prototypes produits et posés in situ	167

Introduction Générale

Suite à la première conférence des Nations Unies sur l'environnement en 1972, est née une prise de conscience mondiale sur l'importance de prendre en compte l'environnement dans les grandes décisions politiques. Les menaces liées au réchauffement climatique ainsi que les enjeux du développement durable ont depuis été explicités et précisés. Enfin, l'augmentation des consommations énergétiques dans tous les domaines, accentuée par la forte croissance de pays émergents comme la Chine ou le Brésil pose la question de la capacité de l'humanité à répondre à ses besoins en énergie de façon pérenne.

Le secteur du bâtiment représente 40% de la consommation énergétique en France et 25% des émissions de CO₂. Cependant, l'Etat français, signataire du protocole de Kyoto, s'est doté d'une stratégie nationale et s'est fixé comme objectif de diviser la consommation des bâtiments par quatre d'ici à 2020 (Apparu B., 2010). Cet objectif a été retranscrit dans le Grenelle de l'environnement, qui a débuté en Octobre 2007, et qui a pour objectif de prendre des décisions à long terme en matière d'environnement et de développement durable. L'esprit du Grenelle de l'environnement est d'imposer des contraintes plus strictes en termes de consommation d'énergie dans le bâtiment à l'image de nos voisins européens.

Les objectifs du Grenelle de l'environnement ont été réglementés dans la Réglementation Thermique 2012 (RT2012), rentrée en application le 1er novembre 2011 pour le tertiaire et les logements ANRU¹ et le 1er janvier 2013 pour les autres bâtiments.

En France, et dans de nombreux pays, l'isolation thermique des bâtiments fait l'objet de réglementations. L'isolation des nouveaux logements est obligatoire mais c'est aussi un moyen efficace de réduire les dépenses de chauffage tout en améliorant le confort. Du côté des bâtiments existants, l'isolation est le premier point à améliorer pour obtenir de meilleures performances énergétiques. Elle est encouragée par les pouvoirs publics, via notamment des crédits d'impôts.

L'isolation thermique par l'extérieur, si elle n'est pas encore aussi répandue en France que chez ses voisins européens, est la technique qui permet d'optimiser au mieux l'utilisation des matériaux d'isolation. Néanmoins, les techniques d'isolation existantes sont contraignantes. En effet, la mise en œuvre est longue, couteuse et difficile.

C'est dans ce contexte que l'Ecole Centrale de Lille et l'entreprise Norpac, filiale du groupe Bouygues Construction, après des années de collaborations autour de projets de recherche en construction durable, ont choisis d'engager une thèse CIFRE dans le but de développer un nouveau système d'isolation thermique par l'extérieur pour le bâtiment. De part l'ancrage de ces deux entités dans la région Nord-Pas-de-Calais, le choix s'est porté sur l'utilisation de matériaux textiles pour composer ce système.

Ces travaux de thèse ont été menés en partenariat avec les entreprises Dickson, PEG et BHD, et l'association CLUBTEX. Avec Norpac et l'Ecole Centrale de Lille, ils ont formé un consortium afin de mener à bien le développement du nouveau système appelé « Isolpac ». La thèse s'est effectuée au centre de ce projet de recherche et a permis d'assurer une rigueur et une exigence scientifique tout au long des travaux.

¹ ANRU : Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine

Ce mémoire de thèse est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit le contexte général de la thèse et introduit les problématiques majeures liées à ces travaux. Dans un premier temps, les évolutions réglementaires concernant l'efficacité énergétique des bâtiments sont présentées, et plus particulièrement la rupture importante que représente la nouvelle réglementation thermique RT2012. Dans un deuxième temps, les différentes techniques d'isolation thermique des bâtiments sont décrites et les enjeux de la recherche de nouvelles techniques sont explicités. Par ailleurs, une présentation des textiles techniques et leur lien avec l'industrie du bâtiment est effectuée. Enfin, le projet de recherche est décrit et les contraintes et pistes de développement sont données.

Le deuxième chapitre est consacré au développement et à la caractérisation thermique, hygrothermique, mécanique et chimique des différents matériaux qui composent le nouveau panneau d'isolation. L'objectif de ce travail est de définir les propriétés intrinsèques de différents matériaux, de les comparer avec des matériaux classiques, afin de pouvoir valider le choix de matériaux pour le nouveau système d'isolation, et de les qualifier. L'isolant développé est présenté ainsi que l'ensemble des résultats de sa caractérisation, en comparaison avec quatre autres isolants disponibles sur le marché. Par ailleurs, la caractérisation et l'analyse de onze toiles du marché est décrite. Le choix d'une toile parmi celles-ci et le développement d'une nouvelle toile spécifique pour le système d'isolation est également présenté. Dans le but d'évaluer la durée de vie de la toile en condition réelle, deux méthodes d'essais de vieillissement accéléré, l'une normée et l'autre créée spécifiquement dans le cadre de la thèse ont été appliquées aux toiles. Les protocoles, résultats et analyses sont donnés dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est dédié au panneau dans son ensemble. La fabrication du panneau par assemblage des différents matériaux qui le composent est décrite. De plus, un intérêt particulier a été porté sur l'équilibre hygrothermique du panneau, à travers une simulation thermique dynamique sur le logiciel Wufi® réalisée suite à la caractérisation préalable présentée au chapitre 2. Ce travail a pour but de prouver qu'il n'y a pas de risque de condensation de la vapeur d'eau dans les parois isolées avec le système Isolpac. En outre, le chapitre s'intéresse à l'étude de la réaction au feu des panneaux, notamment suite à l'analyse des résultats d'essais SBI. La dernière partie porte sur les perspectives d'essais pour garantir les performances mécaniques.

Le quatrième et dernier chapitre porte sur la recherche de techniques de fixation et d'assemblage des panneaux. Il y est présenté l'ensemble des techniques envisagées ainsi que les essais de pose in situ réalisés à l'échelle 1. La technique finale retenue est décrite. Les essais liés à la résistance mécanique et la résistance au feu du système d'isolation sont présentés ainsi que les perspectives associées à ces essais. Enfin, le projet de façade démonstratrice à grande échelle est décrit. L'objectif de cette dernière est de pouvoir être le support d'une demande d'avis technique expérimental, qui permettra d'anticiper la procédure d'attribution d'avis techniques du CSTB.

Enfin les résultats de ces travaux sont synthétisés dans une conclusion, qui esquisse également les perspectives possibles pour la poursuite de ces recherches.

Chapitre 1

**Contexte de la thèse et analyse bibliographique : Evolution
des réglementations, notions de base sur l'isolation
thermique des bâtiments et présentation du partenariat et
du projet de recherche**

1 Contexte de la thèse et analyse bibliographique : Evolution des réglementations, notions de base sur l'isolation thermique des bâtiments et présentation du partenariat et du projet de recherche

1.1. Evolution réglementaire et efficacité énergétique des bâtiments

1.1.1 La prise de conscience des enjeux environnementaux à l'échelle mondiale

En 1972 à Stockholm, se tient pour la première fois une conférence des Nations Unies sur l'environnement. Elle a fait de l'environnement une question majeure sur le plan international en créant le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Ce programme a pour but d'être une ligne directrice qui doit encourager les partenariats pour la protection de l'environnement en inspirant, informant et aidant les nations et les peuples à améliorer leur qualité de vie sans compromettre celle des générations futures. Il s'agira du premier Sommet de la Terre.

En 1987, le rapport Brundtland (World Commission on Environment and Development, 4 août 1987) est publié par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement des Nations Unies. Il définit pour la première fois la notion de Développement Durable (« Sustainable Development ») comme :

« Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre les capacités des générations futures à répondre aux leurs. »

Plusieurs concepts sont issus de cette notion :

- Permettre aux plus démunis de répondre à leurs besoins essentiels
- Prendre en compte les limites écologiques de la planète
- Préserver les ressources en vue d'assurer les besoins des prochaines générations

Le développement durable est défini par le schéma Figure 1. Il s'agit du croisement entre un développement écologique, social et économique. C'est uniquement en regroupant ces trois composantes que le développement peut être considéré comme durable.

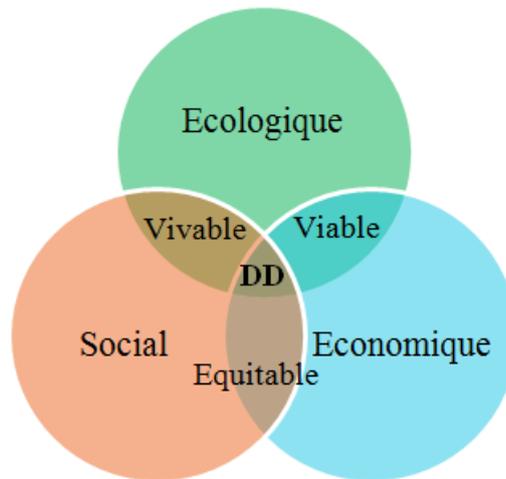


Figure 1 : Schéma définissant la notion de Développement Durable (DD)

En 1992, 20 ans après la conférence de Stockholm se tient le Sommet de la Terre à Rio. Il se conclue avec la signature de la Déclaration de Rio (Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, 3-14 juin 1992), qui fixe les moyens visant à assurer une meilleure utilisation de la planète, et fixe des droits et des responsabilités des pays en regard de l'environnement. Ce sommet est le coup d'envoi d'un programme ambitieux de lutte mondiale contre le changement climatique, la diminution de la biodiversité, la désertification et les produits toxiques dangereux.

En 2002, à Johannesburg, se tient un nouveau Sommet Mondial qui tire un bilan des 10 années d'actions qui se sont écoulées depuis Rio. Malgré un engagement fort perçu de la part de la communauté internationale, un échec est constaté : une faille profonde persiste entre riches et pauvres et menace la stabilité mondiale. Un programme d'action est lancé, avec pour priorités l'accès à l'eau potable, la préservation des ressources naturelles, le maintien de la biodiversité, la réduction des effets néfastes des produits chimiques, la consommation et la production durables.

1.1.2 Les engagements à l'échelle de l'Union Européenne

Les traités de Maastricht en 1992 et d'Amsterdam en 1997 font référence au développement durable et visent à l'intégrer dans les politiques et mesures communautaires.

Le conseil européen de Bruxelles du 8 et 9 mars 2007 (Conseil de l'Union Européenne, 8-9 mars 2007) fixe pour l'UE un objectif de réduction stricte de 20% de ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990 et ce d'ici 2020.

La Directive 2002/91/CE (Le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne, 16 décembre 2002) puis la directive 2010/31/UE (La Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne, 19 mai 2010) du parlement européen et du conseil sur la performance énergétique des bâtiments font état de la part importante du bâtiment dans la consommation énergétique de l'Union Européenne. En effet, le secteur est responsable de 40% de la consommation d'Énergie de l'UE. De plus, avec l'augmentation perpétuelle de la population, le secteur est constamment en expansion. La directive 2010/91/UE précise donc que : « La réduction de la consommation d'énergie et l'utilisation d'énergie produite à partir

de sources renouvelables dans le secteur du bâtiment constituent des mesures importantes qui sont nécessaires pour réduire la dépendance énergétique de l'Union et les émissions de gaz à effet de serre ». Afin de respecter les engagements en 2007, les directives précisent que « **l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment sera déterminante** ».

1.1.3 Les engagements pris par la France

1.1.3.1 Le Grenelle de l'environnement

Suite au conseil européen du 7 et 8 mars 2007 et à une véritable volonté politique, le Grenelle de l'Environnement est initié en France. Six groupes de travail ont ainsi été formés :

- groupe « lutter contre les changements climatiques et maîtriser la demande d'énergie »
- groupe « préserver la biodiversité et les ressources naturelles »
- groupe « instaurer un environnement respectueux de la santé »
- groupe « adopter des modes de production et de consommation durables »
- groupe « construire une démocratie écologique »
- groupe « promouvoir des modes de développement écologiques favorables à l'emploi et à la compétitivité »

De plus, les citoyens ont été consultés via des réunions publiques, des forums et internet. S'en est suivi entre 2008 et 2010, la publication des lois « Grenelle ». La loi dite Grenelle 1 (Grenelle 1, 2009) a été votée par le Parlement le 23 juillet 2009 et promulguée le 3 août 2009. La loi dite Grenelle 2 (Grenelle 2, 2010) a été votée par le Parlement le 29 juin 2010 et promulguée le 12 juillet 2010.



Figure 2 : Les six groupes de travail du Grenelle

Plus précisément, concernant le secteur du bâtiment, la loi Grenelle 1 fixe les objectifs suivants :

- le « facteur 4 » : division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050.
- 23% d'énergies renouvelables.
- intégralité du Plan Bâtiment, avec notamment la confirmation de la norme de 50 kWhEP/m²/an.

La loi Grenelle 2, quant à elle, vise à concevoir et construire des bâtiments plus sobres énergétiquement et un urbanisme mieux articulé. Pour cela elle entend :

- Engager une rupture technologique dans le neuf et accélérer la rénovation thermique du parc ancien
- Favoriser un urbanisme économe en ressources foncières et énergétiques

De ces lois est issu le Plan Bâtiment Grenelle, qui fixe des objectifs chiffrés :

- En 2012, tous les nouveaux bâtiments seront à basse consommation (BBC)
- En 2020, ils seront tous à énergie positive (BEPOS), c'est-à-dire qu'ils consommeront moins d'énergie qu'ils n'en produiront.
- 400 000 logements devront être rénovés chaque année.
- 800 000 logements sociaux les plus énergivores seront rénovés d'ici 2020.
- l'état devra réaliser un audit de tous ses bâtiments avant fin 2010 et s'engager sur la rénovation énergétique de ceux-ci avant fin 2012 (A noter qu'à ce jour l'engagement de l'état dans la rénovation de ses bâtiments n'est pas visible).

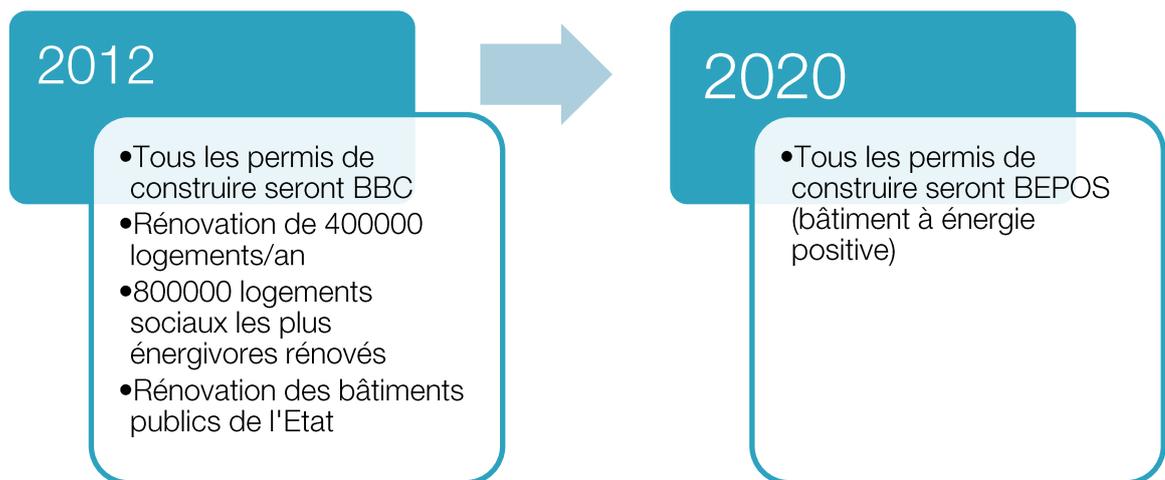


Figure 3 : Le plan bâtiment Grenelle

La politique du plan bâtiment grenelle a deux stratégies pour améliorer l'efficacité énergétiques du parc de bâtiments français : l'incitation aux travaux de rénovation grâce à des dispositifs tels que l'éco-prêt à taux zéro ou les crédits d'impôts verts, ou l'obligation de mieux construire et réhabiliter grâce à de nouvelles réglementations. C'est ainsi que la réglementation thermique a évolué, créant une rupture avec les réglementations précédente.

Le Grenelle de l'environnement est une vraie révolution en France qui a notamment permis une réelle prise de conscience de la nécessité d'un développement durable grâce à une de fortes campagnes de sensibilisation de la population.

1.1.3.2 L'évolution des réglementations thermiques françaises

La première réglementation thermique date de 1974 (RT 1974). Elle ne s'appliquait qu'aux bâtiments neufs d'habitation. La réglementation suivante, la RT1988 s'appliquait aux bâtiments neufs résidentiels et non résidentiels. La réglementation RT 2000 fixe une réduction de la consommation maximale de 20% par rapport à la RT précédente pour les bâtiments neufs résidentiels et de 40% pour le tertiaire. Viendra ensuite la RT2005 qui demandera une amélioration de 15% de la performance thermique par rapport à la RT2000.

La RT2005 fixe des performances énergétiques minimales du bâtiment, sans fixer les moyens techniques pour les atteindre. Ces performances minimales correspondent à celles d'un bâtiment de référence dont les caractéristiques sont imposées en fonction de la zone climatique et de la zone d'exposition au bruit. Cependant, la réglementation autorise les performances inférieures à la référence tant que celles-ci restent dans la limite des valeurs garde-fous, et sous réserve de compenser dans d'autres domaines (Figure 5).

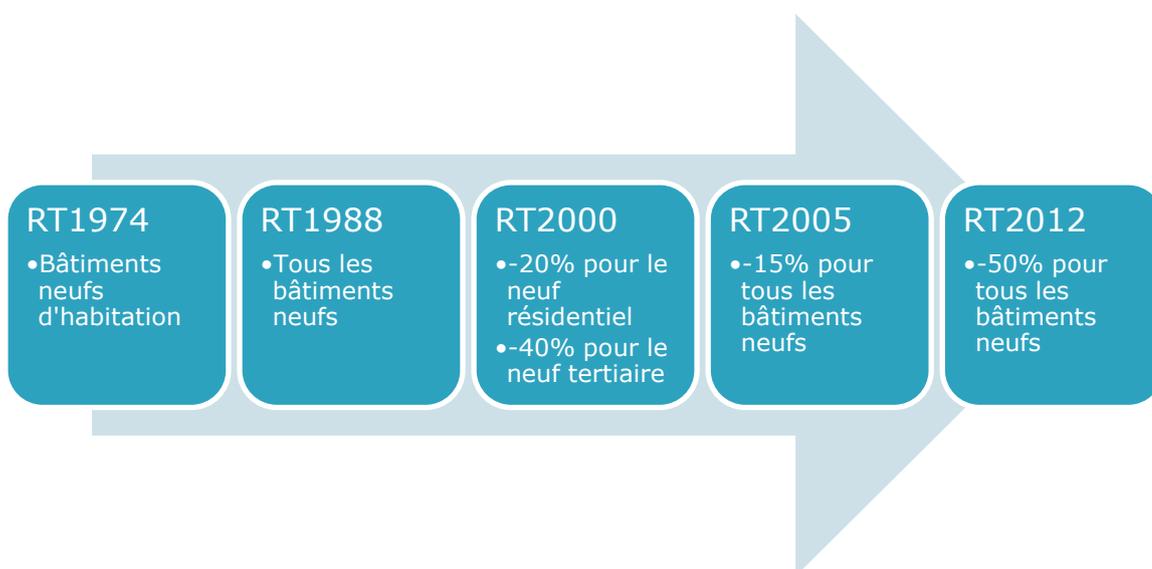


Figure 4 : Schéma d'évolution des réglementations thermiques françaises

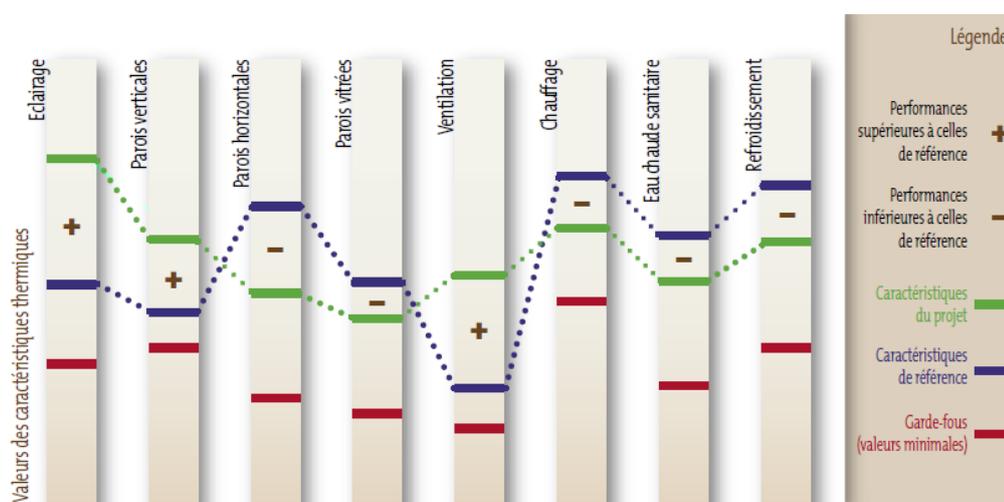


Figure 5 : Illustration de l'application de la RT2005 (Source FFB²)

² FFB : Fédération Française du Bâtiment

Les consommations s'expriment en kilowattheure d'énergie primaire. L'énergie primaire est l'énergie dans la nature avant toute transformation. L'énergie primaire est rarement utilisable telle quelle. Elle doit subir des transformations (raffinage du pétrole, extraction du charbon,...). Ces transformations utilisent de l'énergie et produisent généralement des gaz à effet de serre. C'est pourquoi des coefficients de conversion standards existent pour convertir l'énergie primaire en énergie finale (ce qui est réellement consommé). Par exemple, l'électricité, à cause des nombreuses pertes d'énergie lors de son transport sur le réseau, est créditée d'un coefficient de 2.58 : Il faut produire 2.58kWh pour pouvoir consommer 1kWh dans son bâtiment. A l'inverse, les coefficients pour les énergies renouvelables sont inférieurs à 1 avec par exemple 0.387 pour le photovoltaïque. Ces kilowattheures d'énergie primaire (KWhEP) sont ensuite rapportés à la surface du bâtiment afin d'évaluer la consommation annuelle du bâtiment par mètre carré. L'unité utilisée est ainsi le kWhEP/m²/an.

Avec la RT2005, selon les zones et le type de chauffage utilisé, le bâtiment pouvait consommer entre 80 et 250 kWhEP/m²/an (à comparer avec la moyenne française du parc existant qui est de 240 kWhEP/m²/an (Apparu B., 2010)).

Cinq labels sont associés à la RT2005 :

HPE 2005 (Haute Performance Energétique)	Ref-10%	Consommation conventionnelle d'énergie primaire inférieure de 10% à la consommation de référence	Ce label est aujourd'hui dépassé car ne respectant pas la RT2012
THPE 2005 (Très Haute Performance Energétique)	Ref-20%	Consommation conventionnelle d'énergie primaire inférieure de 20% à la consommation de référence	Ce label est aujourd'hui dépassé car ne respectant pas la RT2012
HPE EnR 2005	Ref-10% et EnR	Consommation conventionnelle d'énergie primaire inférieure de 10% à la consommation de référence ainsi que plus de 50% de la consommation de chauffage assurée par un générateur biomasse ou l'alimentation par un réseau de chaleur utilisant plus de 60% d'énergies renouvelables.	Ce label est aujourd'hui dépassé car ne respectant pas la RT2012 mais avait le mérite d'imposer des énergies renouvelables.
THPE EnR 2005	Ref-30% et Enr	Consommation conventionnelle d'énergie primaire inférieure de 30% à la consommation de référence et recours aux énergies renouvelables pour la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage ou la production d'électricité.	Ce label est aujourd'hui dépassé car ne respectant pas la RT2012 mais il était déjà ambitieux au moment de la RT2005.
BBC 2005 (Bâtiment Basse Consommation)	Ref-50% pour le tertiaire 50kWhEP/m ² /an en moyenne pour les logements	Logements neufs consommant au maximum 50kWhEP/m ² /an à moduler selon les zones climatiques et l'altitude. Bâtiments tertiaires dont la consommation conventionnelle d'énergie primaire inférieure de 50% à la consommation de référence	Ce label a inspiré la RT2012.

Tableau 1 : Les cinq labels associés à la RT2005 (Source FFB)

1.1.4 Le Bâtiment Basse Consommation

Un bâtiment Basse consommation répond à une norme officielle française créée par l'arrêté du 3 mai 2007. La norme fixe une consommation maximale du bâtiment de 50kWh/m²/an, corrigée par un facteur dépendant de la région. Ces facteurs sont donnés sur la carte Figure 6.

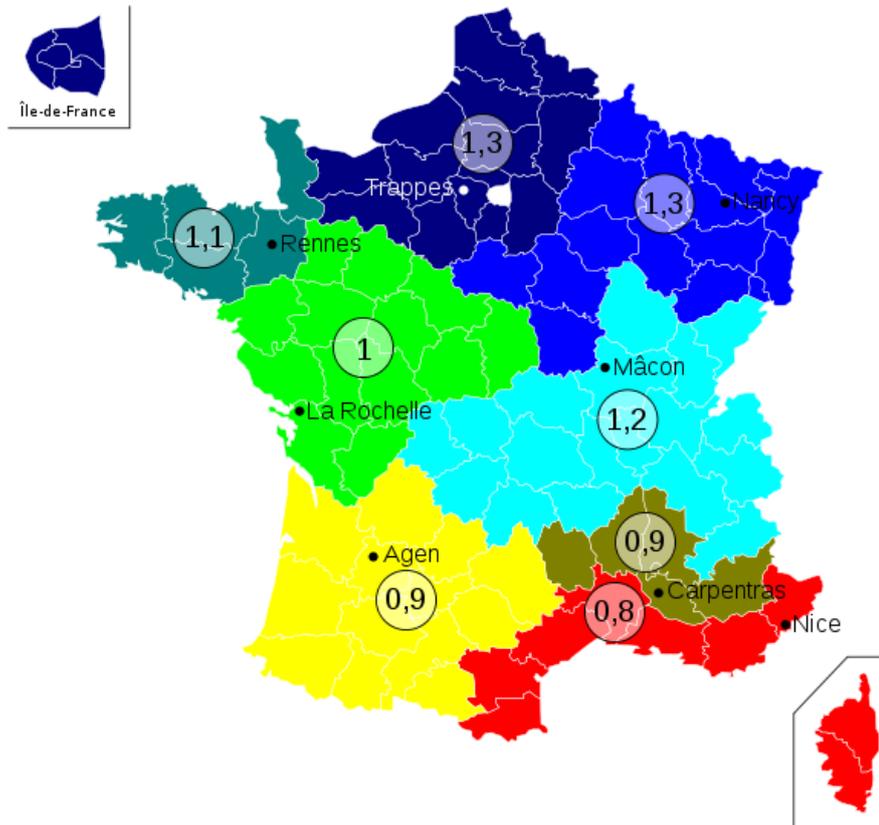


Figure 6 : Carte des coefficients de rigueur climatiques pour le label BBC

Les coefficients sont augmentés de 0.1 si l'altitude du bâtiment est comprise entre 400 et 800 mètres, et de 0.2 si elle est supérieure à 800 mètres.

Les consommations prises en compte sont le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS), la climatisation, l'éclairage et la ventilation. La surface prise en compte est la surface hors œuvre nette (SHON³). Ces consommations ne sont donc pas représentatives des consommations réelles du bâtiment : les consommations propres à ses utilisateurs, telles que les appareils électroménagers ou informatiques n'apparaissent pas. Et elles ne sont pourtant pas négligeables. Si ceci peut fausser les attentes que l'on pourrait avoir vis-à-vis des consommations du bâtiment, ignorer ces consommations dans la réglementation permet de comparer véritablement deux bâtiments, sans tenir compte de l'aménagement futur de son utilisateur (ce qui peut être difficile à déterminer).

³ La surface hors œuvre nette ou SHON était utilisée en droit de l'urbanisme français jusqu'au 1er mars 2012. Elle est maintenant remplacée par la « surface de plancher ».

1.1.5 La Réglementation Thermique 2012 (RT2012)

La RT2012 crée une rupture avec les réglementations précédentes (Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, 27 octobre 2010). En effet, elle ne se base plus sur un bâtiment de référence mais impose une consommation maximale fixe, modulée selon la zone géographique et l'altitude. Cette consommation est équivalente au niveau BBC de la RT2005, c'est-à-dire 50kWhEP/m²/an.

De plus, afin de limiter la possibilité de compenser une conception non optimale par la mise en place d'importants moyens de production d'énergie, solution peu écologique en réalité, la RT2012 introduit un nouveau coefficient : le B_{bio} .

Ce coefficient est défini comme suit :

$$B_{bio} = 2(B_{ch} + B_{fr}) + 5B_{ecl} \quad (1.1)$$

Avec :

- B_{ch} , les besoins nets conventionnels de chauffage, en kWh/m²
- B_{fr} , les besoins nets conventionnels de refroidissement, en kWh/m²
- B_{ecl} , les besoins nets conventionnels d'éclairage, en kWh/m²

Le coefficient est comparé à une valeur maximale à respecter. Il impose ainsi de diminuer dès la conception les besoins de chauffage et de refroidissement et surtout d'éclairage, privilégiant ainsi les apports naturels de chaleur solaire, l'éclairage naturel et les protections solaires. Ainsi, à titre d'exemple, placer des ouvertures au sud permettra de diminuer le besoin en éclairage tout en limitant le besoin de chauffage. A l'inverse, placer ces mêmes ouvertures au nord augmentera les besoins de chauffage puisqu'il y aura moins d'apports solaires au nord qu'au sud. Le B_{bio} sera donc plus élevé dans ce cas.

1.1.6 Le Plan climat régional du Nord-Pas-de-Calais

En plus des engagements pris au niveau national, le Grenelle de l'environnement a permis aux régions d'élaborer un Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE) incluant un bilan des consommations énergétiques, des productions de gaz à effet de serre et de la qualité de l'air. Le SRCAE fixe également des objectifs à atteindre pour 2020 compatibles avec les engagements du Facteur 4. Chaque schéma comprendra aussi une analyse de la vulnérabilité, et un volet adaptation au changement climatique.

Le Nord-Pas-de-Calais a émis 44 millions de tonnes de CO₂ en 2008, soit un ratio par habitant 8% supérieur à la moyenne des émissions nationales. De plus, la région est potentiellement menacée par les impacts du changement climatique, notamment sur sa partie littorale déjà sujette à une érosion intense. D'où l'ambition pour la région de se démarquer en matière de lutte contre le changement climatique.

La répartition des émissions dans la région est assez atypique. Sur la Figure 7, la répartition des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité du Nord-Pas-de-Calais sont données. La principale source d'émission de gaz à effets de serre dans le Nord-Pas-de-Calais est le secteur industriel qui représentait à lui la moitié des émissions de la région, alors que ce secteur ne représente que 20% des émissions à l'échelle nationale. Ceci s'explique par la forte industrialisation de la région.

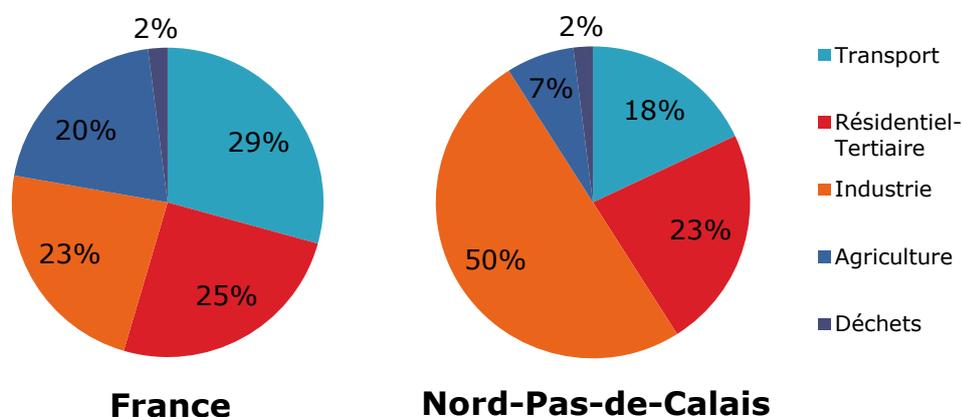


Figure 7 : Répartition des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité en France et dans le Nord-Pas-de-Calais en 2008 (Source : Norclimat - CITEPA)

En revanche, si le secteur industriel est le plus émissif dans la région, ses émissions ont été réduites de 6% entre 1990 et 2005, alors que des secteurs comme les transports ou le bâtiment ont vu leurs émissions augmenter respectivement de 27 et de 15% (Figure 8). L'augmentation dans le secteur des transports s'explique par la position « au carrefour de l'Europe » qu'occupe la région. En effet, Avec trois grands ports littoraux et plusieurs ports fluviaux, le tunnel sous la manche et un réseau routier parmi les plus denses du monde, la logistique des transports tient dans cette région une grande place. Concernant le bâtiment, l'habitat dans la région est un peu plus anciens que la moyenne française (en 2005, 57 % de l'habitat date d'avant 1967 contre 49 % en France et 68 % d'avant 1975) et sont donc moins bien isolés thermiquement.

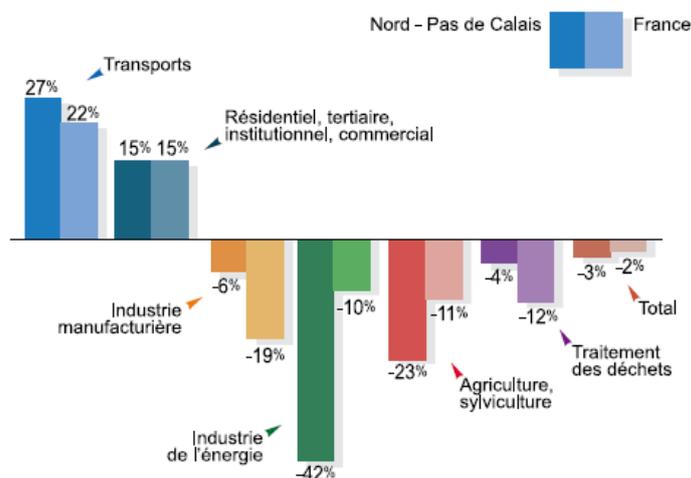


Figure 8 : Taux d'évolution des émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité dans le Nord-Pas-de-Calais et en France entre 1990 et 2005 (Source : Norclimat - CITEPA)

Les principales orientations proposées sont :

Orientations	Exemple d'objectif à l'horizon 2020
Achever la réhabilitation thermique des logements antérieurs à 1975 d'ici 2030	Réhabilitation de 60000 logements par an en moyenne
Densifier les centralités urbaines bien desservies par les transports en commun	Construire 20000 logements et 450000m² de locaux tertiaires dans les aires d'accessibilité aux gares
Amplifier le développement de l'efficacité énergétique et la maîtrise des rejets atmosphériques par les industries	Réduire de 40% les consommations d'énergies pour les usages transverses. Economiser 25% d'énergie à partir d'une amélioration des procédés
Réduire les apports minéraux azotés en lien avec les évolutions des pratiques agricoles	Réduire de 15% la totalité des apports azotés
Réduire les émissions de polluants atmosphériques générées par les véhicules motorisés en milieu urbain	Réaliser des expérimentations de zones d'action prioritaire pour la qualité de l'air ou de zones sans voiture dans les agglomérations
Encourager l'usage des véhicules les moins émetteurs de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques	Réduire de 15% les émissions en moyenne du parc roulant régional
Poursuivre et diffuser les démarches d'amélioration de l'efficacité énergétique et de sobriété carbone engagées par les transporteurs routiers	Améliorer de 15% le taux de charge des camions et réduire de 18% la consommation unitaire des véhicules utilisés
Favoriser les alternatives au transport routier en développant les capacités de multimodalités et les chaînes multimodales	Accroître la part modale du fret ferroviaire et fluvial pour qu'il atteigne 30% des parts modales totales
Freiner l'étalement urbain en favorisant l'aménagement de la ville sur elle-même	Limiter à 500ha/an l'extension de l'artificialisation des sols
Favoriser l'indépendance aux énergies fossiles	Réorienter les taux d'équipement des ménages et locaux tertiaires vers des modes de chauffage sobres en carbone
Atteindre les objectifs les plus ambitieux inscrits dans le schéma régional éolien	Atteindre 1346 MW de puissance installée sur le territoire régional
Favoriser le développement local des réseaux de chaleur et de froid privilégiant les énergies renouvelables et de récupération	Connecter 85 000 logements supplémentaires
Consommer mieux et moins grâce à des modes de consommation et de production repensés	Diminuer de 20% la part de l'impact carbone des ménages liés à l'alimentation
Elaborer et mettre en œuvre des stratégies d'aménagement et de gestion foncière adaptées à l'importance du risque de submersion marine	Réalisation d'études de caractérisation des aléas et prise en compte effective dans les documents de planification et stratégies d'aménagement

Tableau 2 : Principales orientations présentées dans SRCAE de la région Nord-Pas-de-Calais

1.2 L'isolation thermique des bâtiments : enjeux, solutions et techniques

1.2.1 La bonne conception d'un bâtiment pour économiser l'énergie

Pour atteindre les performances exigées par la nouvelle réglementation RT2012 ou par l'ancien label BBC, le bâtiment doit être particulièrement bien conçu. Il y a un certain nombre de facteurs clés, plus ou moins prioritaires à prendre en compte. La Figure 9 nous présente ces facteurs.

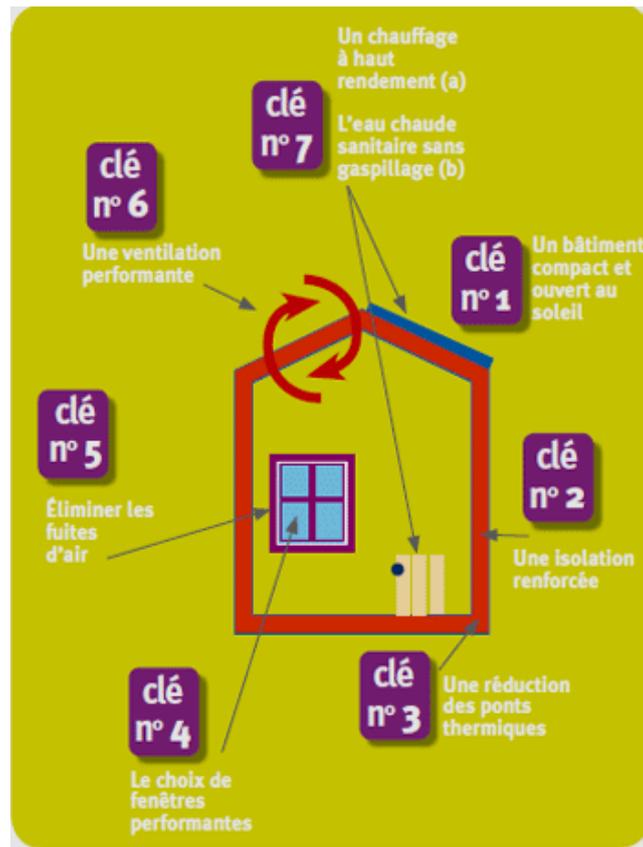


Figure 9 : Facteurs clés pour la conception d'un bâtiment BBC (source : Région Alsace)

Clé n°1 : Le bâtiment doit être compact et ouvert au soleil. En effet, en concevant dès le départ le bâtiment intelligemment, il est facile d'économiser de l'énergie, sans avoir d'importants surcouts. Il suffit de bien orienter le bâtiment, de placer suffisamment d'ouvertures pour avoir accès à l'éclairage naturel, de placer ces ouvertures aux bons endroits pour limiter les apports de chaleur solaire...

Clé n°2 : Une isolation renforcée. Pour limiter les pertes thermiques, il est indispensable de bien isoler le bâtiment. Pour cela, il faut une épaisseur d'isolant conséquente, et surtout isoler absolument partout.

Clé n°3 : Une réduction des ponts thermiques. Il arrive qu'il y ait des ruptures de continuité dans l'isolation du bâtiment. C'est ce que l'on appelle un pont thermique. Ces ponts thermiques permettent alors d'importantes « fuites » de chaleur. Ces pertes peuvent représenter jusqu'à 15% des pertes de chaleur du bâtiment. Il est donc important d'éliminer ces pertes.

Clé n°4 : Le choix de fenêtres performantes. Les pertes thermiques se font également au niveau des vitrages. En effet, le verre est un très mauvais isolant thermique. Pour cela, il faut privilégier les doubles ou triples vitrages qui, de par leur épaisseur plus importantes et le gaz qu'ils emprisonnent limitent les pertes thermiques et garantissent en plus une bien meilleure isolation phonique.

Clé n°5 : Eliminer les fuites d'air. Une parfaite étanchéité à l'air de l'enveloppe et des réseaux est indispensable. En effet, cela limite les fuites de chaleur par les pertes d'air et permet une meilleure pérennité du bâtiment. Des débits de fuites maximaux sont fixés par la réglementation RT2012, et un essai spécifique, le « blower door » ou la « porte soufflante » permet de mesurer ces débits.

Clé n°6 : Une ventilation performante. Quand un bâtiment est bien isolé et bien étanche, il est important d'avoir une bonne ventilation pour assurer un renouvellement d'air à l'intérieur du bâtiment. Cette ventilation est source de pertes thermiques. Mais des systèmes comme la ventilation double flux permettent de limiter fortement ces pertes de chaleur.

Clé n°7 : Un chauffage à haut rendement et une eau sanitaire sans gaspillage. C'est seulement après avoir bien conçu le bâtiment, l'enveloppe et choisi la ventilation qu'il faut déterminer le moyen de chauffage à utiliser. En effet, quand le bâtiment est bien conçu, ces besoins sont alors minimes. Plusieurs solutions sont possibles : gaz, bois, géothermie, pompe à chaleur...

On s'aperçoit qu'une fois que l'architecture du bâtiment est définie (clé n°1), les facteurs les plus importants sont l'isolation thermique et la suppression des ponts thermiques. En rénovation, il est plus difficile de jouer sur le facteur n°1, puisque le bâtiment est déjà construit. Les premiers travaux à faire sont donc de refaire l'isolation de ces bâtiments.

1.2.2 L'isolation thermique : fonctionnement, solutions et contraintes

1.2.2.1 Présentation des matériaux d'isolations

De nombreux progrès ont été réalisés sur le marché des isolants thermiques. Trois facteurs peuvent être mentionnés :

- l'amélioration des technologies de fabrication (augmentation de la productivité et diminution des coûts).
- l'approfondissement des connaissances des bases physiques du fonctionnement des isolants.
- La mise en place d'un système de contrôle de qualité pour garantir les performances des produits (normes sur les propriétés et sur les méthodes de mesures et organisation de procédures de contrôle et de certification).

Un isolant est composé de deux phases dispersées : la matrice solide (formée par le matériau utilisé) et le fluide interstitiel (gaz). Dans la plupart des cas, la matrice solide est composée de fibres ou de mousse, et le fluide interstitiel est l'air. (Langlais C., 2004)

Les isolants peuvent être classés dans diverses catégories (Langlais C., 2004) :

- isolants fibreux

Les principaux représentants sont les laines minérales et les isolants en fibres céramiques. Il existe également des isolants fibreux organiques d'origine naturelle comme les fibres ou laines de bois et la laine animale (mouton) ou manufacturés à partir de matières

plastiques comme les fibres de polyester. Afin d'assurer une résistance mécanique, les fibres sont liées grâce à de faibles quantités de résines synthétiques ou autres types de liants. Ces isolants sont commercialisés sous forme de rouleaux, de panneaux semi-rigides ou de panneaux rigides.

- isolants cellulaires

Ce sont des matériaux poreux à matrice solide consolidée contenant des cellules fermées ou ouvertes ou partiellement ouvertes, contenant de l'air ou un autre gaz ayant servi à l'expansion du matériau initial. Les plus répandus sont le béton cellulaire et le verre cellulaire. Les isolants cellulaires organiques sont représentés par une grande diversité de matériaux plastiques alvéolaires et de mousse à base de produits carbonés : le polystyrène expansé et extrudé, le polyuréthane, le polychlorure de vinyle, la mousse phénolique et les mousses souples d'élastomère. Ces isolants sont commercialisés sous forme de panneaux semi-rigides ou rigides, plaques, blocs, coquilles et plus rarement sous forme de rouleaux. Certaines mousses sont également projetées in situ.

- isolants pulvérulents⁴, nodulaires ou granulaires

Ils sont présentés en général en vrac, transportés en sac et injectés in situ manuellement ou à l'aide d'équipements pneumatiques. Les matériaux d'origine minérale de ce type sont la perlite et la vermiculite. Ceux d'origine organique sont les granulats de liège, les copeaux de mousse rigide de polychlorure de vinyle, les fibres de cellulose ou des perles expansés à partir de granules de polystyrène.

- superisolants

Ce sont des matériaux manufacturés, microporeux de type cellulaire, comme des plaques d'aérogel de silice, ou pulvérulents, comme les poudres d'aérogel ou les poudres ultrafines de silice.

Quelques exemples d'isolants (Vincent-Fourrier M., 2006) (Wignacourt A., novembre 2006) :

- Matériaux d'isolation classiques

- La laine de verre (LDV)

La laine de verre est produite à partir de silice, ressource minérale disponible en grande quantité. De ce fait, cet isolant n'est pas très couteux, avec d'assez bonnes conductivités thermiques (de l'ordre de 0.035 W/mK).

Cependant, l'énergie grise pour le produire est très importante, le matériau n'est pas dégradable et le process de fabrication du liant entraîne des émissions de chlorides, fluorides, particules, COV (Composés Organiques Volatiles) et solvants. Sa mise en œuvre doit être faite avec précaution car le matériau est irritant. Le matériau résiste à la putréfaction mais se tasse progressivement avec le temps, perd ses performances si soumis à de l'humidité et n'a aucune résistance structurelle.

De plus, il est suspecté d'être cancérigène, même si le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) a changé le classement des laines de roche du groupe 2B ou groupe 3 « ne peut être classé quant à sa cancérogénicité pour l'homme » en 2001. Ceci signifie qu'il n'y a pas de preuves que le produit soit cancérigène mais il n'y a pas non plus de preuves qu'il ne le soit pas.

- La laine de roche (LDR)

La laine de roche est un matériau provenant de la fonte de roches volcaniques (principalement du basalte). Le matériau possède de bonnes performances acoustiques et thermiques et une grande résistance au feu. Il est peu couteux (équivalent à la LDV).

⁴ Pulvérulent : en poudre

Cependant, comme la LDV, il est irritant et des précautions particulières sont à prendre lors de la pose. Il possède également le même classement de la part du CIRC. Par ailleurs, le produit est très difficile à recycler et possède une grande énergie grise.

- Le polystyrène

Le polystyrène se présente sous deux formes de panneaux : le PSE (polystyrène expansé) et le PSX (polystyrène extrudé).

Le PSE est obtenu par polymérisation du styrène en utilisant le pentane comme agent d'expansion. L'émission du i-pentane est importante pendant sa mise en œuvre et elle décroît au fil du temps jusqu'à devenir négligeable.

Le PSX est produit à l'aide de solvants et de gaz d'expansion (CFC, HCFC et HFC). Interdits en 1995 car responsables de la destruction de la couche d'ozone, les CFC (chlorofluorocarbures) ont été remplacés par les HCFC (hydrochlorofluorocarbures) et HFC (hydrofluorocarbures) qui sont de puissants gaz à effet de serre.

En cas d'incendie, les polystyrènes sont responsables de puissants dégagements de monoxydes de carbones et de gaz carboniques.

- Le polyuréthane

Disponible en panneaux ou en mousse projetée, le polyuréthane est constitué de polyol, d'un isocyanate (toluène diisocyanate) et d'un agent d'expansion (HCFC ou CO₂) avec des catalyseurs (amines aliphatiques ou aromatiques)

Le polyuréthane libère d'importantes quantités d'isocyanates au moment de sa mise en œuvre. Irritantes pour la peau, les yeux et les voies respiratoires, ces émissions s'estompent quand le produit durcit. En cas d'incendie, le polyuréthane libère du monoxyde de carbones, de l'isocyanate et surtout de l'acide cyanhydrique qui entraîne céphalées, vertiges, oppressions thoraciques, coma pouvant évoluer vers la mort en quelques minutes.

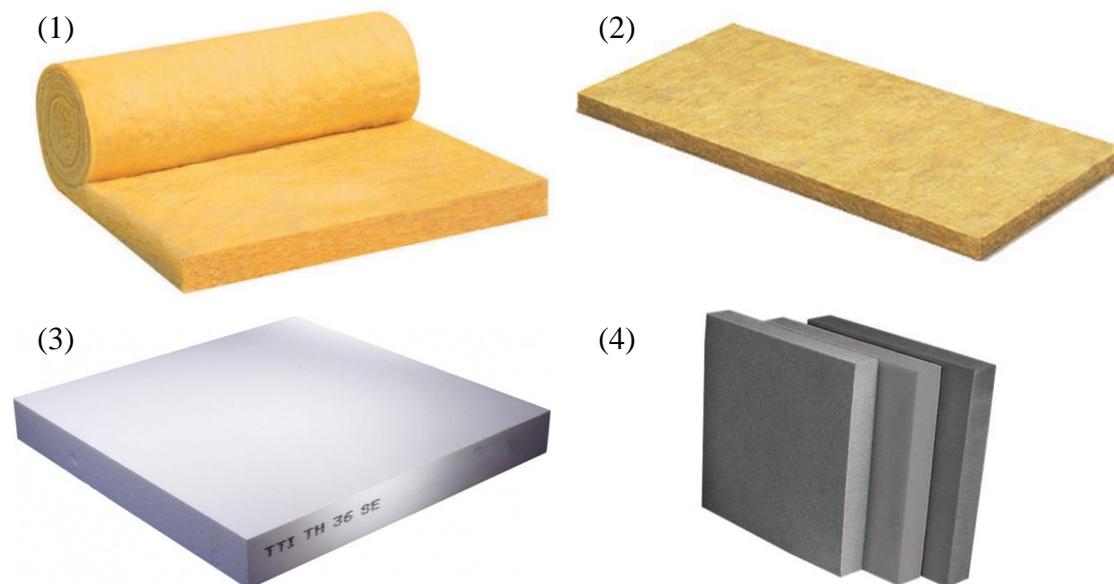


Figure 10 : Photos de différents isolants : (1) Laine de verre, (2) Laine de roche, (3) Polystyrène, (4) Polyuréthane

- Matériaux d'isolation issus de ressources naturelles (Vincent-Fourrier M., 2006) (Wignacourt A., novembre 2006)

- Les panneaux ou laines de fibres de bois

Les isolants en laine ou fibre de bois ont de nombreux avantages au niveau écologique car sont naturels, recyclables, et demandent une faible énergie grise (50kWh/m³). Ils sont sans

danger à l'installation car ne possèdent pas de fibres dangereuses et sont naturellement résistants aux attaques d'insectes.

Cependant ces isolants contiennent parfois des retardateurs de feu chimiques et restent quatre fois plus coûteux que la LDV de base. Il y a une possibilité de dégagement de COV.

Leur durabilité est excellente. Leur conductivité thermique est généralement comprise entre 0.038 et 0.042 W/mK.

- Matériaux d'isolation issus de ressources organiques

- La ouate de cellulose

La ouate est créée à partir du recyclage de papier (journaux ou cartons usagés) et est également recyclable et biodégradable.

Cependant, la ouate contient parfois des additifs retardateurs au feu et des fongicides. Elle contient du borax qui est toxique, surtout en cas de contact avec l'aluminium. Sa durabilité peut être compromise en cas d'humidité. La ouate a peu de résistance structurelle à la compression et risque de se tasser (Vrana T., 2010). Elle est environ deux fois plus chère que la LDV de base. Sa conductivité thermique est généralement comprise entre 0.035 et 0.040 W/mK.

- Les panneaux de Liège

Les panneaux sont recyclables et peuvent contenir du liège recyclé (bouchons...). Ils demandent une faible énergie grise et sont biodégradables. Ils sont sans danger à l'installation car ne possèdent pas de fibres dangereuses et sont naturellement résistants aux attaques d'insectes. De plus, ces panneaux ont une très bonne résistance mécanique.

Cependant, ce type d'isolant n'est pas encore ou très peu produit en France de part les ressources qui sont limitées et son prix est trois fois supérieur à celui de la LDV de base. Sa conductivité thermique est généralement comprise entre 0.038 et 0.045 W/mK.

- Les isolants minces

Les isolants minces envahissent le marché. Ils présentent un grand avantage : celui d'être très fin (quelques centimètres), tout en, selon les fabricants, garantissant les mêmes performances thermiques que la LDV (2cm d'isolant mince correspondrait à 20cm de LDV).

Pour cela, ils utilisent un procédé différent : plutôt que de bloquer la transmission de chaleur par conduction comme le font tous les isolants, ils la bloquent par réflexion grâce à des feuilles d'aluminium. Cependant, leur performance est contestée notamment par le CSTB (Penot F., 2007) et le CSTC (CSTC, 2006) (équivalent en Belgique). D'après eux, les isolants ne peuvent être utilisés qu'avec une lame d'air et ne sont pas à eux seuls suffisants pour assurer l'isolation thermique d'un bâtiment.

De plus, ces isolants nécessitent une énergie grise importante (aluminium, bauxite), ne sont pas biodégradables, sont peu ou pas respirants (risque d'accumulation de vapeur d'eau) et ont un prix trois fois supérieur à la LDV. (Chami N., 19 octobre 2009)

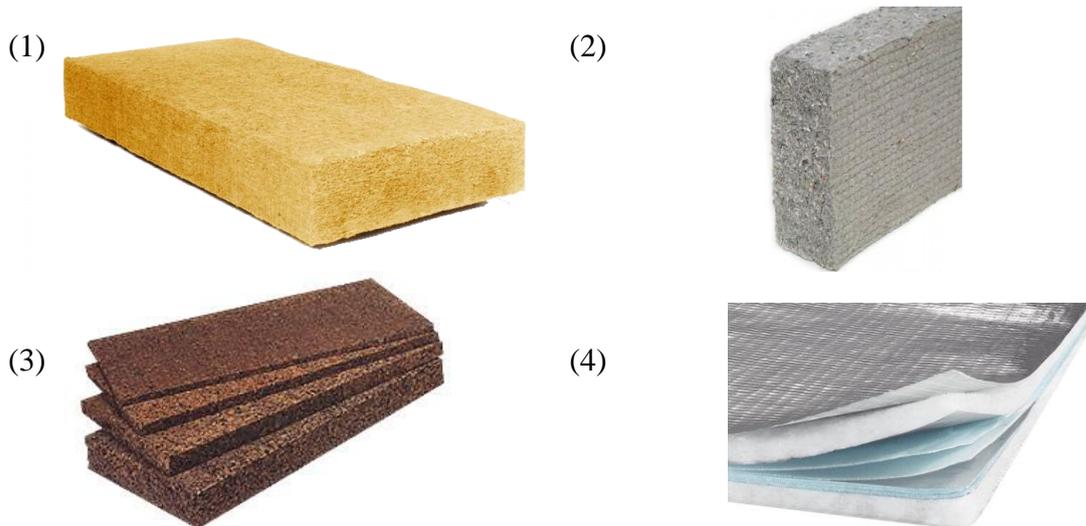


Figure 11 : Photos de différents isolants : (1) Laine de bois, (2) Ouate de cellulose, (3) Liège, (4) Isolant mince

	Fibres Inorganiques		Mousses organiques			Fibres organiques				Mousses inorganiques		Autres		
	Laine de verre	Laine de roche	EPS	XPS	PU	Laine de mouton	Laine de coton	Ouate de cellulose	Fibres de coco	Perlite	Mousse de verre	Mousse de Gypse	Liège	Laine de bois
Performances thermiques	0	0	0	0	+	0	0	0	0	-	0	0	0	-
Résistance à l'humidité	0/+	0/+	0	+	+	0	0	0	0	+	+	0	0	-
Résistance à la pression	-	0/+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-/0	+	+
Résistance à la tension	+	+	0/+	0	0/+	+	+	0	0	0	-/0	0	0/+	-/0
Performances acoustiques	+	+	0	-/0	-/0	+	+	+	0/+	0/+	-/0	0	0	0/+
Réaction au feu	+	+	0	0	-/0	0	0	0	0	+	+	0	0	0
Résistances aux agressions biologiques	+	+	+	+	+	0	0	0	0	+	+	+	0	+
Emissions durant la production	0/-	0/-	+	+	+	0/+	0/+	-/0	0	-/0	+	0/+	+	0/+
coût	+	+	+	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-

Tableau 3 : Comparatifs de quelques isolants du marché (Papadopoulos A.M, 2007)

Il existe ainsi de nombreux isolants qui ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Le Tableau 3 fait un comparatif de certains matériaux isolants.

On constate ainsi la diversité des matériaux et de leurs propriétés. Il est donc nécessaire d'identifier les performances recherchées avant de faire un choix (résistance thermique, acoustiques, au feu...). Ce choix va ainsi dépendre de l'utilisation de l'isolant. Par exemple, un isolant très résistant à la pression sera recherché pour isoler les toitures accessibles. En revanche, ce critère sera moins important dans le cas d'isolants muraux. Le prix est également souvent un facteur de choix déterminant, la plupart du temps au détriment des performances environnementales des produits.

1.2.2.2 Paramètres clés de l'isolation thermique

Il existe trois modes de transferts thermiques (ou transferts de chaleur) (Oliva J-P., 2010) :

- conduction : l'énergie passe par contact d'un corps à l'autre. Les matériaux isolants et épais limitent les transferts par conduction.

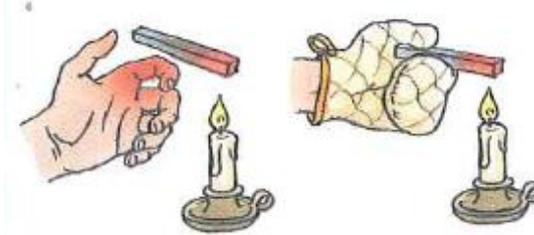


Figure 12 : Illustration du phénomène de conduction (Oliva J-P., 2010)

- convection : lorsqu'un corps se déplace, il emmène de l'énergie avec lui. Ce transfert de chaleur est causé par les fluides. Immobiliser l'air empêche la convection. Des parois étanches à l'air arrêtent le transfert par convection.

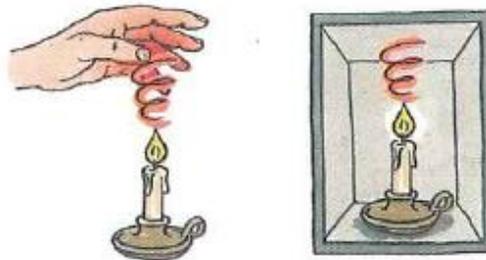


Figure 13 : Illustration du phénomène de convection (Oliva J-P., 2010)

- rayonnement : les corps émettent de la lumière (source de chaleur) en fonction de la température, et en reçoivent. Plus une surface est réfléchissante, plus le rayonnement est dévié.

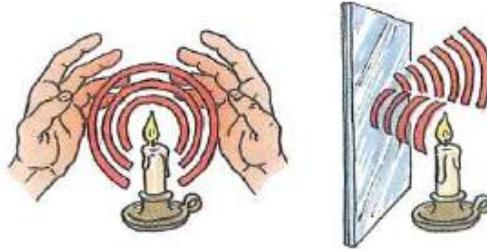


Figure 14 : Illustration du phénomène de rayonnement (Oliva J-P., 2010)

Dans un matériau isolant, il peut être supposé que les mouvements du fluide interstitiel à l'intérieur de la matrice sont faibles (de part la grande densité de l'isolant), et donc que les échanges de chaleur par convection sont négligeables.

De la même manière, une diminution de la porosité diminue les pertes par rayonnement. (Langlais C., 2004)

Les réglementations sur les isolants se limitent donc à étudier les phénomènes de conduction.

La loi fondamentale pour le transfert de chaleur par conduction est la loi de fourrier :

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla}T \quad (1.2)$$

Avec \vec{q} le flux de chaleur, λ la conductivité thermique en W/mK du matériau et $\vec{\nabla}T$ le gradient de température dans ce matériau.

Afin de pouvoir comparer le pouvoir isolant de deux matériaux, la résistance thermique en m².K/W du matériau est définie par :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1.3)$$

Avec e l'épaisseur du matériau.

A l'inverse, pour qualifier les pertes de chaleur d'une paroi, le coefficient de transmission surfacique, en W/m²K, est défini par :

$$U = \frac{1}{R} \quad (1.4)$$

Un matériau isolant doit donc avoir la plus faible conductivité thermique possible. Il s'avère que les conductivités les plus faibles sont celles des gaz (0,024 W/mK pour l'air, 0,017 W/mK pour le dioxyde de carbone, 0,007 W/mK pour le fréon). Cependant, un gaz soumis à un gradient de température est sujet à des phénomènes de convection, ce qui augmente fortement le transfert thermique. Un bon isolant doit donc parvenir à confiner le gaz dans des cellules assez petites pour éviter les phénomènes de convection.

Lorsque l'épaisseur d'isolation nécessaire pour isoler un bâtiment est déterminée, il convient d'abord de déterminer quelle résistance thermique est nécessaire, puis, en fonction de la conductivité thermique du matériau choisi, l'épaisseur d'isolant à poser est déduite.

1.2.2.3 L'isolation par l'intérieur : historique et techniques

En France, dans les années 60, les constructions n'étaient pas isolées. Les habitudes étaient de placer une lame d'air entre le mur porteur et la cloison de doublage, afin d'éviter les problèmes d'humidité (Figure 15). Les murs n'étaient ainsi pas isolés, et les déperditions de chaleur étaient alors importantes. Le prix de l'énergie à l'époque étant très faibles, ceci n'apparaissait pas encore comme problématique.

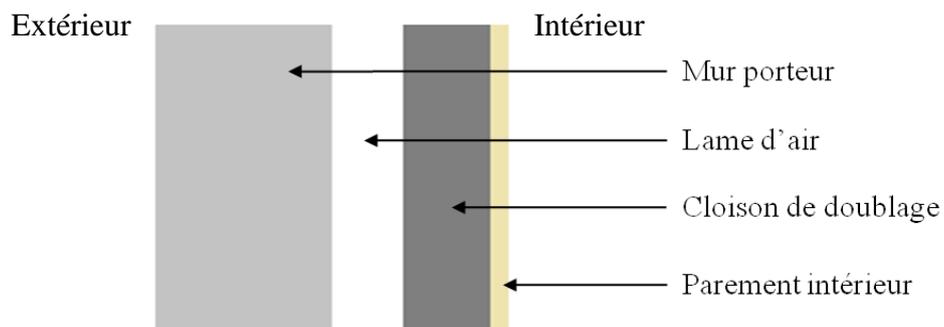


Figure 15 : Schéma représentatif des murs construits en France dans les années 60.

Quand la première réglementation thermique est apparue, en 1975, suite aux chocs pétroliers, la logique a été de placer un isolant pour remplir la lame d'air. Cette solution a ensuite évolué avec l'apparition d'une nouvelle solution constructive : les complexes plâtres et isolant (Figure 16), devenant ainsi la solution française dite du « french cheap wall ».

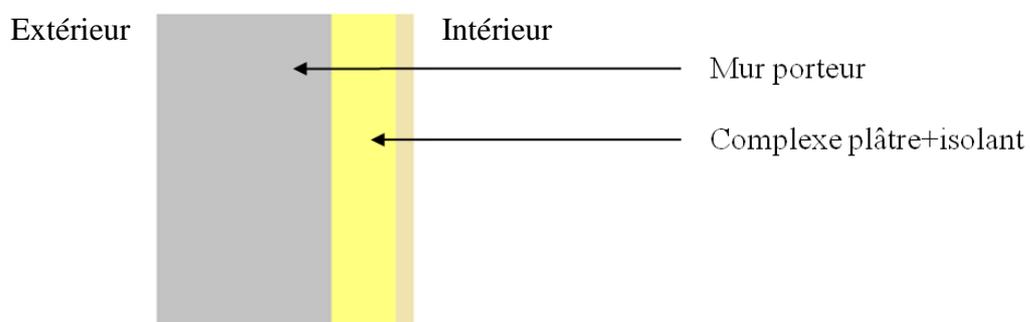


Figure 16 : Schéma représentatif des murs construits en France à partir de 1975

Les deux modes constructifs d'isolation par l'intérieur utilisés aujourd'hui sont donc issus de ces évolutions (Figure 17)

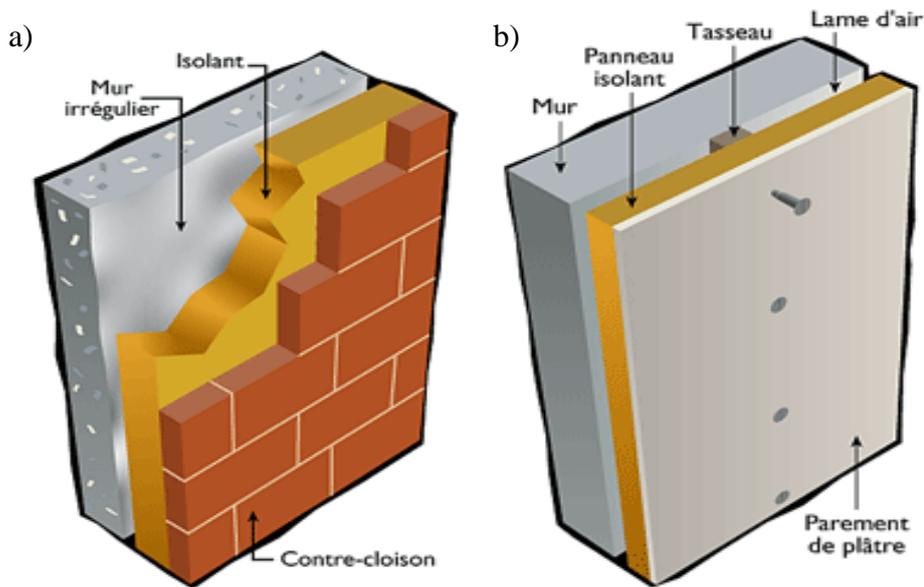


Figure 17 : Systèmes d'isolation par l'intérieur sous contre-cloison (a) et avec complexe isolant+plâtre (b) (Source : ADEME)

C'est pour ces raisons historiques qu'aujourd'hui l'isolation par l'intérieur est la solution privilégiée en France. Pourtant, cette solution n'est pas optimale thermiquement. En effet, le mur porteur isolé par l'intérieur est soumis à d'importants chocs thermiques (il est très froid en hiver et chaud en été) ce qui peut être la cause de dégradations et de fissures. De plus, l'isolation par l'intérieur annule l'effet d'inertie thermique des murs et perturbe l'hydrothermie du bâtiment car maintient le mur porteur froid en hiver tout en l'empêchant de sécher vers l'intérieur.

En France, l'isolation par l'extérieur, pourtant jugée plus performante, n'est encore que très peu utilisée. Il est en effet difficile de changer les habitudes alors que les filières de production sont déjà en place. De plus, les interfaces sont à régler avec les autres corps de métier, notamment au sujet des ouvertures. En outre, un lobby des filières constituées a tendance à agir pour ralentir l'arrivée de nouvelles solutions d'isolation. A cela il faut ajouter, une absence des règles de l'art (DTU) qui rend difficile l'assurabilité de ces solutions, qui doivent forcément faire une demande d'avis technique. Enfin, l'isolation par l'intérieur apparaît comme la solution la moins coûteuse pour améliorer l'isolation d'un bâtiment.

1.2.3 L'isolation par l'extérieur : techniques et avantages

1.2.3.1 Présentation des modes constructifs, synthèse et analyse

L'isolation thermique par l'extérieur est la solution adoptée par nos voisins allemands et par les pays au nord de l'Europe. Elle est conseillée par l'Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie (ADEME).

Il existe plusieurs solutions décrites sur la Figure 18 (Langlais C., 2004) :

- enduit sur isolant : l'isolant est collé sur la façade, puis recouvert d'un enduit armé
- vêtture : système comprenant un isolant et une peau manufacturés. L'ensemble est posé directement sur la façade

- bardage rapporté : l'isolant se place contre la façade en ménageant une lame d'air entre la peau extérieure et l'isolant

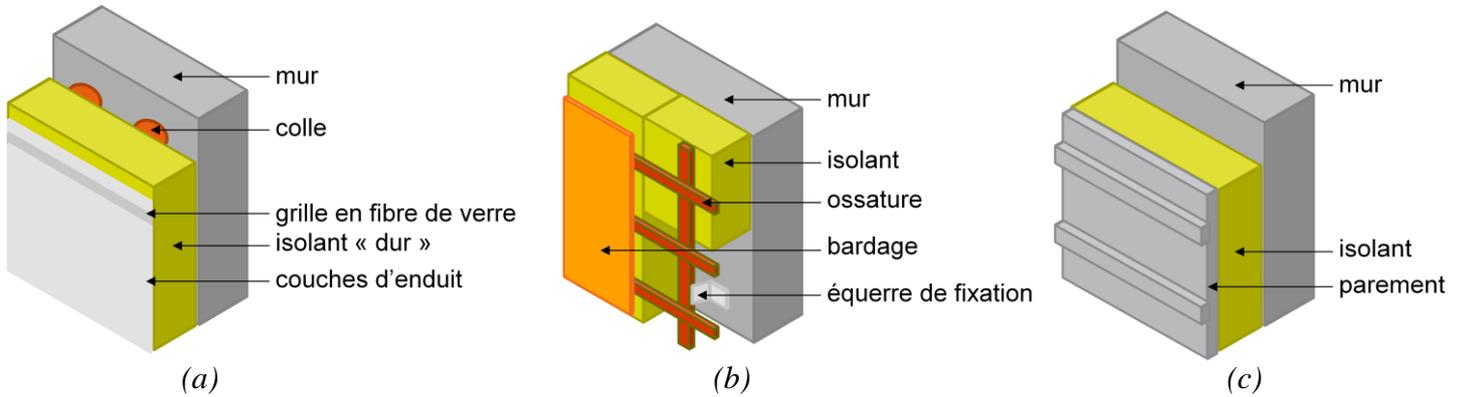


Figure 18 : Solutions d'isolation par l'extérieur avec enduit (a), avec vêtture (b) et sous bardage (c) (Langlais C., 2004)

1.2.3.2 Performance thermique de l'isolation par l'extérieur

L'isolation thermique par l'extérieur est plus performante que celle par l'intérieur. En effet, elle assure la continuité de l'isolation et permet de diminuer ou d'annuler les pertes à travers les ponts thermiques dus à la structure du bâtiment aux liaisons façade-plancher, et ce contrairement à une isolation par l'intérieur. De plus, l'isolation protège le mur porteur des chocs thermiques : celui-ci étant à l'intérieur, il ne subit que peu de variations de température, contrairement à un mur situé à l'extérieur qui subit les variations de températures journalières (Figure 19).

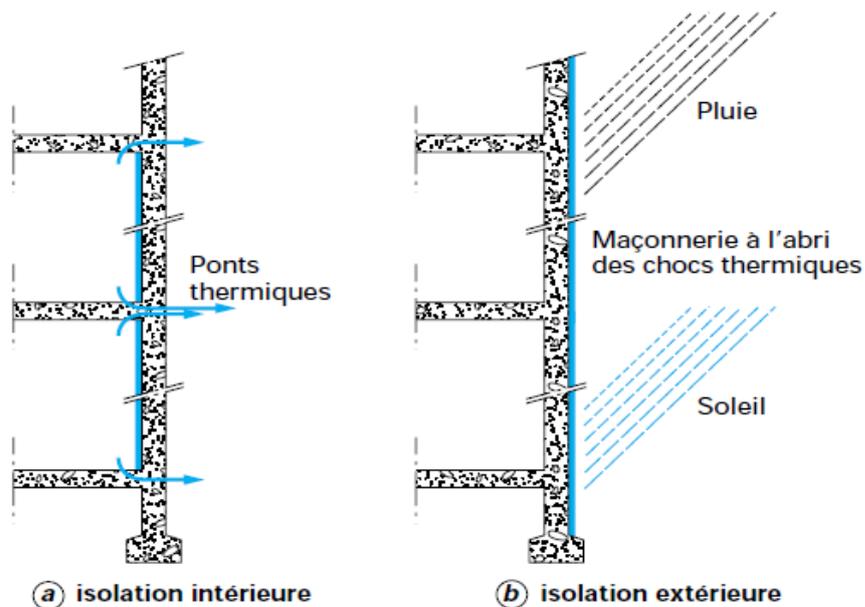


Figure 19 : Comparaison entre isolation par l'intérieur (a) et par l'extérieur (b) au niveau de la dalle (Langlais C., 2004)

L'ensemble des déperditions thermiques ramené à la surface des parois est exprimée par le coefficient de transmission surfacique global de la paroi U_g .

$$U_g = \frac{\sum UA + \sum \psi l}{A} \quad (1.5)$$

Avec :

- U ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) le coefficient de transmission surfacique
- ψ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) le coefficient de transmission linéique
- A (m^2) la surface intérieure
- l (m) la longueur de la liaison

Le terme $\frac{\sum \psi l}{A}$ représente les déperditions linéiques, qui sont importantes dans le cas de l'isolation par l'intérieur (il s'agit des pertes dans les ponts thermiques). L'importance de ce terme est d'autant plus importante en isolation par l'intérieur que l'épaisseur de l'isolant croît.

La Figure 20 trace l'évolution des déperditions thermiques U_g en fonction de l'épaisseur d'isolant pour une isolation par l'intérieur et une isolation par l'extérieur. Pour chaque cas, les pertes surfaciques et linéiques sont explicitées. Dans le cas de l'isolation par l'intérieur, les pertes linéiques sont constantes. Elles sont équivalentes aux pertes surfaciques dans le cas d'une isolation de 9cm. Elles ne sont donc pas négligeables. En isolation par l'extérieur, les pertes linéiques sont faibles comparées aux pertes surfaciques. Ceci s'explique par le fait qu'il n'y a plus de ponts thermiques. Les calculs montrent que U_g est bien plus faible dans le cas d'un mur isolé par l'extérieur que par rapport à un mur isolé par l'intérieur. Ceci est d'autant plus vrai que l'épaisseur de l'isolant est importante. L'isolation par l'extérieur est donc de plus en plus préconisée, au fur et à mesure que les exigences de la réglementation imposent de fortes épaisseurs d'isolant.

On constate ainsi dans cet exemple **qu'une isolation par l'extérieur de 6cm correspond à une isolation par l'intérieur de 15cm.**

A noter tout de même que l'ajout de rupteurs de pont thermique permet de diminuer les pertes de chaleur en isolation par l'intérieur.

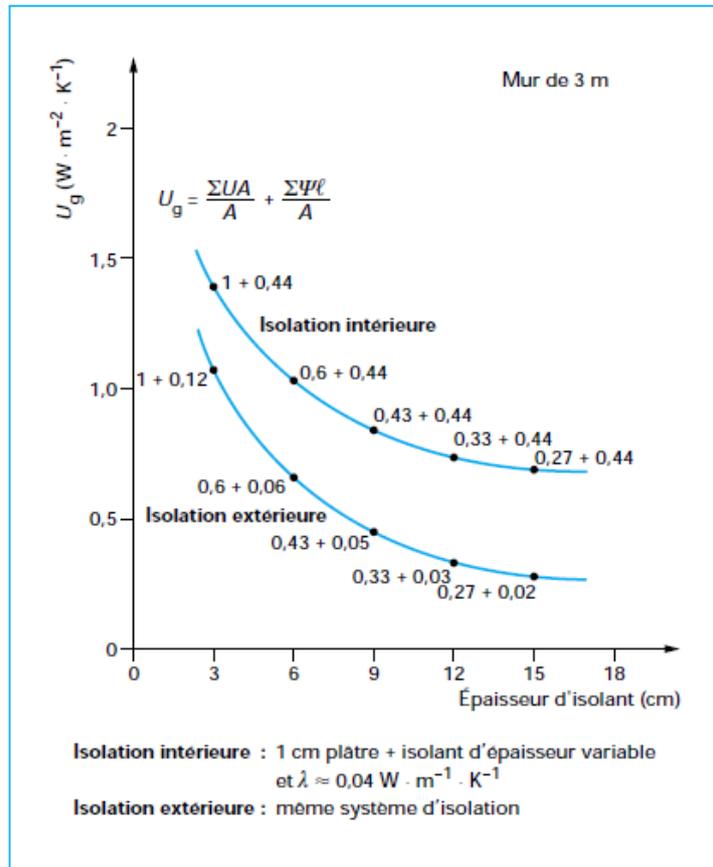


Figure 20 : Variation du coefficient de transmission surfacique global en fonction de l'épaisseur d'isolation (Langlais C., 2004)

1.2.3.3 Influence du type d'isolation sur l'inertie du bâtiment

Les charges d'un bâtiment dépendent de sa stabilité thermique, c'est à dire la capacité de maintenir la température intérieure du bâtiment durant un intervalle de temps, malgré les fluctuations de la température extérieure et tout en ayant de l'énergie fournie de manière constante par les systèmes de chauffage ou de refroidissement du bâtiment. Cette stabilité dépend des réponses dynamiques de tous les composants de l'enveloppe du bâtiment (propriétés des matériaux, quantité de matériaux, position des matériaux dans la structure...) et des températures intérieures et extérieures.

Ce problème peut être modélisé en faisant varier la température sous la forme d'oscillations périodiques. C'est la méthode utilisée par E. Kossecka et J. Kosny dans leur étude réalisée en 2002 (Kossecka E., 2002). Six configurations ont été étudiées à partir de murs de même résistance thermique, composés de la même quantité de béton et d'isolant, mais avec différentes positions de l'isolant par rapport au béton (Figure 21).

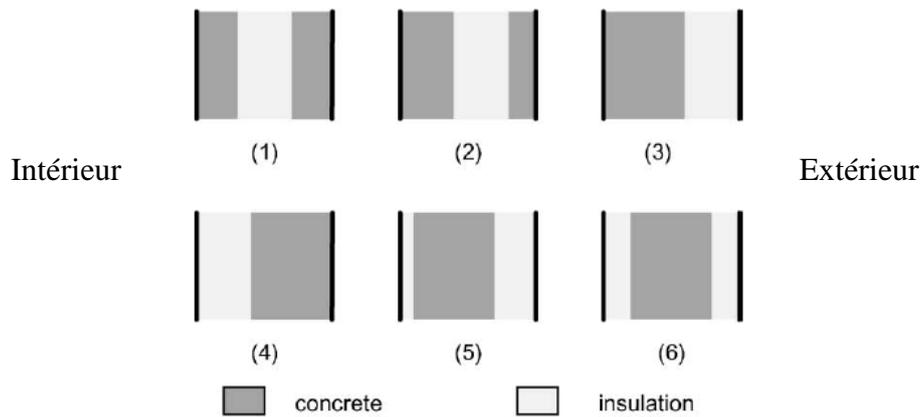


Figure 21 : Différentes configurations testées (Kossecka E., 2002)

Dans cette étude, un bâtiment simple (sous la forme d'une boîte rectangulaire) est considéré, et une température extérieure T_e lui est appliquée. Elle s'écrit sous la forme :

$$T_e = A_{T_e} e^{i\omega t} \quad (1.6)$$

Alors la température intérieure T_i s'écrit :

$$T_i = A_{T_i} e^{i\omega(t+\tau_{T_i})} \quad (1.7)$$

Plus le rapport A_{T_i}/A_{T_e} est faible, plus le système est stable thermiquement. Il peut être constaté dans cette simulation que ce rapport est faible dans les trois premiers cas (isolation au cœur du mur ou à l'extérieur) (Figure 22).

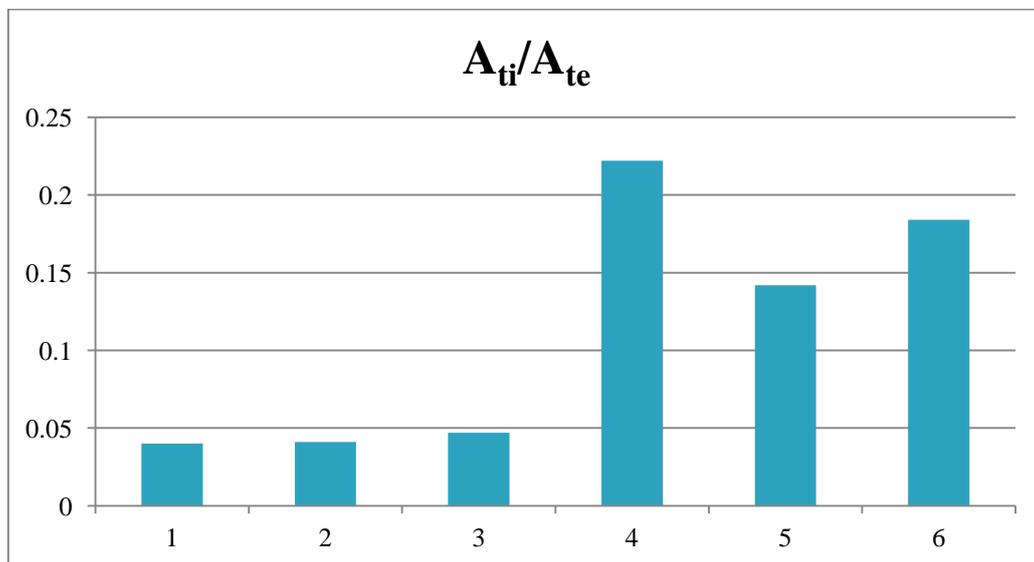


Figure 22 : Ratio des Amplitudes des températures intérieures et extérieures pour chacun des murs étudiés

Il existe ainsi un confort bien plus important dans les trois premiers cas, puisque la température varie peu dans le bâtiment. L'isolation par l'extérieur favorise donc une meilleure

stabilité des températures à l'intérieur du bâtiment et diminue la dépendance de la température intérieure avec les fluctuations de la température extérieure. A l'inverse, placer un isolant à l'intérieur de la structure porteuse diminue l'influence de l'inertie des matériaux porteurs.

Un calcul des consommations annuelles de chauffage et de refroidissement a également été effectué pour un bâtiment d'un étage. La simulation a été faite pour les six murs étudiés, et dans six villes différentes. La Figure 23 montre les différences de consommation entre l'isolation par l'extérieur (mur 3) et l'isolation par l'intérieur (mur 4).

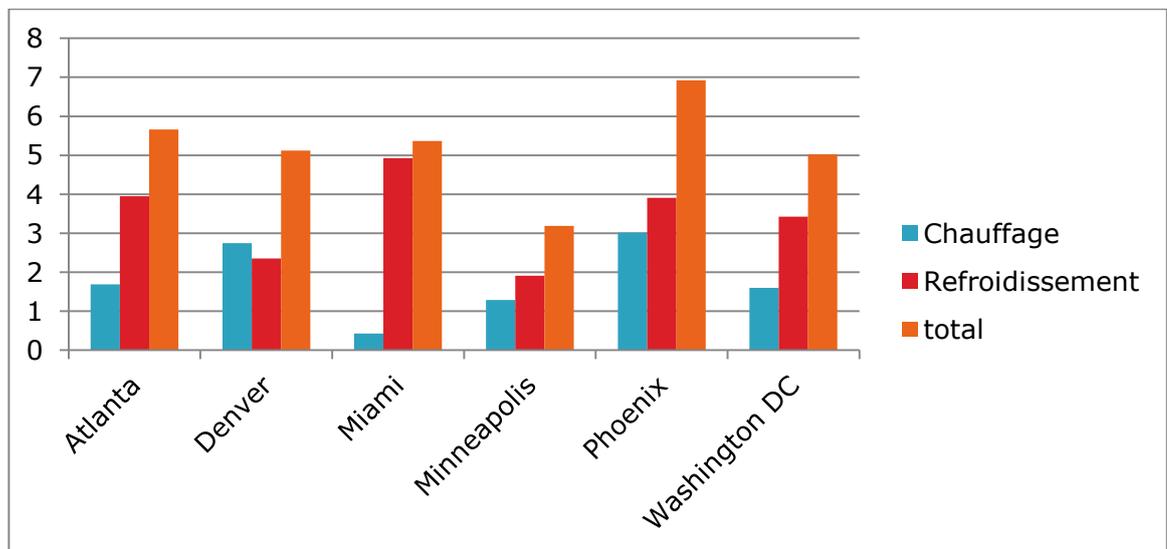


Figure 23 : Consommation avec isolation par l'intérieur (mur 4) moins consommation avec isolation par l'extérieur (mur 3) en kWh/m²/an dans six villes différentes

Les différences de consommations entre les deux configurations sont non négligeables, allant de 5 à 7 kWh/m²/an. Ceci montre bien que l'isolation par l'extérieur, grâce à son inertie, permet de diminuer les consommations d'un bâtiment, par rapport à une même isolation réalisée par l'intérieur, dans les scénarios et les typologies de bâtiment considérés dans cette étude.

1.3 Les Textiles techniques : définition et présentation et liens avec l'industrie du bâtiment

1.3.1 Définition et présentation des textiles techniques

Le terme « textile technique » se définit comme :
 « Tout produit ou matériau textile dont les performances techniques et les propriétés fonctionnelles prévalent sur les caractéristiques esthétiques ou décoratives. » (Carlac'h D., 8 mars 2006)

Les textiles techniques offrent donc des performances techniques particulières : mécaniques, thermiques, électriques... Ils recouvrent une très large gamme allant du produit de base (fils et fibres naturels en coton ou laine) aux fibres à hautes performances (en verre, carbone, aramide...). Ils ont de nombreux usages dans une large palette de secteurs.

La filière textile regroupe un grand nombre d'acteurs, décrits dans le schéma Figure 24.

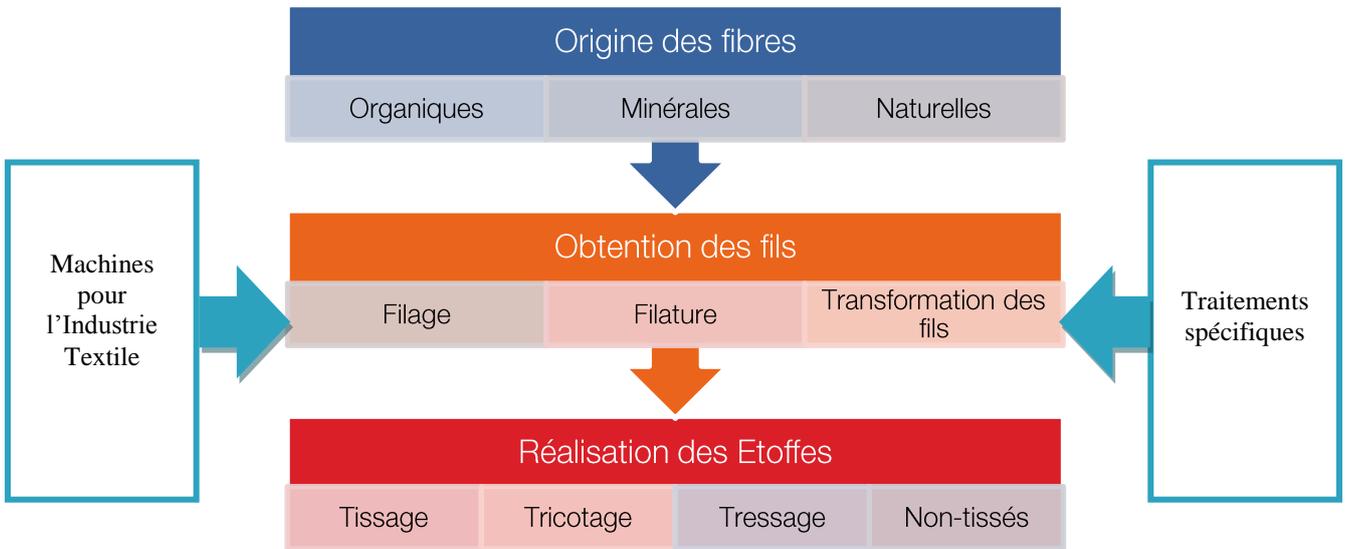


Figure 24 : Schéma de fonctionnement de la filière textile (Carlac'h D., 8 mars 2006)

Les textiles peuvent être tressés, tricotés, tissés ou sous-forme de non-tissés. Ils sont appelés « surfaces textiles » ou « étoffes » quand les fils constitutifs sont dans un plan ou « textiles 3D » lorsque les fils sont placés dans les trois directions de l'espace. (Caramaro L., 2006)

Le tissage classique consiste à croiser à angle droit des fils parallèles (chaîne) et préalablement montés un à un sur un métier à tisser (opération d'ourdissage) avec un ensemble de fils parallèles placés perpendiculairement (trame). Le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame constitue l'armure du tissu. Trois familles d'armures fondamentales sont distinguées (Figure 25).

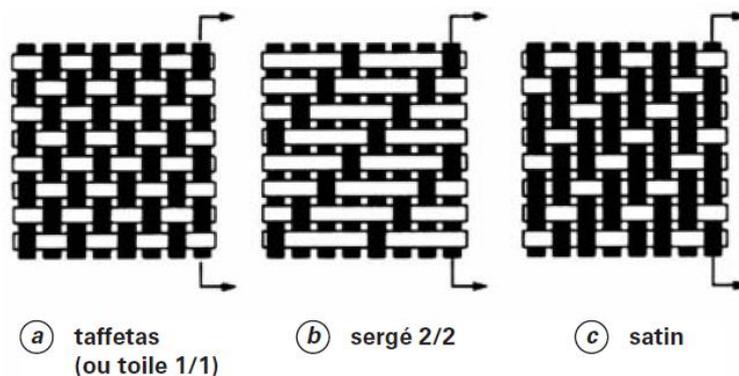


Figure 25 : Différents types d'armures (Caramaro L., 2006)

Le tricotage est l'entrelacement curviligne de fils dont l'élément de base est la maille. Suivant le sens d'alimentation des fils deux types de tricotage sont distingués (Figure 26).

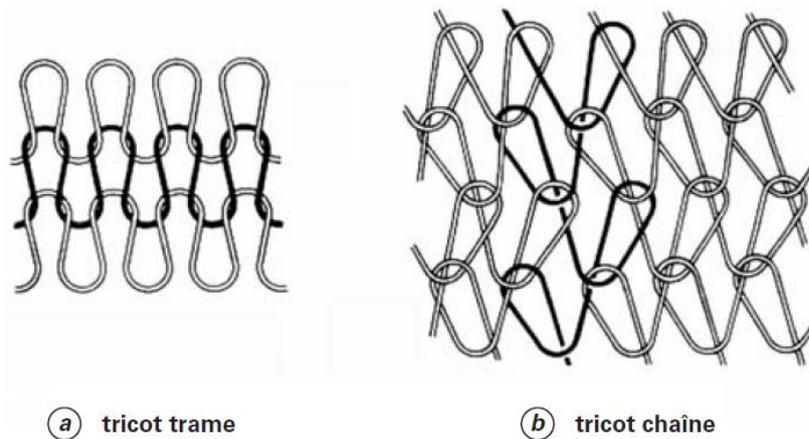


Figure 26 : Différents modes de tricotage (Caramaro L., 2006)

Les non-tissés sont des architectures textiles dont les fibres sont orientées d'une manière quasi aléatoire et isotrope et liées entre elles par différentes techniques de consolidation (chimiques, mécaniques, thermiques). Il existe plusieurs procédés pour produire une nappe de non-tissés :

- procédé voie sèche : les nappes de fibres sont obtenues par cardage/nappage
- procédé voie fondue : les filaments sont extrudés à partir des filières, étirés, puis refroidis par voie pneumatique et réceptionnés sur un tapis mobile avant consolidation
- procédé voie humide : ce procédé dérive de la fabrication de papier
- procédé electrospinning : produit des nappes de filaments nanométriques à partir de solutions diluées de polymères

Les nappes sont ensuite consolidées par plusieurs méthodes :

- liage chimique (par imprégnation, enduction ou pulvérisation)

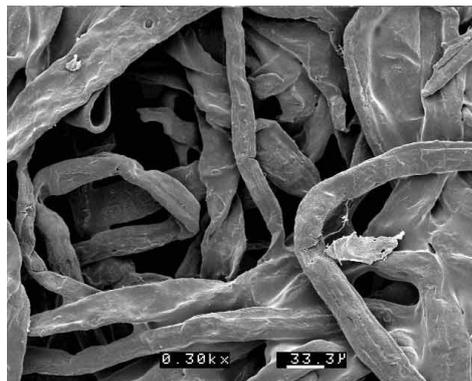


Figure 27 : Image MEB d'un non-tissé consolidé par un liage chimique (Coste G., 2004)

- liage mécanique par aiguilletage ou par jets d'eau

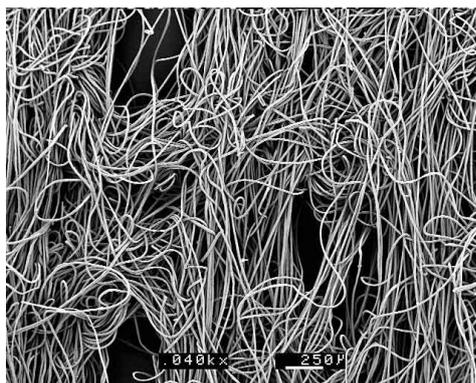


Figure 28 : Image MEB d'un non-tissé consolidé par un liage mécanique (Coste G., 2004)

- liage thermique par chauffage au four ou calandrage (utilisation possible de fibres thermoliantes)

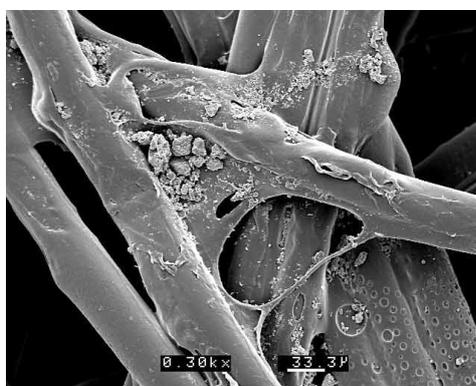


Figure 29 : Image MEB d'un non-tissé consolidé par un liage thermique (Coste G., 2004)

Le tressage désigne l'obtention d'un produit par entrecroisement réciproque des fils disposés en diagonale par rapport au bord du produit. Chaque bobine ou canette portant les fils est placée sur un dispositif appelé fuseau, réalisant le guidage de la bobine et permettant d'assurer le déroulement du fil tout en maintenant une tension quasi constante.

Le fuseau se déplace sur un chemin de guidage sinusoïdal. Un deuxième fuseau circule sur un deuxième circuit, concentrique avec le premier et en opposition de phase. Les sens de rotation des fuseaux sont inversés ce qui permet la réalisation de tresses tubulaires.

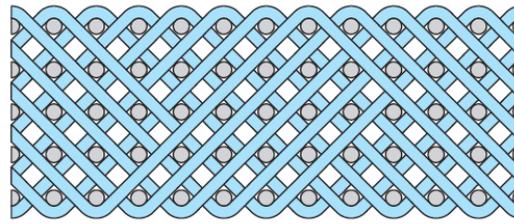
Si une jonction existe entre les deux circuits, les fuseaux tournent alternativement dans un sens puis dans l'autre. Le résultat obtenu est sous la forme de tresses plates.

Le tressage permet de réaliser des pièces de formes particulières en étant réalisé sur un mandrin dont la forme est la même que la pièce que l'on cherche à obtenir.

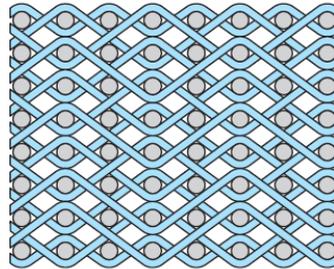
Des technologies 3D ont été développées pour chacune des techniques de fabrication citées précédemment, permettant la réalisation de textiles 3D.

Le tissage peut être soit :

- multicouche : plusieurs nappes parallèles de fils de chaîne sont utilisées.
- orthogonal : compactage des fibres droites (pas d'ondulation des fils de chaîne)
- double paroi : issu de la technique de fabrication des velours



(a) tissu à entrelacement d'angle



(b) tissu à entrelacement multicouche

Figure 30 : Tissus à entrelacement (Caramaro L., 2006)

Le tricotage est réalisé grâce à des techniques multiaxiales.

Le tressage peut être sous forme de :

- tresses carrées ou rectangulaires
- tresses 3D multicouche

Les non-tissés 3D sont composés de plusieurs nappes fibreuses reliées par des ponts de fibres de densité variable, créés par une technique d'aiguilletage.

Les surfaces textiles doivent souvent subir un traitement afin d'avoir les propriétés désirées. Il existe différents traitements :

- Ennoblement : teinture, impression, flocage, apprêts (ignifugeants, hydrophobes, antistatiques...)
- Enduction : consiste à déposer une résine polymérique formulée à la surface du textile afin de le protéger et de lui conférer de nouvelles propriétés
- Complexage ou contrecollage : assemblage de plusieurs couches de textile entre elles
- préimprégnation ou imprégnation

Pour aller plus loin sur le sujet des textiles techniques, il est intéressant de consulter (Caramaro L., 2006) ou encore (Coste G., 2004) pour plus de détails sur la fabrication des non-tissés.

1.3.2 Utilisation des textiles techniques dans le secteur du bâtiment

La construction est un des secteurs les plus dynamiques pour le textile, même si ça n'est pas là que sont vendus les plus gros volumes (Carlac'h D., 8 mars 2006). La raison essentielle est la croissance rapide de l'utilisation de matériaux composites, par exemple les renforts textiles dans les bétons. Le taux de croissance élevé du secteur résulte également dans le remplacement de matériaux traditionnels par des produits textiles.

Les textiles sont de plus en plus utilisés sous forme de membranes pour réaliser des toitures. Par exemple, de nombreux stades de football ont leur toiture réalisée en textile, et presque tous les stades qui vont être construits ou rénovés utilisent du textile.

Les membranes commencent à apparaître également en façade. En France, le Zénith de Strasbourg est un bel exemple d'utilisation du textile en façade. (Gegidanni J-F., 14 décembre 2007)

Les isolants textiles commencent à apparaître sur le marché. Ceux-ci sont intéressants car se posent sans précautions particulières, contrairement à la Laine de verre ou à la Laine de roche qui sont irritantes. Voici quelques exemples d'isolants textiles (Vincent-Fourrier M., 2006) :

- Le Métisse® (LE RELAIS France)

Le Métisse est un isolant produit par l'association Le Relais. L'association qui collecte, tri et revend des vêtements à but social, a créé il y a quelques années, un isolant fait à partir des vêtements qu'ils n'arrivaient pas à revendre. Cet isolant composé à 85% de fibres recyclées et à 15% de polyester affiche une conductivité thermique allant de 0.038 W/mK à 0.046 W/mK.

- Le lin et le chanvre

Ces isolants sont naturels, recyclables, et demandent une faible énergie grise (30 à 40kWh/m³). Ils sont sans danger à l'installation car ne possèdent pas de fibres dangereuses et sont naturellement résistants aux attaques d'insectes.

Cependant ces isolants contiennent parfois des retardateurs de feu chimiques et restent deux à trois fois plus coûteux que la laine de verre de base.

Leur durabilité est excellente comme peuvent témoigner certains bâtiments isolés avec ces matériaux il y a plusieurs décennies et leur conductivité thermique varie entre 0.039 et 0.047 W/mK.

- La laine de coton

Suivant les fabricants, la laine de coton peut venir du coton vierge ou du coton recyclé. Les fibres sont cardées et subissent différents traitements (antifongique, insecticide, ignifugation) avant de recevoir un liant polyester. Malheureusement le coton est bien souvent issu d'une agriculture intensive effectuée au détriment de l'environnement. La laine de coton peut être utilisée en vrac ou en rouleaux.

La laine de coton est essentiellement composée de coton industriel recyclé. Lavée puis effilochée, cette matière première est ignifugée et traitée contre les rongeurs, les insectes et les moisissures. La laine de coton est commercialisée sous forme de panneaux, rouleaux et vrac. Sa conductivité thermique varie de 0.039 W/mK à 0.042 W/mK.

- La laine de mouton

La laine de mouton laisse passer l'humidité et repousse les parasites. Elle a la capacité d'absorber 33% de son poids en eau sans perdre ses qualités isolantes ou mécaniques. Elle possède une légère odeur qui disparaît avec le temps. Elle passe par une première étape de lavage au savon et à la soude avant d'être traitée contre le feu et les insectes. Cardée, elle est ensuite conditionnée en vrac, en écheveaux, en rouleaux ou en panneaux semi-rigides. Son coût est assez élevé, et son énergie grise est moyenne du fait que la laine est souvent importée.

Il est possible de trouver sur le marché des isolants à base de laine de mouton, même si ce type d'isolant est peu répandu. Leur conductivité thermique est de l'ordre de 0.042 W/mK.

- La ouate de polyester

On commence à découvrir sur le marché des isolants faits à base de bouteilles d'eau en plastique recyclées. Ces isolants en polyester sont sains puisqu'ils utilisent la même ouate que celle utilisée couramment dans les couettes, matelas et oreillers, et ce sans aucun ajout de composé chimiques. Ils affichent de très bonnes performances thermiques : la conductivité

peut descendre jusqu'à 0.030W/mK. De plus, ces matériaux n'absorbent pas l'eau, ne se tassent pas en vieillissant, et sont très durables dans le temps puisqu'il s'agit de matière de type plastique.

1.4 Présentation du projet de recherche

1.4.1 Cadre de la recherche

1.4.1.1 Le contexte partenarial entre l'Ecole Centrale de Lille et l'entreprise Norpac

L'Ecole centrale de Lille forme des ingénieurs généralistes. Les étudiants peuvent en dernière année choisir une option leur permettant une première spécialisation technique, ainsi qu'une filière professionnalisante. En particulier, un certain nombre d'élèves suivent des cours de Génie Civil, ou d'Aménagement, Construction et Environnement. Naturellement, les liens entre l'école et l'entreprise Norpac sont importants puisque de part ces spécialités, c'est chaque année entre 5 et 15 étudiants centraliens de Lille qui effectuent leur stage dans l'entreprise. Par ailleurs, un certain nombre de ces stagiaires sont ensuite recrutés par l'entreprise ou par d'autres filiales du groupe Bouygues.

Plusieurs collaborateurs de Norpac interviennent en tant qu'enseignants dans la filière Aménagement Construction Environnement dirigée par le professeur Zoubeir LAFHAJ.

En dehors de ces liens plus classiques, l'Ecole Centrale de Lille et l'entreprise Norpac travaillent en collaboration sur des projets de recherche et innovation depuis des années sur la thématique de la construction durable, dont une grande partie sont portées par Antoine GIBOUR, diplômé 2007 de l'Ecole et collaborateur de Norpac. En effet, de nombreux étudiants de l'école ont réalisé des projets en partenariat avec Norpac. Parmi les projets notables, un projet de deux ans réunissant six étudiants sur le thème du Contrat de Performance Energétique peut être mentionné. D'autres projets ont également porté sur l'analyse des consommations du siège social de l'entreprise, l'étanchéité à l'air des bâtiments, les bureaux du futur, la logistique de chantier... Cette collaboration diversifiée, riche et dynamique est profitable pour les deux partenaires. C'est donc naturellement qu'une thèse CIFRE a été contractée en 2010 entre les deux partenaires sur la conception d'un nouveau système d'isolation thermique par l'extérieur.

1.4.1.2 Présentation des différents partenaires et de leur rôle dans le projet de recherche

La recherche lie deux domaines distincts, le textile et le bâtiment, et a une vocation industrielle. Elle s'effectue donc dans le cadre d'un partenariat entre diverses entités (Figure 31).

L'équipe est composée de quatre industriels, Parmi eux, Norpac, filiale du groupe Bouygues Construction, est rattaché à l'industrie du bâtiment. Les deux autres, PEG et Dickson, sont rattachés au domaine du textile et développeront et fourniront les matières premières. Le dernier industriel, BHD se chargera de travailler sur l'assemblage des différents éléments. A ces compétences industrielles, le laboratoire de recherche de l'Ecole Centrale de Lille apporte ses capacités à effectuer des recherches scientifiques et techniques dans le domaine des matériaux du bâtiment. Enfin, une association d'industriels du textile,

CLUBTEX, donne au groupement tous les contacts nécessaires à l'aboutissement des recherches.

Ces entités sont organisées au sein d'un consortium. Celui-ci a également engagé un bureau d'étude allemand, FormTL, pour l'assister sur la conception des fixations du système.

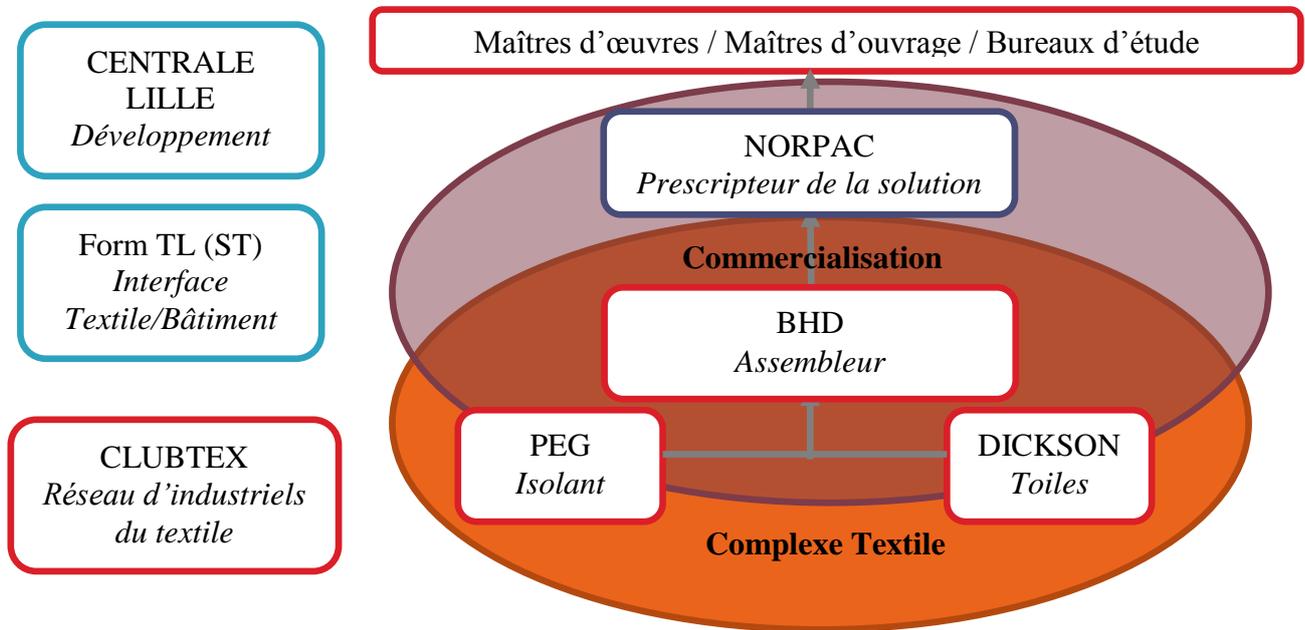


Figure 31 : Les divers acteurs du projet de recherche

1.4.1.3 Financement du Fond Unique Interministériel (FUI)

Le projet de recherche, d'un montant d'environ 3 millions d'euros a été labellisé par le pôle de compétitivité Up-Tex. Cette labellisation a permis au projet de candidater pour un financement du Fond Unique Interministériel (FUI). Ce fond finance les projets collaboratifs des pôles de compétitivité. Ce fond est doté de 495 millions d'euros sur la période 2009-2011 pour financer les projets de R&D. Il existe deux appels à projets par an. Nous avons répondu au 11^{ème} appel à projet pour obtenir un financement de 850k€ euros répartis entre les différents membres du consortium.

Le processus d'obtention du financement dure environ un an et comporte plusieurs étapes. Il débute par une candidature auprès d'un pôle de compétitivité. Cette candidature consiste en un ou plusieurs oraux devant les experts du pôle, puis par le dépôt d'un dossier complet qui contient :

- un dossier descriptif
- un état de l'art
- les accords partenaires signés par tous
- les annexes financières de chacun et la synthèse globale
- une analyse de risque
- la ou les labellisations
- le planning du projet

Après analyse du dossier, les experts se prononcent sur la labellisation du projet. S'il est validé, un dossier est présenté à la DGCIS (Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services). En parallèle, le projet est présenté aux potentiels financeurs. Une fois le projet sélectionné par la DGCIS, il faut déposer un dossier par financeur (chaque partenaire ayant son propre financeur).

1.4.2 Idée générale du projet de recherche

Nous avons vu précédemment que les systèmes d'isolation par l'extérieur sont globalement plus performants que ceux par l'intérieur. Cependant, ils sont longs à mettre en œuvre. La recherche porte donc sur un moyen de simplifier la pose en créant un système tout-en-un, sur mesure, sans découpes ni reprises sur site.

L'idée générale de l'entreprise Norpac est de transposer les techniques d'habillement au bâtiment. En effet, de la même manière que nous mettons un pull lorsqu'il fait froid, le bâtiment pourrait être isolé par l'extérieur à l'aide de matériaux textiles. Ces matériaux, de par leur souplesse et leur légèreté, sont très différents des matériaux durs habituellement utilisés dans le bâtiment. Ces particularités permettront ainsi d'envisager des techniques nouvelles pour la fixation de l'isolation.

Bien évidemment, tout ceci n'est viable que si l'isolant est performant : nous travaillerons donc également à l'amélioration des performances thermiques de celui-ci afin de pouvoir avoir l'isolant le plus mince et léger possible.

Les attentes des acheteurs sont multiples : prix peu élevé, bonnes performances d'isolation, bonne durabilité, mise en valeur du bâtiment (parement permettant une revalorisation des bâtiments de logement sociaux par exemple)...

Les objectifs à atteindre du nouveau système baptisé « Isolpac » en comparaison des systèmes existants sont décrits dans le Tableau 4.

	ITI		ITE			
	Isolant / Contre cloison	Panneaux Composites	Isolant / Enduit	Isolant sous bardage ou ossatures	Mortier projeté	ISOLPAC
Isolation thermique	++	++	+++	+++	+	+++
Confort d'été	+	+	++	++	+	++
Pont thermique	+	+	++	++	++	+++
Pose	+	+++	++	+	+++	+++
Esthétique	+	+	+	+++	+	+++
Coût	+++	+++	++	+	+++	++

Tableau 4 : Objectifs à atteindre pour le nouveau système, en comparaison avec les systèmes existants

Les recherches bibliographiques ont montré qu'aucun système de ce genre n'existe aujourd'hui. Elles ont également montré la multidisciplinarité du sujet : Il faudra traiter de la Thermique, de l'Hygrométrie, de la Mécanique et de la Chimie.

1.4.2.1 Le nouveau complexe isolant : description et contraintes identifiées

Le nouveau complexe isolant à développer est un produit « tout textile » composé d'un isolant et d'une toile. Cette dernière a pour rôle de protéger l'isolant de l'humidité et des UV, tout en étant respirante.

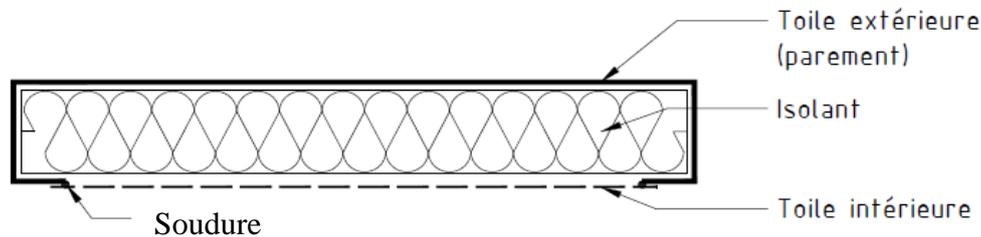


Figure 32 : Schéma représentatif du nouveau complexe isolant

L'une des difficultés principales réside dans l'étude de l'assemblage entre l'isolant et sa toile protectrice. En effet, il convient de s'assurer de la compatibilité de ces deux éléments entre eux. Le travail de recherche porte donc en partie sur l'assemblage des différents éléments de ce complexe isolant pour qu'il réponde aux exigences thermiques et aux réglementations exigées dans la construction.

L'isolant sera développé par PEG, un industriel partenaire de Norpac. Il s'agit d'un non-tissé en ouate de polyester. La ouate de polyester utilisée est en partie issue du recyclage de bouteilles d'eau en plastiques. PEG commercialise à ce jour son isolant, mais celui-ci est à adapter pour qu'il soit compatible avec les exigences du nouveau complexe. Il faudra notamment travailler sur une optimisation des propriétés suivantes :

- conductivité thermique
- densité
- comportement vis-à-vis de la vapeur d'eau
- quantité de fibres thermoliantes

Ces dernières propriétés sont des facteurs clés pour s'assurer de la performance du nouveau complexe. En effet, l'optimisation de la conductivité thermique nous permettra d'avoir des panneaux isolants le moins épais possible. D'autre part, la densité influant directement sur les performances thermiques de l'isolant, il faudra trouver la densité optimale, tout en assurant à l'isolant une bonne résilience (Dominguez-Munoz F., 2010). De plus, les comportements vis-à-vis de la vapeur d'eau de l'isolant seront importants à déterminer car ils permettront de connaître les exigences de perméabilité à la vapeur d'eau de la toile extérieure qui va le protéger. En effet, ces deux valeurs dépendent l'une de l'autre (Pavlik Z., 2009). Enfin, les fibres thermoliantes assurant la cohésion mécanique de l'isolant mais diminuant les performances thermiques de l'isolant, il faudra en trouver le bon dosage (Achchaq F., 2009).

Les toiles seront développées par un 2^{ème} industriel partenaire : Dickson Constant. Un travail sera fait sur les toiles existantes de Dickson afin qu'elles puissent remplir les différentes fonctions qu'elles doivent assurer, tout en étant compatible avec l'isolant :

- Etanchéité
- Perméabilité à la vapeur d'eau
- Résistance aux UV
- Réparabilité, entretien...

Ces propriétés sont indispensables au bon fonctionnement du complexe. En effet, La toile extérieure par exemple doit empêcher l'eau de pénétrer dans l'isolant car la présence d'eau liquide dans un isolant diminue fortement ses performances thermiques et peut être la cause de dégradations (Langlais C., 2004). De plus, la toile doit laisser l'isolant « respirer ». Si cela n'est pas le cas, il y aura apparition de condensation à l'interface entre la toile et l'isolant. Cette condensation va diminuer les performances de l'isolant et peut le dégrader (Toman J., 2009). Enfin, la toile sera soumise directement à l'action des UV et de la pluie. Or, afin de satisfaire à la garantie décennale obligatoire dans les produits du bâtiment, la toile devra conserver ses propriétés physiques et mécaniques au cours du temps, même après avoir subi les agressions extérieures (Pérez J.M., 2010).

Une caractérisation de chaque toile étudiée sera effectuée afin de déterminer leurs étanchéité, leurs résistances à la diffusion de la vapeur d'eau, leurs résistances aux UV ainsi que leurs résistances mécaniques. Des corrélations devront être étudiées entre les normes utilisées dans le domaine du textile et celles utilisées dans le domaine du bâtiment.

Les éléments, toiles et isolant, devront être assemblés de manière à préserver les qualités de chacun des constituants du complexe, et enfin répondre aux diverses réglementations du bâtiment (résistance au feu, résistance mécanique...). L'assemblage, appelé « confection » dans le domaine du textile, sera réalisé par le partenaire BHD. Cette entreprise est spécialisée dans la découpe, l'assemblage et la pose de toiles tendues dans le bâtiment. Par ailleurs, la confection a également ses contraintes techniques et économiques. Il convient de trouver les meilleures solutions pour garantir la durabilité et le bon fonctionnement du nouveau système, tout en alliant esthétique et coût de production minimisés.

Mon rôle sera de coordonner l'ensemble des recherches des différents intervenants pour s'assurer de la cohérence de celles-ci. Par ailleurs, je réaliserai une partie des essais et analyserai et interpréterai l'ensemble des résultats, accompagnée des chercheurs de l'Ecole Centrale de Lille, afin de guider les équipes de recherche. Au besoin, je mettrai en place de nouveaux protocoles d'essai adaptés aux matériaux considérés.

1.4.2.2 Assemblage des panneaux : contraintes et idées

Les isolants existants sur le marché de l'isolation par l'extérieur sont longs et difficiles à poser (Choquart M., décembre 2009), d'où un coût de mise en œuvre important et un prix de revient non négligeable pour l'utilisateur. En effet, une isolation par l'extérieur coûte au total (fourniture des matériaux et pose) entre 70 et 200€/m² contre entre 20 et 30€/m² pour une isolation par l'intérieur. Ce surcoût s'explique notamment par la pose qui représente à elle seule environ 50€/m².

L'objectif de la thèse est de développer un nouveau système isolant qui serait simple et rapide à mettre en œuvre (ne nécessitant pas de coupes sur chantier ni matériel spécifique). Une partie de la recherche se concentrera donc sur la conception d'un nouveau système d'accroche et d'assemblage pour cet isolant. Les propriétés textiles de celui-ci devraient permettre d'autres moyens d'accroche innovants issus de notre recherche.

L'assemblage consiste à relier entre elles les différentes bandes d'isolant que l'on fixera sur le bâtiment (Figure 33). C'est une étape importante de la pose qui doit pouvoir permettre un gain de temps. Il convient ici de trouver un nouveau système efficace qui préservera l'étanchéité à l'air et à l'eau du complexe.

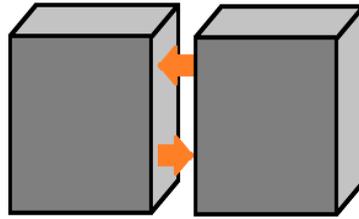


Figure 33 : Schéma d'assemblage des lés

Par ailleurs, dans le cas d'une pose de l'isolant en rez-de-chaussée, il faudra veiller à ce que l'isolant ne puisse pas être retiré trop facilement pour éviter tout vandalisme et être conforme aux réglementations spécifiques aux ITE en RDC.

1.4.2.3 Fixation du complexe textile sur le bâtiment : enjeux et idées

Les fixations permettent l'accroche du complexe isolant sur le bâtiment (Figure 34). C'est une étape délicate car elle est souvent la cause de percement de l'isolation ou d'utilisation de parties métalliques et donc de création de nombreux ponts thermiques.

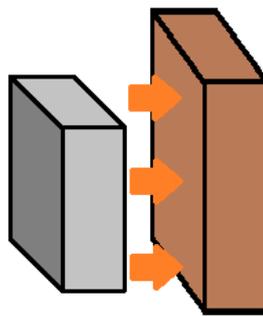


Figure 34 : Schéma de fixation de l'isolant

Il faudra donc trouver un nouveau système qui limitera ces percements ou l'utilisation de métaux. Comme pour l'assemblage, ce système devra garantir l'étanchéité à l'air et à l'eau et ne devra pas pouvoir être retiré trop facilement à partir du rez-de-chaussée.

Pour le moment, l'idée est de reprendre au maximum les techniques propres au textile. La fixation du complexe par bandes auto-agrippantes a ainsi été étudiée. Elle permettrait une pose rapide, simple et sans ponts thermiques (contrairement à la pose mécanique classique où l'isolant est percé de chevilles mécaniques, ce qui peut créer jusqu'à 15% de pertes énergétiques).

Il faudra travailler à l'obtention des autorisations de pose du nouveau système. En effet, les systèmes existants sont réglementés dans les DTU, mais il n'existe pas vraiment de réglementation pour les nouveaux systèmes. Il est alors nécessaire d'obtenir des Avis Techniques du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) afin de pouvoir poser le nouveau système.

1.5 Conclusion du premier chapitre

La prise de conscience des enjeux environnementaux et énergétiques, les nouvelles réglementations en faveur d'un développement plus durable et le positionnement des collectivités conduisent les chercheurs à trouver de nouvelles solutions afin de réduire les consommations et les émissions de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment est l'une des cibles prioritaires pour économiser l'énergie. Il y a en effet un gros potentiel d'économies puisque les réglementations thermiques sont relativement récentes (la première étant apparue en 1975) et donc de nombreuses améliorations peuvent être effectuées dans les bâtiments anciens. De plus, l'arrivée de la RT2012 qui fait du bâtiment basse consommation la norme, va imposer aux nouveaux bâtiments d'être davantage économes en énergie.

Afin de réhabiliter un bâtiment « passoire énergétique » ou de construire un bâtiment basse consommation, l'une des premières actions à réaliser est de bien isoler le bâti. Un bâtiment bien isolé voit en effet ses consommations diminuer fortement, est plus confortable pour l'occupant, et permet d'utiliser des systèmes de production de chaleur plus économes en énergie. Parmi les solutions pour isoler un bâtiment, la plus performante d'un point de vue thermique est l'isolation par l'extérieur. Cependant, cette technique est encore peu répandue en France, et est encore trop coûteuse principalement à cause du coût de pose du système, souvent long et complexe à mettre en œuvre.

C'est pourquoi l'entreprise Norpac, filiale de Bouygues Construction, a imaginé un système d'isolation basé sur l'idée d'un manteau pour le bâtiment. Associé à trois industriels du textile, PEG, Dickson Constant et BHD, à l'Ecole Centrale de Lille et au réseau CLUBTEX, Norpac a lancé un programme de recherche afin de développer le système.

C'est dans ce cadre que ma thèse a été initiée. Elle vise à développer un nouveau système d'isolation par l'extérieur à base de matériaux textiles. Le système comporte un panneau sandwich composé de deux toiles textiles et d'un isolant en ouate de polyester ainsi qu'une nouvelle technique de fixation et d'assemblage des panneaux sur le bâtiment.

Mon rôle sera de coordonner l'ensemble des recherches des différents intervenants pour s'assurer de la cohérence de celles-ci. Par ailleurs, je réaliserai une partie des essais et analyserai et interpréterai l'ensemble des résultats, accompagnée des chercheurs de l'Ecole Centrale de Lille, afin de guider les équipes de recherche. Au besoin, je mettrai en place de nouveaux protocoles d'essai adaptés aux matériaux considérés.

Les axes de recherche sont nombreux et pluridisciplinaires. Les sujets sont tout d'abord thermiques, puisqu'il convient d'améliorer les performances d'isolation thermique du système. Ils sont également hygrothermiques, puisqu'il convient de montrer que le complexe respecte l'équilibre hygrothermique du bâtiment. En effet, des flux de vapeur d'eau circulent dans les parois. Si ce flux se retrouve bloqué dans l'isolant, un phénomène de condensation peut se produire. Celui-ci est impérativement à éviter car la condensation diminuerait fortement le pouvoir isolant du complexe. Enfin, les sujets sont également mécaniques et chimiques car il faut s'assurer que le système résiste aux conditions extérieures, c'est-à-dire à la pluie, au vent, à la neige, au gel, aux UV... Pour cela, des essais mécaniques, d'agressions chimiques et des essais de vieillissement accéléré ont été réalisés sur des panneaux.

Chapitre 2

Développement et caractérisation mécanique, thermique et hygrothermique des matériaux composant le panneau

2 Développement et caractérisation mécanique, thermique et hygrothermique des matériaux composant le panneau

2.1 Développement, caractérisation et qualification de l'isolant

2.1.1 Présentation de l'isolant, composition et mode de fabrication

L'isolant utilisé dans le complexe est un non-tissé en ouate de polyester. Ce matériau est connu dans l'habillement, mais n'est apparu sur le marché que très récemment pour l'isolation des bâtiments.

2.1.1.1 Le polyéthylène téréphtalate

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un plastique faisant partie de la famille des polyesters, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un polymère dont les motifs de répétition de la chaîne contiennent la fonction ester⁵. (Quentin J-P., 2004)

Le PET peut être préparé par réaction du 1,2-éthanediol ou monoéthylèneglycol (MEG) :

- soit directement avec l'acide téréphtalique ; c'est la voie dite d'estérification directe
- soit avec l'ester diméthylque ou téréphtalate de diméthyle (DMT) ; c'est la voie dite d'interéchange d'esters.

Sa formule brute est $C_{10}H_8O_4$, et sa forme développée est la suivante :

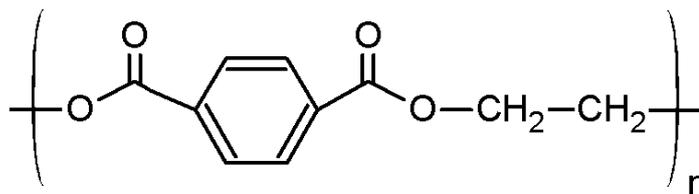


Figure 35 : Forme développée du polyéthylène téréphtalate

Le PET s'est d'abord développé dans le textile (fils et fibres) et dans les films (emballages, photos, audio, vidéo), puis dans les fils industriels et aujourd'hui de plus en plus dans les corps creux.

2.1.1.2 Fibres recyclées

Une partie de ces fibres provient du recyclage de bouteilles d'eau plastiques en PET. Ces bouteilles se sont multipliées très rapidement dans les années 70 avec l'apparition de la

⁵ Ester : En chimie, la fonction ester désigne un groupement d'atomes formé d'un atome de carbone lié simultanément à un atome d'oxygène par double liaison, à un groupement O-R' et à un groupement H ou R.

technique de moulage par soufflage. Aujourd'hui la bouteille en PET est l'un des emballages plastique les plus utilisés. En 2007, la consommation mondiale de bouteilles en PET a été de 15 million de tonnes soit 8% de la consommation de plastiques standards. En parallèle, le recyclage des bouteilles est devenu un système bien établi avec sa propre logistique incluant la collecte des bouteilles et la production de flocons et de pastilles. En 2007, environ 4,5 million de tonnes de bouteilles PET ont été collectées et recyclées en flocons de PET. La plupart de ces flocons ont été ensuite transformés en fibres. Les fibres de PET recyclées représentent environ 8% des fibres de PET produites en 2007. (Shen L., 2010)

Il existe plusieurs méthodes de recyclage du PET en fibres, parmi lesquelles le recyclage mécanique, semi-mécanique, chimique (par oligomère ou par monomère) sont les plus utilisées.



Figure 36 : Fibres de polyester recyclées

Le recyclage de ces bouteilles permet de diminuer l'énergie grise⁶ et l'impact écologique de l'isolant. En effet, le recyclage des fibres est moins polluant que la production de nouvelles fibres vierges. La Figure 37 montre l'impact sur le réchauffement climatique selon que la fibre soit vierge ou issue du recyclage (avec différentes techniques de recyclage).

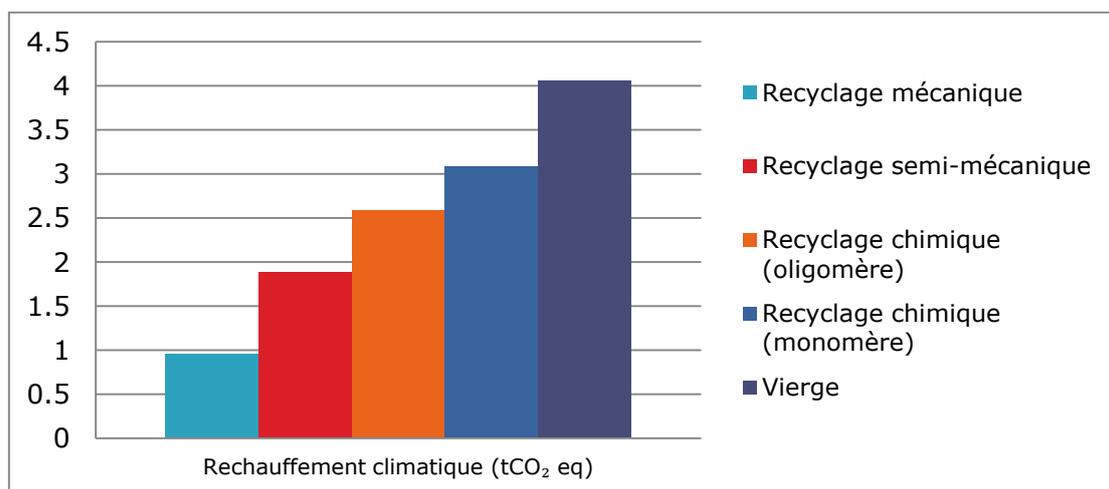


Figure 37 : Emissions en tonne équivalente de CO₂ calculées pour une tonne de fibres de PET selon les différents modes de recyclage (Shen L., 2010)

⁶ L'énergie grise est la quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie d'un matériau ou d'un produit : la production, l'extraction, la transformation, la fabrication, le transport, la mise en œuvre, l'utilisation, l'entretien puis pour finir le recyclage.

En comparant l'énergie nécessaire à la production de fibres de PET issues du recyclage avec d'autres fibres textiles, il peut être constaté que les méthodes de recyclage mécanique et semi-mécanique nécessitent une consommation d'énergie pour leur production nettement inférieure à des fibres vierges, même comparé à des fibres naturelles comme le coton (Figure 38).

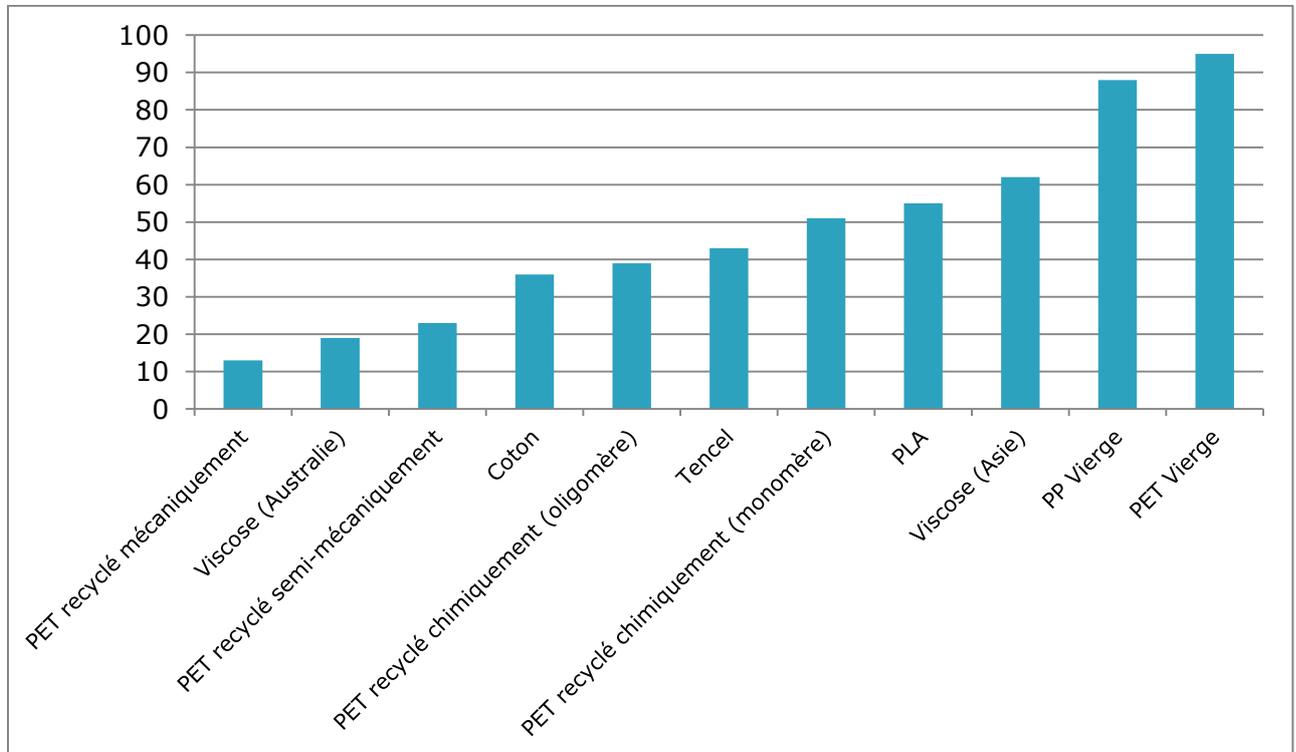


Figure 38 : Comparaison de la consommation en Energie non renouvelable en GJ/t pour la production de différentes fibres (Shen L., 2010)

2.1.1.3 Propriétés morphologiques

L'isolant étudié est appelé EcoPeg. Il a une conductivité thermique de 0,039 W/mK, ce qui le situe dans les performances moyennes du marché.

L'un des objectifs de la thèse est de diminuer la conductivité thermique de cet isolant afin de pouvoir diminuer l'épaisseur du nouveau système, pour une performance d'isolation égale.

Pour cela, il convient d'évaluer l'influence des propriétés morphologiques de l'isolant sur sa conductivité thermique :

- influence de la porosité (ou densité)

Il est possible d'approximer l'évolution de la conductivité thermique λ en fonction de la densité de l'isolant ρ par la formule suivante :

$$\lambda(\rho) = A + B\rho + \frac{C}{\rho} \quad (2.1)$$

Les coefficients A, B et C doivent être déterminés pour chaque température ambiante et chaque type de matériau.

F. Dominguez-Munoz et al. ont confirmé cette approximation et évalué ces coefficients pour de nombreux matériaux en effectuant des séries de mesures (Dominguez-Munoz F., 2010). Ils montrent ainsi que la densité est un facteur clé influençant la conductivité thermique, et que le polyester semble avoir un comportement différent des autres matériaux. En effet, la plupart des matériaux, comme par exemple la laine de verre, ont tendance à voir leur conductivité diminuer avec l'augmentation de la densité, jusqu'à un certain seuil au-delà duquel une augmentation de la densité augmentera la conductivité (Figure 39). Alors que pour l'isolant en polyester, les recherches de F. Dominguez-Munoz et al. montrent que l'augmentation de la densité ne peut que diminuer la conductivité de l'isolant (Figure 40).

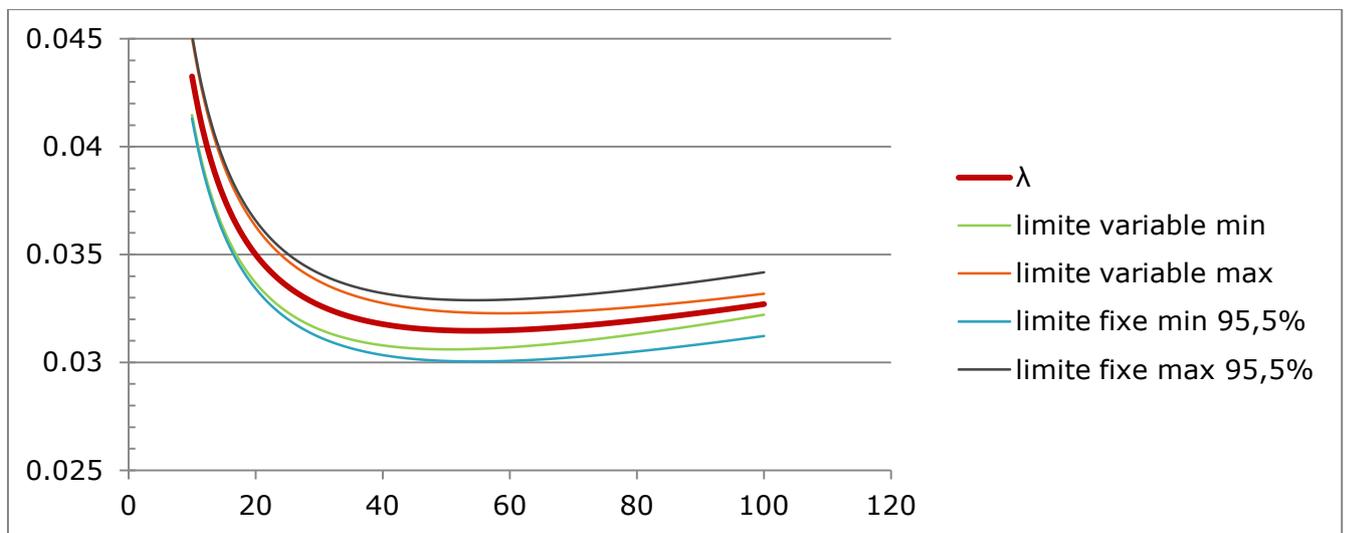


Figure 39 : Evolution estimée de la conductivité thermique (en W/mk) en fonction de la densité (en kg/m3) pour une laine de verre (Dominguez-Munoz F., 2010)

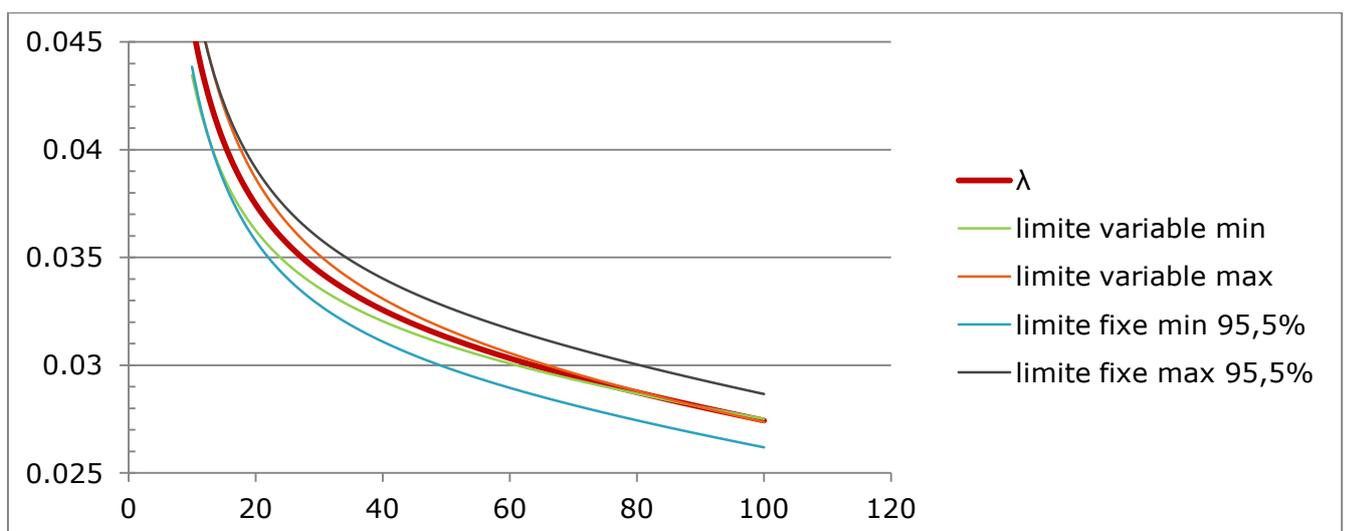


Figure 40 : Evolution estimée de la conductivité thermique (en W/mk) en fonction de la densité (en kg/m3) pour une ouate de polyester (Dominguez-Munoz F., 2010)

- influence de la finesse des fibres

L'augmentation de la finesse des fibres améliorerait la conductivité thermique de l'isolant, en particulier pour des densités d'isolant faibles (autour de 10 kg/m³). Il convient d'étudier ce paramètre, d'autant plus que les fibres de PET d'origines recyclées sont plus grosses que les fibres vierges de PET. (Langlais C., 2004)

- influence de l'anisotropie

Cette influence peut être mise en évidence en mesurant λ_V et λ_H , respectivement les conductivités thermiques de l'isolant dans le sens vertical et horizontal. Dans tous les cas λ_H est supérieure à λ_V et la différence augmente avec la masse volumique (Langlais C., 2004). Cependant, ce paramètre ne concerne pas nos recherches puisque l'isolant sera toujours posé dans le même sens sur le bâtiment.

2.1.1.4 Chaîne de production

Les propriétés morphologiques influencent les performances de l'isolant, mais notre industriel partenaire PEG nous a également informés de la nécessité de prendre en compte les moyens de production de l'isolant.

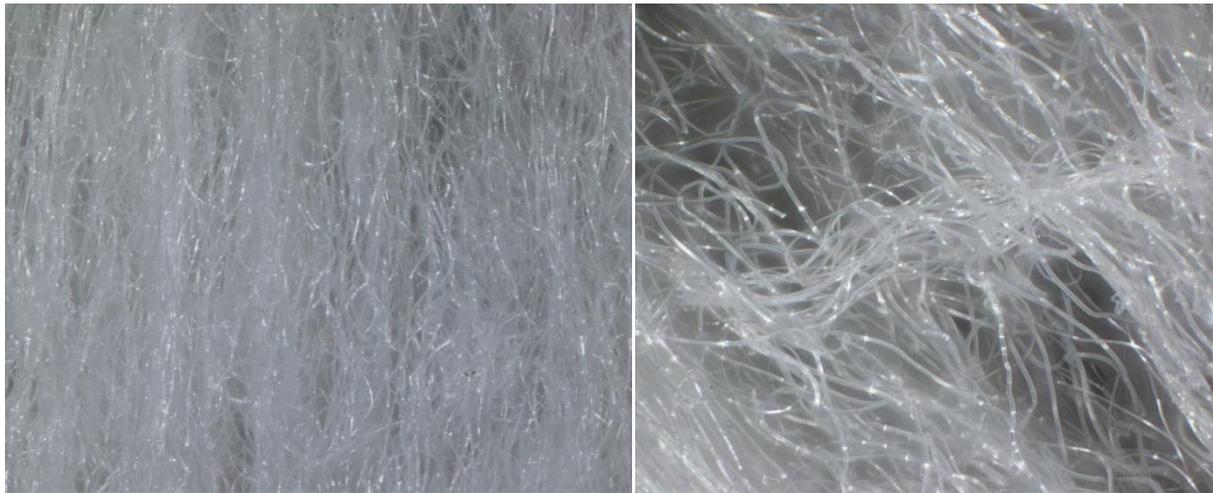
En effet, les techniques utilisées pour la fabrication du non-tissé auront un impact fort sur le produit final. Il faut en particulier s'attacher à choisir un mode de consolidation (liage mécanique du non-tissé) des fibres adapté. Il existe plusieurs techniques (Coste G., 2004) :

- Par voie mécanique (par aiguilletage ou par jet d'eau)
- Par voie chimique (par l'adjonction de liants chimiques)
- Par voie thermique (ramollissement des fibres dans un gaz chaud ou entre des rouleaux chauffants ou encore par simple soufflage d'air chaud)

L'industriel PEG a choisi de ne pas utiliser la voie chimique afin d'avoir des produits sains (conformes à l'Ecolabel Oeko-Tex standard 100 (Association Internationale de Recherche et d'Essai dans le domaine de l'écologie des textiles, 2011)). En revanche, deux autres techniques sont utilisées : l'aiguilletage (liage mécanique) et le thermoliage (par passage dans un four).

L'aiguilletage permet de réaliser un enchevêtrement physique des fibres constituant les voiles. L'aiguilleteuse est équipée d'une tête où sont insérées une multitude d'aiguilles métalliques ou de barbes spécialement conçues à cet effet. Les aiguilles disposent d'encoches qui accrochent les fibres au passage, les tirent à travers le voile à l'aller, les laissant en place au retour.

Ce processus est utilisé par la société PEG pour assurer le liage des nappes de fibres entre elles. Sur les photos Figure 41, la superposition des différentes nappes est visible (photo (a)). Sur la photo (b), les fibres qui relient deux nappes suite à l'action de l'aiguilletage peuvent être observées.



(a)

(b)

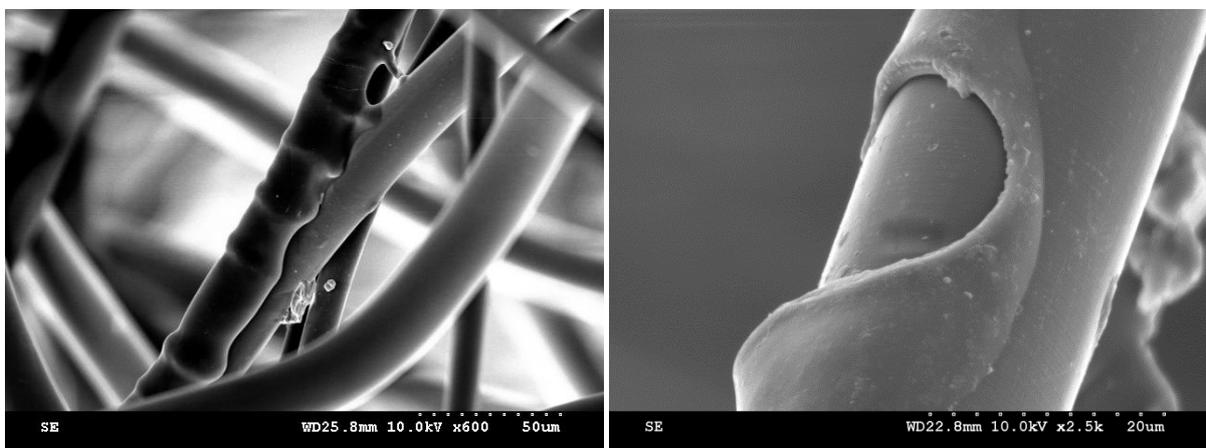
Figure 41 : Images microscopes de l'EcoPEG 39. (a) Superposition des nappes de fibres (zoom x20). (b) Liaison entre deux nappes par voie mécanique (zoom x40)

Pour le thermoliage, la propriété de thermo-plasticité et de thermo-fixation de certaines fibres synthétiques, qui peuvent créer une adhésion sous des conditions de température adaptées, est utilisée.

Ces fibres peuvent constituer le voile initial ou être introduites dès la constitution du voile. Dans ce dernier cas elles ont souvent une température de fusion plus basse.

La chaleur nécessaire pour la thermo-fixation est, dans le cas de la ligne de production de notre industriel, apportée par un four.

Dans le cas des fibres utilisées par la société PEG, des fibres bi-composants sont utilisées. Une première fibre en polyester est entourée de polyester ayant une température de fusion plus basse. Ainsi, seule la partie extérieure de la fibre va fondre et assurer la liaison. Sur la Figure 42, la fusion entre deux fibres (photo (a)) suite à la fusion de la partie extérieure des deux fibres peut être observée. Sur cette même figure, la photo (b) montre une fibre bi-composant. Les deux couches de la fibre, la couche extérieure en partie fondue, et la fibre intérieure qui est restée entière sont visibles.



(a)

(b)

Figure 42 : Images MEB de l'EcoPEG 39. (a) Fibres liées entre elles thermiquement. (b) fibre bi-composant

La succession de ces deux modes de liage est très intéressante car est réalisée à deux échelles. Le liage mécanique est plutôt à l'échelle macro, tandis que le liage thermique s'effectue à l'échelle micro. Le process général de l'industriel PEG est décrit Figure 43.

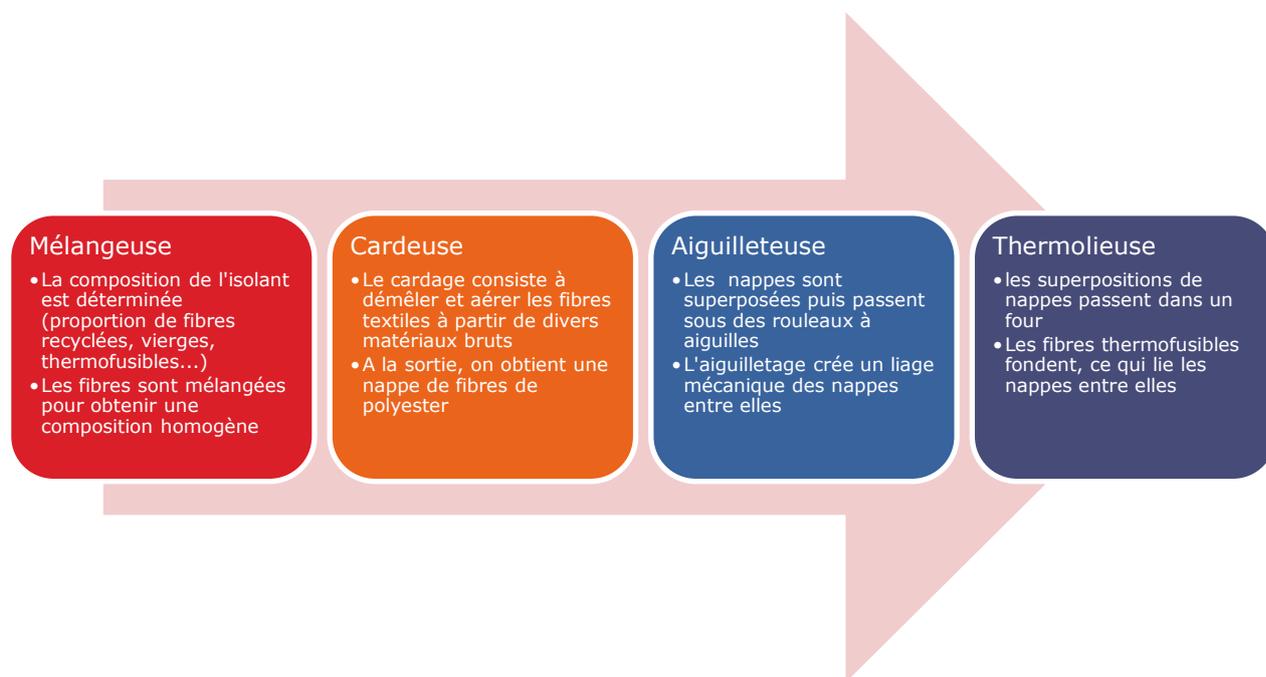


Figure 43 : Processus industriel de production des non-tissés en polyester de l'industriel PEG

2.1.2 Caractérisation hygrothermique de l'isolant développé et comparaison avec d'autres isolants du marché

2.1.2.1 Objectif de la caractérisation hygrothermique

Pour faire ressortir les qualités du nouvel isolant, une caractérisation comparative sur les principales propriétés hygrothermiques de cinq isolants thermiques pour le bâtiment est réalisée. Ces propriétés sont nécessaires à la bonne prédiction des transferts thermiques et hydriques dans les parois et au choix des matériaux les plus adaptés selon les bâtiments (Künzel H.M., 1995). Les matériaux étudiés sont une laine de verre, une laine de roche, un polystyrène expansé, un panneau de fibres de bois et la ouate de polyester produite par l'entreprise PEG.

Les différences de température et d'humidité relative entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment induisent des transferts de température et d'humidité à travers ses parois (Kumaran M.K., 2009).

Les principaux mécanismes de transport d'humidité dans les matériaux de construction sont la diffusion de la vapeur d'eau et le transport liquide sous l'action de forces capillaires (Krus M., 1996). En hiver, la température intérieure est supérieure à la température extérieure. Au même temps, l'humidité relative est plus élevée à l'extérieur. Le résultat induit est que le gradient de température et celui d'humidité sont alors opposés. La diffusion de la vapeur d'eau s'effectue alors de l'intérieur vers l'extérieur (Lstiburek J., 2009). Parmi les

conséquences, des particules d'eau se diffusant à travers les pores des matériaux sont adsorbées sur la surface des pores. Elles sont alors immobilisées sous l'action de forces adhésives. Par ailleurs, lorsque l'humidité croît, ces particules sont plus nombreuses et il y en a donc plus d'adsorbées. Les pores commencent alors à se couvrir d'un film d'eau. Avec l'augmentation de l'épaisseur de ce film, les forces adhésives sont plus faibles sur les particules d'eau. Certaines deviennent alors mobiles et créent un processus de diffusion en surface. Ce processus est un transport sous forme liquide, qui circule dans la direction opposée au flux de vapeur. Le flux de vapeur allant de l'intérieur vers l'extérieur s'en retrouve réduit. Enfin, quand l'humidité croît, le pore se retrouve quasi saturé et seuls les transports capillaires interviennent dans le mécanisme. Le flux d'humidité est alors inversé (Künzel H.M., 1995).

Ces phénomènes de transferts ont lieux dans les parois d'un bâtiment. De ce fait, il est nécessaire d'étudier les flux hygrothermiques traversant ces parois afin de mieux comprendre les principaux facteurs d'influence et de contrôler les taux d'humidité qui ne doivent pas être trop importants. En effet, selon le niveau d'humidité, des champignons, des bactéries, des acariens, des cafards et autres insectes vont se développer. A titre d'exemple, l'apparition de moisissures noirâtres présentées dans (Dahan P., 2009). Ces microorganismes vont être source pour les habitants d'allergies, asthmes, infections, toxicoses... (Burge H.A., 2009). En plus de ces effets sur l'être humain, ces organismes dégradent les propriétés des matériaux de construction du bâtiment et accélèrent leur vieillissement engendrant ainsi des coûts supplémentaires. Ils peuvent aller jusqu'à détruire certains matériaux de construction (Wyrwal J., 2002). Enfin, la condensation dans les parois est à éviter absolument car elle peut être la cause de dégradation de l'enveloppe et d'une diminution forte des propriétés thermiques des isolants. En effet l'isolation thermique provient de la capacité qu'ont les matériaux à emprisonner de l'air. Cet air a une conductivité thermique de l'ordre de 0.026W/mK. Quand ces matériaux absorbent de l'humidité, une partie de cet air est remplacé par de l'eau. Cette dernière a une conductivité thermique de l'ordre de 0.6W/mK. Le rapport entre les deux conductivités est très important car supérieur à 20. La conductivité thermique du matériau augmente donc avec l'humidité (Sandberg I., 2009) (Karamanos A., 2008). Il est admis que la condensation est le phénomène le plus délicat à maîtriser et à prédire à l'avance.

Par ailleurs, il a été montré dans différentes études antérieures que la conductivité thermique de briques (Pavlík Z., 2012), de bétons cellulaires (Jerman M., 2011), et d'enduits chaux (Vejmelková E., 2012) augmentait avec l'humidité des matériaux. Concernant les matériaux d'isolation, Karamanos A. et al. (Sandberg I., 2009) ont montré dans une étude sur l'impact de l'humidité sur des isolants en laine de roche et en mesurant la conductivité thermique à l'état sec, à l'état humide et après séchage que la conductivité thermique à l'état humide est bien supérieure à la conductivité thermique à sec. Par contre, après séchage, la conductivité thermique redevient égale à la conductivité initiale. Dans une autre étude comparative, Achchaq et al. (Achchaq F., 2009) ont réalisé une observation MEB, des mesures au DRX et une analyse thermogravimétrique sur deux laines de verre. Ils montrent que les deux isolants n'absorbent pas l'humidité de la même manière et que la première cause de dégradation des laines de verre face à l'humidité est la dégradation de la matière qui permet le liage des fibres de verre. Jerman et al. (Jerman M., 2012) étudient la densité apparente, la porosité, les courbes de sorptions, les conductivités thermiques, les chaleurs spécifiques, les résistances à la diffusion de la vapeur d'eau et les teneurs en eau de saturation de laines minérales hydrophobes et hydrophiles, de polystyrène expansé et de béton cellulaire. Ils montrent que les différences entre ces matériaux sont significatives. Par exemple, le facteur de résistance à la diffusion du PSE était de 58 contre 2.6 pour la laine minérale.

Concernant, les modèles de prédiction des transports de chaleur et d'humidité, ces derniers sont fréquemment utilisés pour calculer les gains et pertes d'énergie dans les bâtiments ((Wirbel L., 2012), (Künzel H.M., September 2000), (Künzel H.M., 2005), (Zirkelbach D., 2005), (Cheng X., 2004), (Qin M., 2011)). Cependant, ces modèles ne peuvent être fiables et pertinents que s'ils reposent sur des données d'entrée fiables. Ceci n'est pas forcément le cas puisque les données standards fournies par les fabricants sont souvent loin d'être complètes et surtout contrôlées.

Le travail de recherche présenté dans cette sous-partie vise à compléter les travaux cités précédemment pour répondre à ce manque de connaissances des propriétés hygrothermiques des matériaux d'isolation. Par ailleurs, les études précédentes ne caractérisent que des matériaux traditionnels alors que les nouveaux matériaux apparaissant sur le marché peuvent présenter des comportements différents à l'humidité. Dans cette partie, cinq isolants dont deux non traditionnels seront caractérisés hygrothermiquement et comparés entre eux. Parmi ces isolants se retrouve celui développé par PEG pour le système Isolpac. Il sera ainsi comparé à d'autres isolants disponibles sur le marché.

2.1.2.2 Présentation des matériaux étudiés

Cette étude a pour objectif de mettre au point un nouvel isolant. Cet isolant est un panneau non-tissé en fibres de polyester. Plus de 70% de ces fibres sont issues du recyclage de bouteilles d'eau. Les performances de cet isolant sont comparées avec des isolants plus traditionnels disponibles sur le marché.

Pour cela cinq isolants ont été retenus et ont fait l'objet d'une caractérisation complète des principales propriétés : Une laine de verre d'épaisseur 100mm (IsoFaçade 32 de chez Isover) notée LDV, une laine de roche d'épaisseur 100mm (Rockfaçade de chez Rockwool) notée LDR, un polystyrène expansé d'épaisseur 100mm (PS15 de chez Sto) noté PSE, un panneau de fibres de bois d'épaisseur 60mm (Diffutherm de chez Pavatex) noté PFB, et la ouate de polyester d'épaisseur 100mm développée notée OP.

Les laines de verre et de roche sont classées parmi les laines minérales. La laine de verre est produite à partir de verre de borosilicate chauffé à 1400°C et fondu pour créer des fibres. La laine de roche est produite à partir de roches (diabase et dolérite) chauffées à 1500°C et également fondues pour créer des fibres. Dans les deux cas, un liant, de la résine phénolique, est ajouté afin de lier les fibres entre elles et améliorer les propriétés du matériau. Le polystyrène expansé est produit à partir de petites sphères de polystyrène qui contiennent un agent expansif tel que le pentane C₆H₁₂, qui gonfle sous l'action de la chaleur (Jelle B.P., 2011). Les panneaux de fibres de bois sont produits en utilisant un procédé par voie humide. Cela utilise le pouvoir de cohésion intrinsèque aux fibres de bois afin de lier les fibres. Le bois est décomposé en fibres par un processus thermomécanique. Les fibres sont ensuite assemblées par chauffage. La ouate de polyester, comme décrite au 2.1.1, est composée de fibres de polyester issues à plus de 70% du recyclage de bouteilles plastiques. Les fibres sont superposées sous forme de nappes (comme pour la fabrication de papier) et sont ensuite assemblées d'abord mécaniquement par aiguilletage puis thermiquement.

Les trois premiers isolants, la laine de verre, la laine de roche et le PSE représentent les trois matériaux les plus utilisés dans le marché de l'isolation en France (Papadopoulos A.M., 2005). A l'inverse, les isolants naturels, comme l'isolant en fibres de bois étudié, sont encore peu répandus sur le marché français. Cependant leur part est croissante avec une

production annuelle qui augmente de 5% chaque année. Le fait que cet isolant soit biosourcé va modifier son comportement vis-à-vis de l'humidité (Collet F., 2011). Il est donc intéressant de le comparer aux matériaux plus traditionnels. Enfin, le dernier isolant caractérisé intégralement est encore en cours de développement et il n'est pas encore commercialisé sur le marché. Il se distingue des quatre autres isolants de par sa provenance du recyclage. Par ailleurs, de par sa nouveauté, ses propriétés sont encore peu connues.

La Figure 44 montre les photos prises au microscope de la surface de ces isolants. Elle montre leur différence de composition. Sur la photo (b) le liant qui apparaît sous forme de gouttelettes sur les fibres de laine de roche est visible. La photo (c) montre les billes de polystyrène expansé. Enfin, sur la photo (a), les fibres de polyester enchevêtrées sont observables. Les cinq isolants ont donc des structures différentes. Leurs pores n'ont pas la même forme et il est probable que leur comportement diffère vis-à-vis de la diffusion de la vapeur d'eau.

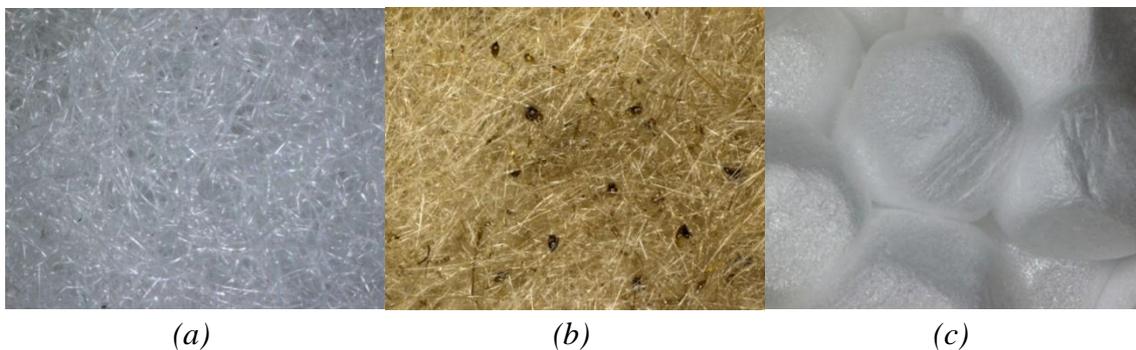


Figure 44 : Photos prises au microscope des 6 isolants étudiés. (a) Ouate de polyester (zoom x30), (b) laine de roche (zoom x30), (c) Polystyrène Expansé (zoom x20)

Le Tableau 5 présente les propriétés des cinq isolants étudiés telles qu'elles sont déclarées par leur fabricant. Les isolants ont une densité qui vaut respectivement 28, 39, 15 et 180 kg/m³ pour la LDV, la LDR, le PSE et le PFB. Leurs conductivité thermique déclarée par le fabricant est respectivement de 0.032, 0.036, 0.038, 0.046 W/mK pour la LDV, la LDR, le PSE et le PFB. Le PFB est plus de dix fois plus dense que le PSE. Sa conductivité thermique est aussi 1.5 fois plus grande que celle de la LDV. Il existe ainsi une grande diversité parmi les isolants.

Matériau	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/mK)
LDV	28	0.032
LDR	39	0.036
PSE	15	0.038
PFB	180	0.046
OP	Non déclarée	Non déclarée

Tableau 5 : Densité et conductivité thermique déclarées par les fabricants

2.1.2.3 Méthodes de caractérisation hygrothermique

- Masse volumique apparente

La masse volumique apparente a été déterminée conformément à la norme NF EN 1602 (AFNOR, Juillet 1997). Les échantillons ont été conditionnés à (23±2)°C et (50±5)% HR jusqu'à stabilisation. Ils ont ensuite été pesés et mesurés afin de déduire leur densité apparente.

- Conductivité thermique

La conductivité thermique est la propriété qui définit un isolant thermique. Il s'agit de la donnée intrinsèque au matériau qui va montrer sa capacité à assurer l'isolation thermique du bâtiment. C'est à partir de cette propriété et en connaissant l'épaisseur de l'isolant que sera déduite la résistance thermique de l'isolant (comme vu au 1.2.2.2). Cette résistance thermique est ensuite la donnée qui permettra de respecter ou non la réglementation, ou encore de bénéficier d'aides ou de crédits d'impôts pour isoler son logement. Il est donc indispensable de connaître avec précision cette valeur.

Les conductivités thermiques des isolants LDV, LDR, PSE, PFB et OP ont été mesurées à l'aide d'une plaque chaude gardée.

Le fonctionnement de la plaque chaude gardée est décrit dans la Figure 45. La plaque chaude gardée est décrite dans la norme NF EN ISO 8302 (AFNOR, Aout 1991). Elle permet de mesurer la résistance thermique d'un matériau en générant un flux de chaleur Φ (W), par effet joule, au centre d'une plaque chaude. Une résistance électrique faisant office de zone de garde entoure la zone de chauffage. Une régulation par thermocouples différentiels maintient un écart de température nul entre la zone de garde et la plaque chaude. Deux échantillons sont placés de part et d'autre de la plaque chaude. Le flux qui les traverse est unidimensionnel. Enfin, deux plaques froides sont placées contre les faces extérieures des éprouvettes et sont régulées en température. Une fois un régime stationnaire atteint, les températures T_1 (K) et T_2 (K) sont mesurées sur les deux faces de chaque éprouvette, afin de calculer leur conductivité thermique λ (W/mK) selon l'équation :

$$\lambda = \frac{\Phi d}{s(T_1 - T_2)} \quad (2.2)$$

Où d (m) est l'épaisseur de l'éprouvette et s (m²) est la surface de mesure de la plaque chaude gardée.

La plaque chaude gardée peut comporter une seule éprouvette. Elle fonctionne alors sur le même principe. L'utilisation de deux éprouvettes permet de faire une moyenne des résultats de mesure sur deux échantillons. Cette méthode de mesure est précise comparée à d'autres méthode (Dominguez-Munoz F., 2010), mais est longue, car il est nécessaire d'obtenir la stabilisation des échanges thermiques, ce qui nécessite plusieurs jours dans le cas d'isolants performants (Saleh A., 2006).

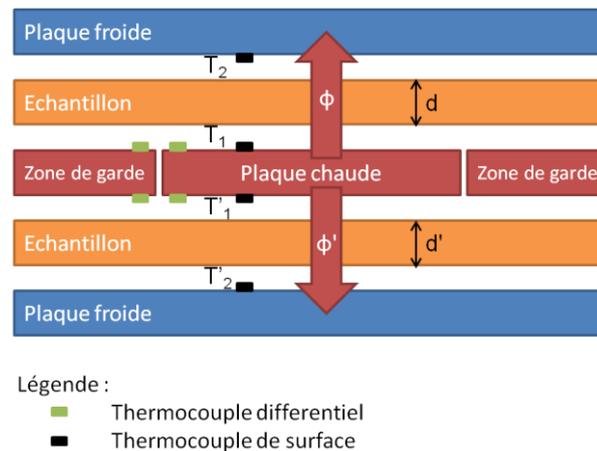


Figure 45 : Schéma illustrant le fonctionnement d'une plaque chaude gardée

Les essais ont été réalisés à plusieurs températures afin d'observer l'influence de celle-ci sur la conductivité thermique. Les valeurs sont obtenues à 10% près.

- Chaleur massique

La chaleur massique, également appelée capacité thermique massique, représente la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance.

La chaleur massique des isolants a été mesurée par la méthode Calvet, à l'aide d'un appareil SETARAM C80 II.

Les échantillons ont été conditionnés dans des creusets en acier inoxydable d'un volume utile de 6 à 8 cm³ fermés avec un couvercle étanche. Cette valeur donne la capacité du matériau à emmagasiner la chaleur par rapport à son poids. Elle permet d'estimer l'inertie du matériau.

La méthode consiste à réaliser une première mesure à blanc avec deux creusets vides. Une deuxième mesure est ensuite effectuée avec une masse d'échantillon m dans le creuset de mesure. Ces deux expériences sont réalisées à plusieurs paliers de températures. Le passage d'un palier à l'autre est caractérisé par l'élévation de température ΔT et par la vitesse de montée qui est appliquée au dispositif. Avant et après chaque montée une isotherme est appliquée afin d'avoir un signal stable.

Le flux de chaleur Q (J) que dégage (ou absorbe) l'échantillon pendant la rampe de température est enregistré, puis la chaleur massique C_m (J/(kg.K)) du produit est calculée suivant l'équation (2.3), connaissant la masse exacte et le ΔT de l'échantillon.

$$C_m = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.3)$$

- Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Cette propriété est l'une des plus importantes pour l'analyse des flux de vapeur dans une paroi. En effet, elle illustre la capacité qu'a un matériau à laisser passer ou au contraire à bloquer le flux de vapeur qui le traverse.

Le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ (-) a été mesuré selon la norme NF EN 12086 (AFNOR, Novembre 1997) avec la méthode de la coupelle sèche.

La méthode consiste à fermer une coupelle avec un échantillon cylindrique de l'échantillon du produit à caractériser. Elle contient un dessicatif qui fixe l'humidité relative dans la coupelle à 0%. L'ensemble est ensuite placé dans une enceinte climatique réglée à 50% d'humidité relative et à 23°C. Les coupelles sont pesées à intervalles réguliers. Les variations de masse de celle-ci sont ainsi calculées. Le flux de vapeur G (kg/s) traversant l'isolant ainsi que la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ (-) peuvent donc être déduits selon (2.4). La Figure 46 illustre le dispositif expérimental d'essai.

$$\mu = \frac{Gd}{\delta_a S \Delta p_v} \quad (2.4)$$

Avec d (m) l'épaisseur du matériau, δ_a (kg/(m.s.pa)) la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air, S (m) la surface de l'éprouvette traversée par le flux, et Δp_v la différence entre la pression intérieure à l'enceinte et la pression dans la coupelle.

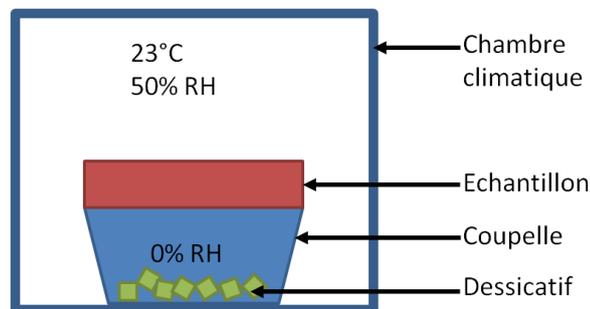


Figure 46 : Schéma représentant l'essai de mesure du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

- Coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle

Le coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle illustre la capacité qu'a le matériau à retenir l'eau lorsqu'il est en contact avec celle-ci. Il a été déterminé selon la norme NF EN ISO 15148 (AFNOR, Octobre 2003).

Le principe de l'essai est illustré Figure 47. Un échantillon repose sur des plots au milieu d'un bac rempli d'eau. Les 5mm inférieurs de l'éprouvette restent constamment sous l'eau. L'éprouvette est pesée au bout de 30min, 1h, 17h, 20h, 24h, 40h, 45h et 48h. La masse d'eau absorbée (Δm_t) divisée par l'aire de l'éprouvette en fonction de la racine carrée du temps de pesée est ensuite tracée. La courbe obtenue est alors soit une droite (graphe de type

A), soit une droite suivie d'une diminution soudaine de pente (graphe de type B). Dans le premier cas, le coefficient d'absorption d'eau A ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$) est alors le coefficient directeur de la droite. Dans le second, le coefficient est déduit de la masse d'eau absorbée à 24h.

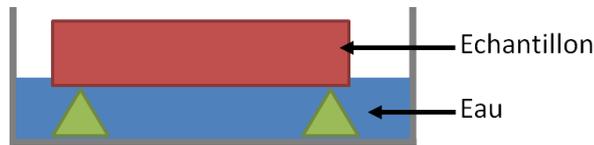


Figure 47 : Schéma représentatif de l'essai de mesure du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle

- Courbe de sorption

Afin de déterminer la quantité d'eau absorbée par l'isolant lorsqu'il est dans un milieu humide, ou traversé par un flux de vapeur d'eau, il faut déterminer sa courbe de sorption. Elle donne en effet la teneur en eau de l'isolant en fonction de l'humidité relative dans laquelle il se situe. Cette propriété est importante car elle va directement donner la quantité de vapeur d'eau qui va être retenue par le matériau. La courbe de sorption est déterminée selon la norme NF EN ISO 12571 par la méthode de la chambre climatique (AFNOR, Octobre 2000). L'isolant est placé dans une chambre climatique régulée à 23°C et à une humidité relative précise. Une fois la masse de l'isolant stabilisée, sa masse est mesurée pour en déduire la quantité d'eau absorbée. La mesure est répétée pour différentes humidités relatives (par ordre croissant) et la courbe de sorption est ainsi obtenue. Dans cette étude, les mesures ont été effectuées pour une humidité relative fixée successivement à 50%, 80%, 93% et 97%.

Pour évaluer la teneur en eau maximale que peut avoir l'isolant, un essai d'absorption d'eau sous immersion totale à long terme (NF EN 12087 (AFNOR, Novembre 1997)) est réalisé. L'isolant après séchage est totalement immergé dans de l'eau pendant 28 jours. Il est ensuite sorti de l'eau et pesé afin de déterminer sa teneur en eau.

La courbe de sorption du PSE n'a pu être déterminée. Ce matériau n'absorbant pas d'humidité, les mesures n'auraient donné aucun résultat (Jerman M., 2012). Il peut être considéré alors que le matériau reste constamment à $0 \text{ kg}/\text{m}^3$ de teneur en eau.

2.1.2.4 Résultats et analyse

- Masse volumique

Le Tableau 6 présente la moyenne des résultats de mesure des masses volumiques apparentes. Le tableau présente également les valeurs déclarées, c'est-à-dire les valeurs données par les fabricants sur les fiches techniques des matériaux. Il exprime également l'écart en % entre ces deux valeurs pour chaque isolant. Les masses volumiques apparentes mesurées sont respectivement de 32.7, 39.7, 20.0, 176.3 et 20.3 kg/m^3 pour la LDV, la LDR, le PSE, le PFB et la OP. Les écarts avec les valeurs déclarées sont respectivement de 17%, 2%, 33%, et -2% pour la LDV, la LDR, le PSE et le PFB. La OP étant un matériau étudié nouveau et non commercialisé, elle ne dispose pas de masse volumique déclarée. Les isolants ont une densité plutôt comprise entre 20 et 40 kg/m^3 , mis à part le PFB qui a une densité supérieure, proche de 180 kg/m^3 . La OP et le PSE sont parmi les plus légers, avec une densité de 20 kg/m^3 . Les seuls écarts significatifs entre la valeur mesurée et la valeur déclarée sont

pour la LDV et le PSE. Pour la LDV, ceci s'explique en partie par la perte d'épaisseur de l'échantillon. En effet, l'échantillon est supposé faire 100mm mais il ne fait dans la réalité que 95mm en moyenne. Une plus grande masse volumique est donc obtenue de part ce tassement. Si l'on ignore ce tassement et que l'on considère que l'éprouvette fait toujours 100mm, la valeur moyenne de masse volumique apparente obtenue est égale à 30.9kg/m^3 , ce qui représente un écart de 10% avec la valeur déclarée. Concernant le PSE, la seule explication possible est que le producteur n'a pas mis à jour sa fiche technique.

Isolant	Masse volumique moyenne (kg/m^3)		Ecart (%) entre les valeurs déclarées et mesurées
	déclarée	Mesurée	
LDV	28	32.7	17%
LDR	39	39.7	2%
PSE	15	20.0	33%
PFB	180	176.3	-2%
OP	Non déclarée	20.3	/

Tableau 6 : Masses volumiques apparentes (kg/m^3) mesurées et comparaison avec les masses volumiques déclarées

- Conductivité thermique

Le Tableau 7 présente les résultats des mesures de conductivité thermiques réalisées à plusieurs températures sur les isolants. Pour chaque isolant, un résultat de mesure pour une température moyenne de l'échantillon proche de 10°C (mesure 1), proche de 20°C (mesure 2) et proche de 40°C (mesure 3) est donné. Les températures moyennes des plaques chaudes et froides correspondantes sont indiquées dans chacun des cas. Les températures appliquées sur les cotés des échantillons sont ainsi comprises entre 0°C et 50°C . Ces températures sont représentatives des températures pouvant être retrouvées dans une paroi. Pour couvrir une plus large partie du spectre de températures couramment rencontrées dans un isolant il aurait fallu pouvoir faire la mesure pour des températures négatives mais la formation de gel aurait alors faussé la mesure (Vrana T., 2009). Il faut donc se limiter à des températures positives. Les conductivités thermiques mesurées pour une température moyenne de l'échantillon proche de 10°C sont respectivement de 0.0281, 0.0317, 0.0337, 0.0320 et 0.0312W/mK pour la LDV, la LDR, le PSE, le PFB et la OP. Elles sont égales respectivement à 0.0300, 0.0327, 0.0367, 0.0424 et 0.0342W/mK pour la LDV, la LDR, le PSE, le PFB et la OP quand la température moyenne de l'échantillon est proche de 20°C . Enfin, les conductivités thermiques sont respectivement égales à 0.0341, 0.0376, 0.0423, 0.0458 et 0.0370W/mK pour la LDV, la LDR, le PSE, le PFB et la OP pour une température de l'échantillon proche de 40°C . Des différences en termes de conductivités thermiques d'un isolant à l'autre sont observées. Le PFB en particulier a des valeurs de conductivité plus élevée que les matériaux traditionnels (LDV, LDR et PSE). La OP en revanche se situe dans la moyenne avec des valeurs très proches de la LDR. L'influence de la température sur la conductivité thermique est importante. Quel que soit l'isolant, il y a augmentation de la conductivité thermique avec l'augmentation des températures de mesure. Ce résultat est conforme avec les études sur les laines minérales réalisées par Karamanos (Karamanos A., 2008) ou encore par Abdou et al. (Abdou A., 2013).

LDV	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3
Température moyenne des plaques froides (°C)	0.95	11.15	30.95
Température moyenne de la plaque chaude (°C)	23.35	32.0	49.3
Température moyenne de l'échantillon (°C)	12.3	21.6	40.1
Conductivité thermique apparente (W/mK)	0.0281	0.0300	0.0341

LDR	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3
Température moyenne des plaques froides (°C)	0.9	11.15	30.8
Température moyenne de la plaque chaude (°C)	20.5	30.1	47.4
Température moyenne de l'échantillon (°C)	10.7	20.6	39.1
Conductivité thermique apparente (W/mK)	0.0317	0.0327	0.0376

PSE	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3
Température moyenne des plaques froides (°C)	1.0	11.1	30.8
Température moyenne de la plaque chaude (°C)	20.1	29.1	46.5
Température moyenne de l'échantillon (°C)	10.5	20.1	38.7
Conductivité thermique apparente (W/mK)	0.0337	0.0367	0.0423

PFB	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3
Température moyenne des plaques froides (°C)	2.65	14.35	34.45
Température moyenne de la plaque chaude (°C)	14.3	23.1	46.1
Température moyenne de l'échantillon (°C)	8.5	18.7	40.3
Conductivité thermique apparente (W/mK)	0.0320	0.0424	0.0458

OP	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3
Température moyenne des plaques froides (°C)	1.45	9.95	30.8
Température moyenne de la plaque chaude (°C)	21.5	33.8	47.7
Température moyenne de l'échantillon (°C)	11.5	21.9	39.3
Conductivité thermique apparente (W/mK)	0.0312	0.0342	0.0370

Tableau 7 : Résultats des mesures de conductivité thermique pour les 5 isolants considérés

La Figure 48 représente la conductivité thermique mesurée en fonction de la température moyenne de l'échantillon pour chacun des isolants considérés. Sur cette figure, les courbes de tendances linéaires des conductivités mesurées en fonction de la température pour chacun des isolants considérés ont été tracées. L'augmentation des conductivités thermiques en fonction de la température semble linéaire quel que soit l'isolant. L'isolant ayant la meilleure conductivité est la LDV. La LDR et la OP ont des valeurs de conductivité très proches. Le PSE a une conductivité moyenne et par contre le PFB a la conductivité la plus élevée des 5 isolants. Le PFB étant un isolant apparu plus récemment sur le marché, il paraît logique qu'il présente un retard par rapport aux autres produits qui ont amélioré leur conductivité thermique ces dernières années fort de leur expérience (Papadopoulos A.M., 2005). La faible conductivité de la OP, pourtant nouvellement apparu sur le marché est donc spécifiquement à noter puisqu'avec le temps elle aura tendance à diminuer.

Pour chacun des isolants, la conductivité thermique (W/mK) a été approximée en fonction de la température (°C) par une équation linéaire de la forme :

$$\lambda(T) = A \times T + B \quad (2.5)$$

Avec A (%) et B (W/mK) des constantes propres à chaque isolant.

Le Tableau 8 reprend les coefficients directeurs A, les ordonnées à l'origine B ainsi que les coefficients de corrélation de ces courbes de tendances. Pour tous les isolants, une approximation linéaire semble appropriée puisque les coefficients de corrélation sont tous compris entre 0.96 et 1.00 mis à part pour le PFB. Concernant ce dernier, il est probable qu'une difficulté à stabiliser la température de mesure soit la cause d'une imprécision plus importante dans la mesure à 10°C. Il est possible que l'approximation linéaire soit moins pertinente ici à cause d'une mesure moins fiable. Concernant les coefficients directeurs, ils ne sont pas identiques : les conductivités thermiques des LDV, LDR et OP gagnent 0.02% par degré Celsius, tandis que les conductivités du PSE et du PFB gagnent respectivement 0.03 et 0.04% par degré. Le PSE et particulièrement le PFB sont donc fortement impactés par la température.

Les normes des isolants traditionnels (NF EN 13162 (AFNOR, Août 2002) pour les laines minérales, EN ISO 13163 (AFNOR, Août 2002) pour les polystyrènes expansés) fixent la température moyenne de référence à 10°C. Ce choix de la norme permet de simuler une configuration classique pour une paroi du bâtiment en hiver où l'intérieur serait chauffé à 20°C et l'extérieur serait à 0°C. Ce choix permet également de ne pas faire de mesures à températures négatives afin d'éviter l'apparition de gel. Les conductivités à retenir pour comparaison sont donc celles des mesures 1.

Le Tableau 9 reprend les valeurs déclarées, c'est-à-dire celles données par les fabricants et celles mesurées pour une température moyenne de l'échantillon proche de 10°C. L'écart entre les valeurs déclarées et mesurées est donné pour chacun des isolants. Des écarts relatifs importants entre ces deux valeurs sont constatés, tout particulièrement pour le PFB où l'écart est de 30%. Pour les autres isolants, l'écart est de 11 ou 12%. Ceci s'explique par le fait que les conductivités thermiques déclarées sont données en tant que valeurs limites représentant au moins 90% de la production avec un niveau de confiance de 90%. Il est donc logique que les valeurs mesurées soient en dessous des valeurs déclarées. En revanche, l'écart important pour le PFB montre que la mesure effectuée est probablement erronée. En effet, il a été constaté qu'à 10°C la stabilisation des valeurs n'était pas optimale, et ce tout particulièrement pour le PFB. De plus, cette mesure a été effectuée à une température moyenne de l'échantillon de 8,5°C, ce qui induit une mesure de conductivité thermique plus faible qu'à 10°C. En effet, en appliquant l'approximation linéaire (4), la conductivité thermique du PFB à 10°C serait de 0.0353W/mK soit 23% en dessous de la valeur déclarée.

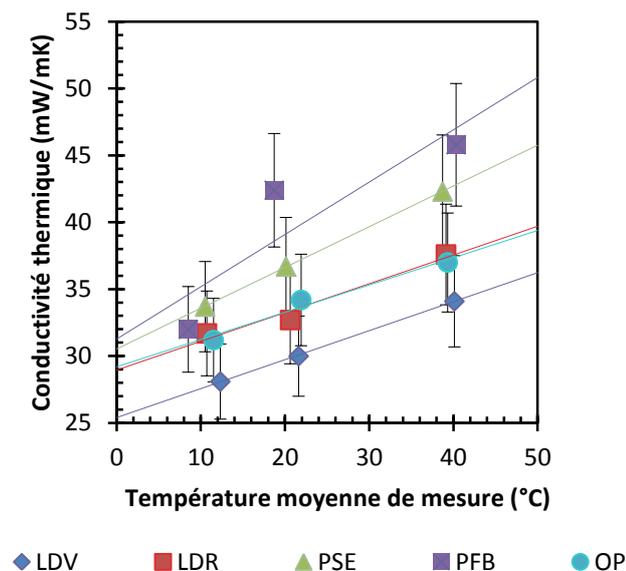


Figure 48 : Conductivité thermique (W/mK) des isolants étudiés en fonction de la température moyenne des échantillons

Isolant	Coefficient directeur A (%)	Ordonnée à l'origine B (W/mK)	Coefficient de corrélation R ²
LDV	0.02	0.0254	1.00
LDR	0.02	0.0290	0.96
PSE	0.03	0.0305	1.00
PFB	0.04	0.0313	0.78
OP	0.02	0.0292	0.97

Tableau 8 : Coefficient directeur, ordonnée à l'origine et coefficient de corrélation des courbes de tendances de la Figure 48.

Isolant	Conductivité thermique (W/mK)		Ecart relatif (%) entre les valeurs déclarées et mesurées
	déclarée	mesurée (mesure 1)	
LDV	0.032	0.0281	-12%
LDR	0.036	0.0317	-12%
PSE	0.038	0.0337	-11%
PFB	0.046	0.032	-30%
OP	Non déclarée	0.0312	/

Tableau 9 : Comparaison entre les valeurs de conductivité déclarées et les valeurs mesurées

- Chaleur massique

Les résultats de mesure de la chaleur massique sur les cinq isolants étudiés sont présentés dans le Tableau 10. Les chaleurs massiques sont respectivement de 928, 802, 1568, 1515 et 1189J/(kg.K) pour la LDV, la LDR, le PSE, le PFB et la OP. Les laines minérales (LDV et LDR) ont des chaleurs massiques assez similaires et plus faibles que les autres

isolants. La similitude entre ces deux chaleurs massiques est logique puisque les deux isolants sont issus d'une base minérale avec des propriétés intrinsèques proches. La chaleur massique de la LDR est ainsi très proche de celle du verre (720 J/(kg.K)) dont elle est principalement composée. Le PSE et le PFB ont également des chaleurs spécifiques assez proches, mais cette fois plus élevées. Le PFB se situe dans la fourchette moyenne des matériaux bois qui ont une chaleur massique comprise entre 1200 et 2700 J/(kg.K) (Deglise X., 2004). Concernant le PSE, les résultats sont équivalents à ceux obtenus en (Jerman M., 2012). La OP se situe entre les deux groupes de matériaux.

Isolant	Chaleur massique (J/(kg.K))
LDV	928
LDR	802
PSE	1568
PFB	1515
OP	1189

Tableau 10 : Valeurs de chaleur massique (J/(kg.K)) mesurées pour les isolants étudiés

- Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Les valeurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau mesurées sont présentées dans le Tableau 11. Pour chaque isolant, le coefficient de transmission de la vapeur d'eau g (mg/(m²h)), la perméance à la vapeur d'eau W (mg/(m².h.Pa)) et la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau Z ((m².h.Pa)/mg) sont donnés pour chacun des trois échantillons testés. Enfin, la valeur moyenne sur les trois échantillons du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ (-) et de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau S_d (m) est donnée.

Echantillon	Coefficient de transmission de la vapeur d'eau g (mg/(m ² .h))	Perméance à la vapeur d'eau W (mg/(m ² .h.Pa))	Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau Z (m ² .h.Pa)/mg	Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ (-)	Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau S_d (m)	Ecart type (-)
LDV_1	5152	3.91	0.3	2	0.2	0.027
LDV_2	5335	4.05	0.2			
LDV_3	5385	4.09	0.2			
LDR_1	5314	4.02	0.2	2	0.2	0
LDR_2	5370	4.07	0.2			
LDR_3	5417	4.10	0.2			
PSE_1	507	0.20	5.0	35	3.5	0.12
PSE_2	564	0.22	4.5			
PSE_3	522	0.21	4.9			
PFB_1	3877	2.95	0.3	4	0.2	0
PFB_2	3918	2.98	0.3			
PFB_3	3959	3.01	0.3			
OP_1	5018	3.81	0.3	2	0.2	0.027
OP_2	5328	4.05	0.2			
OP_3	5554	4.22	0.2			

Tableau 11 : Mesures des propriétés de transmission de la vapeur d'eau

Les facteurs de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau valent 2 pour la LDV, la LDR et la OP, 4 pour le PFB et 35 pour le PSE. Globalement les isolants fibreux peu denses se comportent de la même manière vis-à-vis de la diffusion de la vapeur d'eau. En effet, la LDV, la LDR et la OP ont tous les trois le même facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. Ceci s'explique par une structure de l'isolant qui est similaire (structure fibreuse). Le PFB a une résistance supérieure, égale à 4. Ceci est dû à sa forte densité, qui fait que ses fibres sont collées entre elles. La diffusion est donc plus lente. Le PSE a un comportement très différent, avec une résistance de 35. Ses pores très fermés ne laissent que très peu la vapeur d'eau se diffuser (Wyart D., 2008). Il faudra tenir compte de ces différences en concevant une paroi. A titre d'exemple, il ne sera pas nécessaire de placer un pare-vapeur devant un PSE puisque celui-ci joue lui-même ce rôle en ralentissant la diffusion de la vapeur. A l'inverse, le PSE ne pourra pas être utilisé dans des techniques de construction dites « respirantes »

- Coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle

Les résultats de mesures des coefficients d'absorption d'eau sont présentés dans le Tableau 12. Pour chaque isolant le type de graphe et le résultat de la mesure sur trois échantillons sont donnés. Pour chacun des isolants la valeur moyenne obtenue sur les trois échantillons est également indiquée. Les valeurs moyennes des coefficients d'absorption d'eau par immersion partielle sont respectivement de 0.02, 3.39×10^{-3} , 4.7×10^{-4} , 1.53×10^{-3} et 0.03 pour la LDV, la LDR, le PSE, le PFB et la OP.

Isolant	Type de graphe	$A_{w,24}$ ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$)	A ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$)	Ecart type ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$)
LDV_1	B	0.026	0.020	0.00307
LDV_2	B	0.020		
LDV_3	B	0.013		
LDR_1	B	4.26×10^{-3}	3.39×10^{-3}	0.00091
LDR_2	B	4.73×10^{-3}		
LDR_3	B	1.17×10^{-3}		
PSE_1	B	4.5×10^{-4}	4.7×10^{-4}	0.00001
PSE_2	B	5.0×10^{-4}		
PSE_3	B	4.7×10^{-4}		
PFB_1	A	1.65×10^{-3}	1.53×10^{-3}	0.00011
PFB_2	A	1.69×10^{-3}		
PFB_3	A	1.26×10^{-3}		
OP_1	B	0.030	0.030	0.00235
OP_2	B	0.035		
OP_3	B	0.025		

Tableau 12 : Résultats des mesures des coefficients d'absorption d'eau par immersion partielle

D'importantes différences entre les isolants sont constatables. Tout d'abord le PSE, avec un coefficient très faible n'absorbe presque pas d'eau de part ses pores très fermés. Ce phénomène est confirmé par (Jerman M., 2012) et (D., 2008). Ensuite, la LDR et le PFB qui en absorbent 10 fois plus, restent à un niveau d'absorption très faible comparé à la LDV et la

OP qui présentent des coefficients plus élevés encore. Ces valeurs restent cependant largement inférieures aux valeurs de 5.9 et 2.8 kg/(m².s^{0.5}) mesurées dans l'article de (Jerman M., 2012) pour des laines minérales traditionnelles

La Figure 49 présente les courbes obtenues pour chacun des isolants. Les courbes pour les trois échantillons testés par isolant ont été tracées. Pour la LDV, la LDR et le PFB, la courbe croît progressivement, ce qui traduit la remontée capillaire de l'eau dans les isolants. Pour le PSE et la OP, il y a plutôt une forte croissance sur les premières minutes suivie d'une stabilisation rapide. Cette stabilisation signifie que l'eau ne remonte plus dans l'isolant. Seule la face inférieure est humide et l'eau liquide ne se déplace pas dans l'isolant. Seule la courbe pour le PFB est de type A, c'est-à-dire linéaire. Les autres courbes sont toutes linéaires dans un premier temps puis changent de coefficient directeur. Les transports capillaires ne sont plus les mêmes une fois le matériau humide. Dans un premier temps, le matériau est sec et le transport capillaire est rapide. Dans un second temps, la partie inférieure du matériau est saturée et le transport capillaire n'est plus le même. Cela signifie en termes d'usage que lorsqu'un isolant sera au contact d'une source humide (béton frais par exemple), les premiers millimètres d'isolants risquent de vite s'imbiber d'eau, puis le transport capillaire va se ralentir et le reste de l'isolant restera sec.

Les courbes sont exprimées en fonction de la racine carrée du temps car l'absorption est très rapide au départ de l'essai, et tend à se ralentir par la suite. Les courbes obtenues sont linéaires, l'augmentation de la masse étant proportionnelle à la racine du temps.

- Courbe de sorption

Les Tableau 13, Tableau 14, Tableau 15, et Tableau 16 présentent les résultats des mesures réalisées respectivement pour la LDV, la LDR, le PFB et la OP. Pour chaque isolant, le tableau donne les densités (en kg/m³) et les teneurs en eau (en %M et en kg/m³) de trois échantillons à 50%, 80%, 93% et 97% d'humidité relative. La teneur en eau en dessous de 50% n'est pas déterminée car la teneur en eau est assez stable en dessous de 50% puisque à faible humidité relative la diffusion de la vapeur d'eau s'effectue dans le matériau sans adsorption. A l'inverse, plusieurs mesures sont réalisées pour des valeurs proches de 100% car quand l'hygrométrie est forte le matériau va beaucoup adsorber. Les dernières lignes présentent les résultats de mesure de la teneur en eau maximale sur trois échantillons. Cette teneur en eau ayant été obtenue par immersion.

Deux comportements selon l'isolant sont observés : les isolants comme la LDR et la OP n'absorbent pas d'humidité, même à 97% HR. Cela montre que ces isolants sont hydrophobes, c'est-à-dire qu'ils ne retiennent pas les particules d'eau. Seule l'immersion leur fait absorber de l'eau. Ceci s'explique par le fait que c'est surtout la forte porosité du matériau qui est responsable de l'absorption d'eau par immersion plutôt que le matériau lui-même (Jerman M., 2012). A l'inverse, le PFB absorbe de l'eau au fur et à mesure de l'augmentation de l'humidité relative. La LDV est plutôt dans le premier cas, mais elle absorbe tout de même 3 kg/m³ d'eau à 97%. Au niveau des teneurs en eau maximales, la OP se distingue par sa faible teneur en eau maximale avec environ 150kg/m³, suivie de la LDR avec environ 200kg/m³. La LDV a une teneur en eau maximale bien plus élevée avec 387.5kg/m³. Ces différences signifient que dans les transferts de vapeur dans une paroi isolée, les différents isolants ne retiendront pas la même quantité d'eau. A titre d'exemple, quand l'humidité relative dans la paroi sera de 80%, le PFB sera humide alors que la OP sera sèche. Ainsi le PFB aura sans doute une conductivité thermique plus élevée que sa valeur déclarée tandis que la OP aura une conductivité thermique moins impactée par l'humidité ambiante.

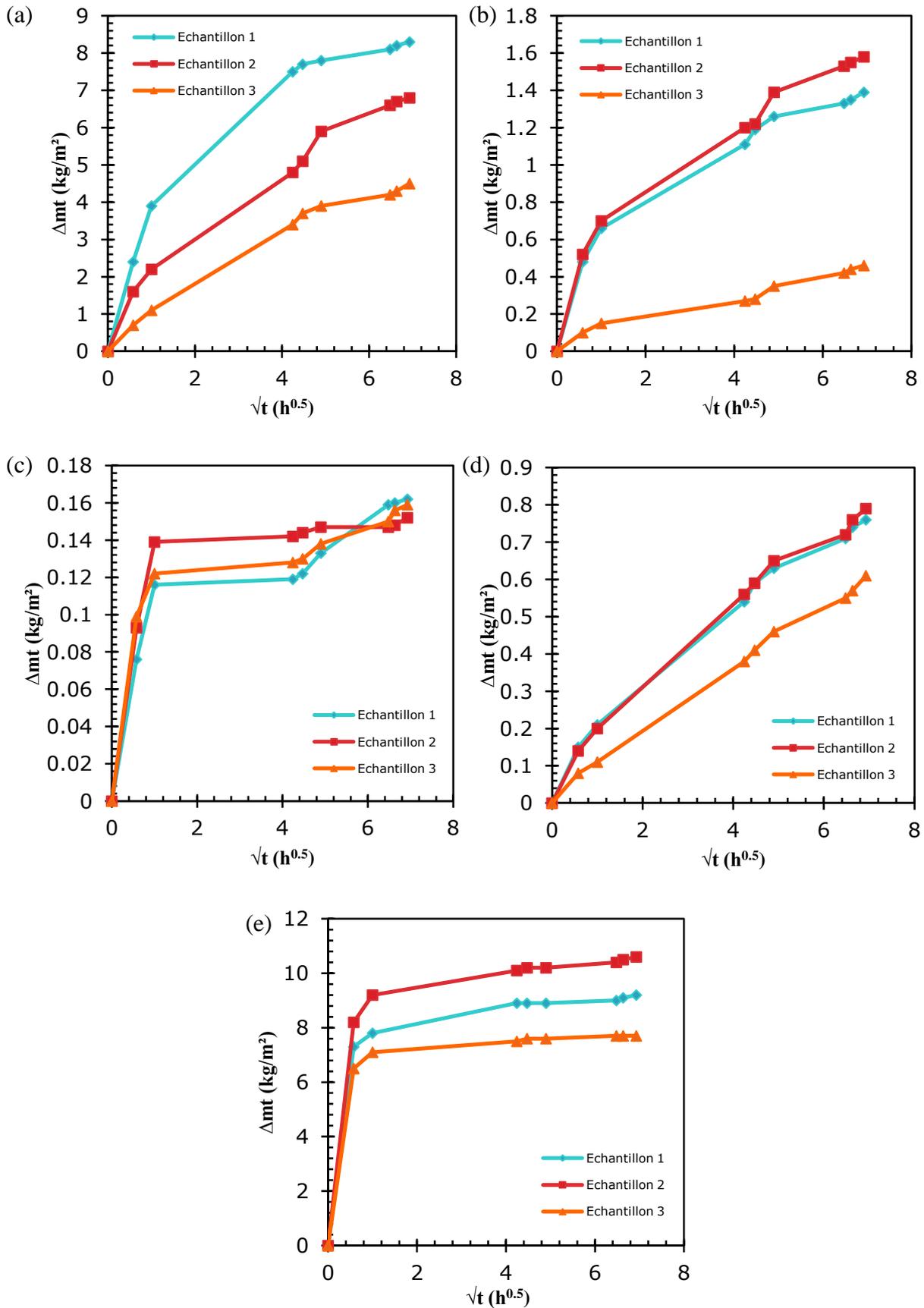


Figure 49 : Détermination du coefficient d'absorption par immersion partielle de la LDV (a), de la LDR (b), du PSE (c), du PFB (d) et de la OP (e)

LDV	Humidité relative (%)	Densité (kg/m ³)	Teneur en eau (%M)	Teneur en eau (kg/m ³)	Ecart type (kg/m ³)
LDV_1	50	34	1.24	0.4	0.027
LDV_2		33	1.39	0.5	
LDV_3		31	1.19	0.4	
LDV_1	80	34	1.76	0.6	0.027
LDV_2		33	1.67	0.6	
LDV_3		31	1.77	0.5	
LDV_1	93	34	3.39	1.2	0.027
LDV_2		33	3.36	1.1	
LDV_3		31	3.45	1.1	
LDV_1	97	34	9.09	3.1	0.072
LDV_2		33	8.39	2.8	
LDV_3		31	9.62	3.0	
LDV_1	100 (immersion)	34	1169.00	397.5	4.27
LDV_2		33	1229.00	405.6	
LDV_3		31	1250.00	387.5	

Tableau 13 : Résultats de mesure de la teneur en eau de la LDV en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant

LDR	Humidité relative (%)	Densité (kg/m ³)	Teneur en eau (%M)	Teneur en eau (kg/m ³)	Ecart type (kg/m ³)
LDR_1	50	37	0.82	0.3	0
LDR_2		40	0.75	0.3	
LDR_3		42	0.67	0.3	
LDR_1	80	37	0.67	0.2	0.027
LDR_2		40	0.73	0.3	
LDR_3		42	0.71	0.3	
LDR_1	93	37	0.64	0.2	0.027
LDR_2		40	0.62	0.2	
LDR_3		42	0.68	0.3	
LDR_1	97	37	1.33	0.5	0.072
LDR_2		40	1.66	0.7	
LDR_3		42	1.91	0.8	
LDR_1	100 (immersion)	37	461	170.6	12.25
LDR_2		40	532	212.8	
LDR_3		42	519	218.0	

Tableau 14 : Résultats de mesure de la teneur en eau de la LDR en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant

PFB	Humidité relative (%)	Densité (kg/m ³)	Teneur en eau (%M)	Teneur en eau (kg/m ³)	Ecart type (kg/m ³)
PFB_1	50	179	8.03	14.4	0.14
PFB_2		175	7.99	14.0	
PFB_3		175	7.89	13.8	
PFB_1	80	179	15.01	26.9	0.35
PFB_2		175	14.91	26.1	
PFB_3		175	14.52	25.4	
PFB_1	93	179	19.91	35.6	0.33
PFB_2		175	20.00	35.0	
PFB_3		175	19.52	34.2	
PFB_1	97	179	26.23	47.0	0.31
PFB_2		175	26.45	46.3	
PFB_3		175	26.11	45.7	
PFB_1	100 (immersion)	179	256.	458.2	2.12
PFB_2		175	261	456.8	
PFB_3		175	257	449.8	

Tableau 15 : Résultats de mesure de la teneur en eau du PFB en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant

OP	Humidité relative (%)	Densité (kg/m ³)	Teneur en eau (%M)	Teneur en eau (kg/m ³)	Ecart type (kg/m ³)
OP_1	50	20	1.37	0.3	0
OP_2		20	1.35	0.3	
OP_3		21	1.34	0.3	
OP_1	80	20	1.79	0.4	0
OP_2		20	1.76	0.4	
OP_3		21	1.91	0.4	
OP_1	93	20	1.65	0.3	0
OP_2		20	1.63	0.3	
OP_3		21	1.61	0.3	
OP_1	97	20	1.67	0.3	0
OP_2		20	1.69	0.3	
OP_3		21	1.57	0.3	
OP_1	100 (immersion)	20	746	149.2	7.84
OP_2		20	691	138.2	
OP_3		21	814	170.9	

Tableau 16 : Résultats de mesure de la teneur en eau de la OP en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant

2.1.3 Conclusion de la caractérisation hygrothermique de l'isolant

L'isolant développé dans le cadre de cette thèse est original de part sa composition et sa fabrication. Il est en partie issu du recyclage ce devrait lui assurer une énergie grise plus faible qu'un isolant traditionnel.

Par ailleurs, le travail qui a été présenté est une étude expérimentale qui a pour objectif de caractériser les principales propriétés thermiques et hygrométriques de l'isolant considéré pour le système Isolpac, et de le comparer à quatre isolants thermiques du marché pour le bâtiment. Parmi ces quatre isolants, la laine de verre, la laine de roche et le polystyrène expansé qui sont considérés comme traditionnels ont été caractérisés. Le dernier isolant, le panneau de fibres de bois est un isolant plus récent sur le marché. La caractérisation a porté sur la masse volumique, la conductivité thermique, la chaleur massique, le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, le coefficient d'absorption d'eau à long terme et la courbe de sorption. L'ensemble de ces données permettent de déterminer et de comparer le comportement hygrothermique des isolants. Ces mesures expérimentales ont été réalisées selon les normes adaptées aux produits.

La caractérisation expérimentale exprime les différences entre les cinq isolants ainsi que leurs performances. Tous les matériaux ont des masses volumiques relativement faibles comprises entre 15 et 30 kg/m³ mis à part le panneau de fibres de bois qui est plus dense avec 180kg/m³. Les conductivités thermiques diffèrent selon les isolants de 20% à basse température. Ainsi, la laine minérale a la conductivité thermique la plus faible (0.0281 W/mK), suivie de la laine de roche (0.0317W/mK) et de la ouate de polyester (0.0312 W/mK) qui ont des conductivités similaires, puis du panneau de fibre de bois (0.0320 W/mK) et enfin du PSE (0.0337 W/mK). Dans tous les cas la conductivité croît avec l'augmentation de la température. Cette augmentation est plus marquée pour le PSE et pour le panneau de fibre de bois avec une augmentation de 0.04% par degré. Les chaleurs massiques de la laine de verre et de la laine de roche sont proches et peu élevées. Celles du PSE et du Panneau de fibre de bois valent toutes deux près du double. La ouate de polyester se situe entre les deux groupes. Concernant le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, la laine de verre, la laine de roche et la ouate de polyester ont le même résultat avec une forte perméabilité et un coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau de 2. Le panneau de fibre de bois est moins perméable mais la valeur reste faible avec un coefficient qui vaut 4. En revanche, le PSE a une résistance à la diffusion bien plus élevée mesurée à 35. Les coefficients d'absorption d'eau à long terme de la laine de roche, du PSE et du panneau de fibre de bois sont très faibles en étant inférieurs à 0.005 kg/(m²s^{0.5}). Les coefficients pour la laine de verre et la ouate de polyester, qui sont similaires, sont plus élevés avec respectivement des mesures à 0.02 et 0.03 kg/(m²s^{0.5}). Les courbes de sorption sont différentes de par les différences de composition et de structure des isolants. Pour le PSE cette caractérisation ne peut pas se faire car le matériau n'absorbe pas de vapeur car ses pores sont fermés. En revanche, le panneau de fibre de bois absorbe la vapeur au fur et à mesure de l'augmentation de l'humidité relative. La laine de verre absorbe également mais dans une moindre mesure car sa teneur en eau à 97% reste inférieure à 10% de sa masse. La laine de roche et la ouate de polyester restent sèches même dans une ambiance fortement humide.

Cette détermination expérimentale montre que l'isolant développé dans le cadre de la thèse se distingue par sa faible adsorption d'eau en milieu humide, son faible poids et sa capacité à laisser passer la vapeur d'eau. Parmi les isolants caractérisés ici, il est donc le plus adapté aux besoins du nouveau système développé.

2.2 Caractérisation mécanique, de la perméabilité et de la réaction au feu de Toiles du marché et développement de toiles spécifiques

2.2.1 Méthode de sélection des toiles du marché à caractériser

2.2.1.1 Les matériaux textiles dans la construction

La construction est un des secteurs les plus dynamiques et promoteurs pour le textile. Les volumes de part de marché sont en constante augmentation (Carlac'h D., 8 mars 2006). La technicité et la performance des propriétés des matériaux composites et textiles ont considérablement évoluées notamment grâce à l'amélioration des procédés de fabrications, d'intégration et d'industrialisation de plus en plus pointus. Les nouvelles approches performantielles nécessitant de plus en plus de qualité, de durabilité et de contrôle ont incités les concepteurs à utiliser des nouveaux matériaux notamment les textiles dans le génie civil. A titre d'exemple les renforts textiles, notamment en carbone, sont utilisés depuis quelques années dans les bétons (Contamine R., January 2013). Les textiles sont également utilisés dans la construction sous la forme de panneaux non-tissés utilisés pour la filtration ou l'isolation thermique et acoustique des bâtiments (Briga-Sá A., 2013). Ils sont alors souvent issus du recyclage de vêtements usagés ou de matières plastiques.

Par ailleurs, les textiles sont de plus en plus utilisés sous forme de membranes pour réaliser des toitures. Par exemple, de nombreux stades de football ont leur toiture réalisée en textile, et un nombre important de stades qui vont être construits ou rénovés utilisent du textile. Ces matériaux présentent l'avantage d'être légers comparativement à une toiture traditionnelle. La structure porteuse peut ainsi être moins conséquente et des économies sont alors réalisées sur l'ensemble du projet. Les membranes commencent à apparaître également en façade pour les mêmes raisons. En France, le Zénith de Strasbourg est un bel exemple d'utilisation du textile en façade (Chessa M., 2009).

Dans le cadre de cette thèse, deux textiles sont à développer : l'un appelé « toile intérieure » est le textile positionné coté façade, qui doit servir de support d'accroche du panneau sur la façade et bloquer le flux de vapeur d'eau qui va de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment. Le second, appelé « toile extérieure », fait office de parement de façade. Il doit être particulièrement résistant aux agressions extérieures (UV, pluie...) et être perméable à la vapeur d'eau tout en restant étanche à l'eau de pluie.

2.2.1.2 Présentation des textiles du marché caractérisés

Pour sélectionner et développer des textiles capables de répondre à l'un ou l'autre de ces besoins, une campagne de caractérisation et d'essais a été effectuée sur une première série de 11 toiles, afin de déterminer lesquelles sont à-même d'être utilisées ou adaptées pour le système Isolpac. Par la suite, les 11 toiles sont chacune identifiées par un nombre allant de 0 à 10. Quand il est nécessaire de préciser l'orientation de la toile considérée (chaîne ou trame), le numéro est complété d'une lettre « C » pour le sens chaîne, et « T » pour le sens trame.

Les 11 toiles sont commercialisées. Le Tableau 17 donne les fournisseurs et références de ces toiles. 4 fournisseurs ont été sélectionnés. Tout d'abord Dickson, qui travaille en collaboration avec nous sur le projet de recherche et qui a proposé 4 de ses références commerciales. La toile 0 est le « Sunworker » qui est un tissu en polyester enduit de Polychlorure de Vinyle (PVC). C'est-à-dire que le tissu a été trempé dans un bain de PVC qui s'est ensuite solidifié autour des fibres de polyester. Le tissage du Sunworker est réalisé de manière large et l'enduction est assez fine pour que le tissu ne soit pas plein. Des vides sont ainsi présents à chaque maille. La toile obtenue est donc une « grille » non étanche, et qui laisse passer une partie des rayons lumineux qui l'atteignent. La toile 1 est la même toile sur laquelle un film PVC a été contrecollé afin de rendre la toile étanche. Le film PVC contrecollé dessus est translucide. La toile finale est rendue étanche mais laisse toujours passer un peu de lumière. Elle est dénommée « Sunworker Cristal ». La toile 2 est également basée sur la toile 0 mais cette fois le film PVC contrecollé dessus est opaque. La toile finale est également étanche mais n'est plus translucide. Elle est ainsi commercialement dénommée « Sunworker Opaque ». La dernière toile proposée par Dickson, la toile 3, a pour dénomination « Arcade ». Il s'agit d'un tissu de polyester enduit de PVC. Contrairement à la toile 0, la toile 3 est un tissu plein c'est à dire que l'enduction recouvre l'intégralité du tissu en créant une épaisseur continue et étanche. Ce type de toile est communément appelé « bâche » dans le domaine du textile.

Afin de comparer ces toiles avec d'autres toiles du marché, d'autres toiles provenant d'autres fournisseurs ont été caractérisées. Les toiles recherchées sont de type « pare-pluie », c'est-à-dire des toiles utilisées communément sous des bardages extérieurs pour protéger l'isolant en cas d'infiltration d'eau sous le bardage. Ce choix est issu des études réalisées sur les flux de vapeur hygrothermiques. Ainsi, coté extérieur de l'isolant, il nous faut une toile du type « pare-pluie » qui va être étanche mais respirante, ce qui est normalement le cas des pare-pluie.

Identification	Fournisseur	Produit
0	Dickson	Sunworker
1	Dickson	Sunworker Cristal
2	Dickson	Sunworker Opaque
3	Dickson	Arcade
4	Ferrari	Stamisol FA
5	Ferrari	Stamisol FI
6	Ferrari	Stamisol Color
7	Dupont Tyvek	Pare-pluie HPV
8	Dupont Tyvek	UV Façade
9	Dupont Tyvek	Enercor Mur
10	Pro Clima	Solitex UD

Tableau 17 : Fournisseurs et références des 11 premières toiles caractérisées

Parmi les fournisseurs de pare-pluie, Ferrari, Dupont Tyvek et Pro Clima ont été retenus. Les toiles 4, 5 et 6 de Ferrari sont toutes de la gamme Stamisol, leur gamme de pare-pluie. Il s'agit d'un non-tissé de polyester et de verre sur lequel sont contrecollées des couches de polyacryliques. C'est le nombre de couches polyacryliques qui différencie les trois produits :

le « Stamisol FI » en possède une, le « Stamisol FA » en possède deux, tandis que le « Stamisol Color » en possède 3. Concernant les pare-pluies de Dupont Tyvek, les références choisies sont le « pare-pluie HPV » qui est une membrane en polyéthylène (PE) haute densité, le « UV Façade », en polyéthylène (PE) et polypropylène (PP) haute densité, et le « Enercor Mur », en PE haute densité métallisé. Chez le fournisseur Pro Clima, le « Solitex UD » a été caractérisé. Le produit est composé de trois couches : un non-tissé de couverture en microfibres de PP, un film TEEE (Thermoplastique Elastomère-Ether-Ester) monolithique et un non-tissé de protection en microfibres de PP.

L'objectif de la caractérisation de ces 11 toiles est de sélectionner parmi celles-ci la toile intérieure et la toile extérieure qui conviendront au système Isolpac. Dans le cas où aucune ne conviendrait pour l'une ou l'autre de ces toiles, le développement d'une toile spécifique sera nécessaire.

2.2.2 Caractérisation mécanique, de la perméabilité et de la réaction au feu des toiles du marché

2.2.2.1 Caractérisation mécanique

Les caractéristiques mécaniques des toiles sont des propriétés déterminantes dans le choix des toiles à utiliser dans le système Isolpac. Trois propriétés sont ici considérées : la première est la résistance à la traction, autrement appelée résistance dynamométrique, la seconde est le module d'Young, qui est déduit des courbes force-allongement obtenues en réalisant l'essai de traction. La dernière est la résistance à la déchirure au clou.

Résistance à la traction et module d'Young

Méthode

J'ai déterminé la résistance à la traction selon la norme NF EN 12311-1 (AFNOR, Décembre 1999). Des éprouvettes de 300x50mm² ont été découpées dans le rouleau fourni par l'industriel. Les éprouvettes ont été conditionnées pendant 48h dans l'ambiance du laboratoire (température de 25±5°C et humidité relative comprise entre 30 et 70%). Elles ont été ensuite fixées dans les mâchoires d'un appareil de traction doté d'un système d'enregistrement continu de la force. Les éprouvettes ont été fixées dans les mâchoires de façon à ce que l'écartement entre les mâchoires soit de 200mm. L'appareil dispose d'une mâchoire inférieure fixe et d'une mâchoire supérieure qui se déplace vers le haut à une vitesse constante de 100±10mm/min. L'éprouvette est ainsi étirée jusqu'à rupture.

La résistance à la traction de la toile est la valeur maximale obtenue lors de l'essai.

Pour chaque toile caractérisée, 5 échantillons ont été testés en sens trame, et 5 échantillons ont été testés en sens chaîne.

Le module d'Young est calculé directement à partir de la courbe « Force-Allongement » fournie par l'essai de traction.

Résultats et analyse

Les résultats de mesures sont présentés dans le Tableau 18. Les résistances à la traction en chaîne et en trame ainsi que le Module d'Young sont donnés pour chacune des 11 toiles étudiées. Une importante différence entre les valeurs obtenues pour les 4 premières toiles et les autres est constatée. En effet, ces 4 premières toiles sont près de 10 fois plus résistantes en moyenne que les autres toiles. Ceci s'explique par la différence de domaine d'application de ces toiles : les 4 premières toiles, sont celles de Dickson, et sont principalement utilisées pour la réalisation de stores, auvents... Elles sont donc conçues pour résister aux sollicitations du vent. En revanche, les autres toiles, qui sont des pare-pluies, sont dans leur utilisation protégées du vent par un bardage, les sollicitations mécaniques sur ces toiles sont donc relativement faibles.

Référence	Résistance à la traction (N/50mm) (chaîne)	Résistance à la traction (N/50mm) (trame)	Module d'Young (kPa) (chaîne)	Module d'Young (kPa) (trame)
0	2140	1185		1720
1	2535	1680	2730	1140
2	2360	1555	3135	1295
3	1470	1310	1935	770
4	280	310	720	985
5	215	195	430	360
6	400	520	1325	2235
7	280	280	470	450
8	360	415	705	945
9	220	165	425	260
10	245	175	205	145

Tableau 18 : Résultats des mesures de résistance à la traction et des calculs de module d'Young

Résistance à la déchirure au clou

Les textiles considérés ici peuvent être amenés à être percés d'un clou, d'une vis ou soumis à d'autres efforts ponctuels au cours de leur utilisation. La détermination de cette propriété est donc primordiale.

Méthode

J'ai déterminé la résistance à la déchirure au clou selon la norme NF EN 12310-1 (AFNOR, Décembre 1999). Des éprouvettes de 200x100mm² ont été découpées dans le rouleau fourni par l'industriel. Les éprouvettes neuves comme vieilles ont été conditionnées pendant 48h dans l'ambiance du laboratoire (température de 25±5°C et humidité relative comprise entre 30 et 70%). Elles ont ensuite été fixées dans l'appareil utilisé pour la détermination de la résistance à la traction. La Figure 50 représente le dispositif expérimental. L'éprouvette est d'une part pincée dans la mâchoire supérieure (1), et d'autre part traversée par un clou (2) qui est lui-même fixé dans un étrier (3). L'étrier est pincé dans la mâchoire inférieure qui est fixe. La mâchoire supérieure se déplace à 100mm/min vers le haut. L'éprouvette se déchire au niveau du clou jusqu'à rupture.

La résistance à la déchirure au clou de la toile est la valeur maximale obtenue lors de l'essai

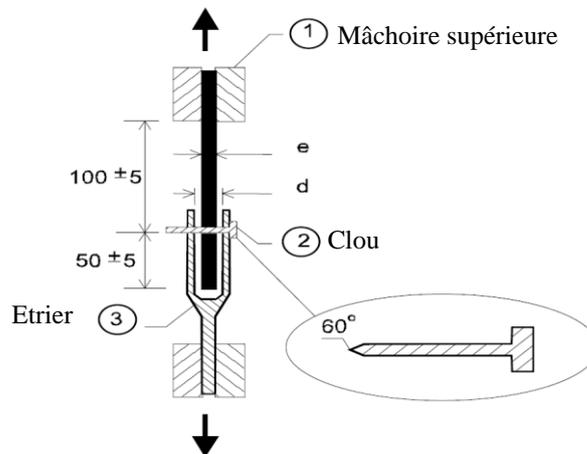


Figure 50 : Dispositif d'essai de mesure de la résistance à la déchirure au clou (AFNOR, Décembre 1999).

Pour chacune des toiles, 5 échantillons ont été testés dans le sens chaîne, ainsi que 5 échantillons dans le sens trame. L'essai est en fait similaire à l'essai précédent mais avec une contrainte sur la toile qui est ponctuelle plutôt que linéaire.

Résultats et analyse

Les résultats de mesure sont présentés dans le Tableau 19. Les résistances à la déchirure au clou sont données pour chacune des 11 toiles considérées. Comme pour la résistance à la rupture, il peut être remarqué globalement que les 3 premières toiles, celles de Dickson, sont bien plus résistantes que les autres toiles, le rapport allant de plus de 4 à plus de 25.

Référence	Résistance à la déchirure au clou (N) (chaîne)	Résistance à la déchirure au clou (N) (trame)
0	860	1040
1	795	1335
2	845	1090
3	200	170
4	200	185
5	55	55
6	260	275
7	50	50
8	300	310
9	80	85
10	160	160

Tableau 19 : Résultats des mesures de résistance à la déchirure au clou en chaîne et en trame pour les 11 toiles étudiées

2.2.2.2 Détermination de l'étanchéité des toiles

Définition et méthode

Le terme « étanchéité » est défini par : « le résultat de l'interdiction d'un passage ». Ce terme général peut donc avoir plusieurs significations que l'on parle d'un solide, d'un liquide d'un gaz... Dans le cas présent, le terme étanchéité sera utilisé selon sa définition la plus courante dans le domaine du textile : il s'agit de l'étanchéité d'une toile à l'eau liquide, c'est-à-dire la capacité qu'aura la toile à ne pas se laisser traverser par de l'eau sous forme liquide. Cette définition est aussi celle utilisée en construction et architecture dans la définition du rôle d'un pare-pluie. En effet, le rôle de cet élément est bien de s'assurer que l'eau de pluie ne puisse le traverser et atteindre des matériaux qui doivent rester secs.

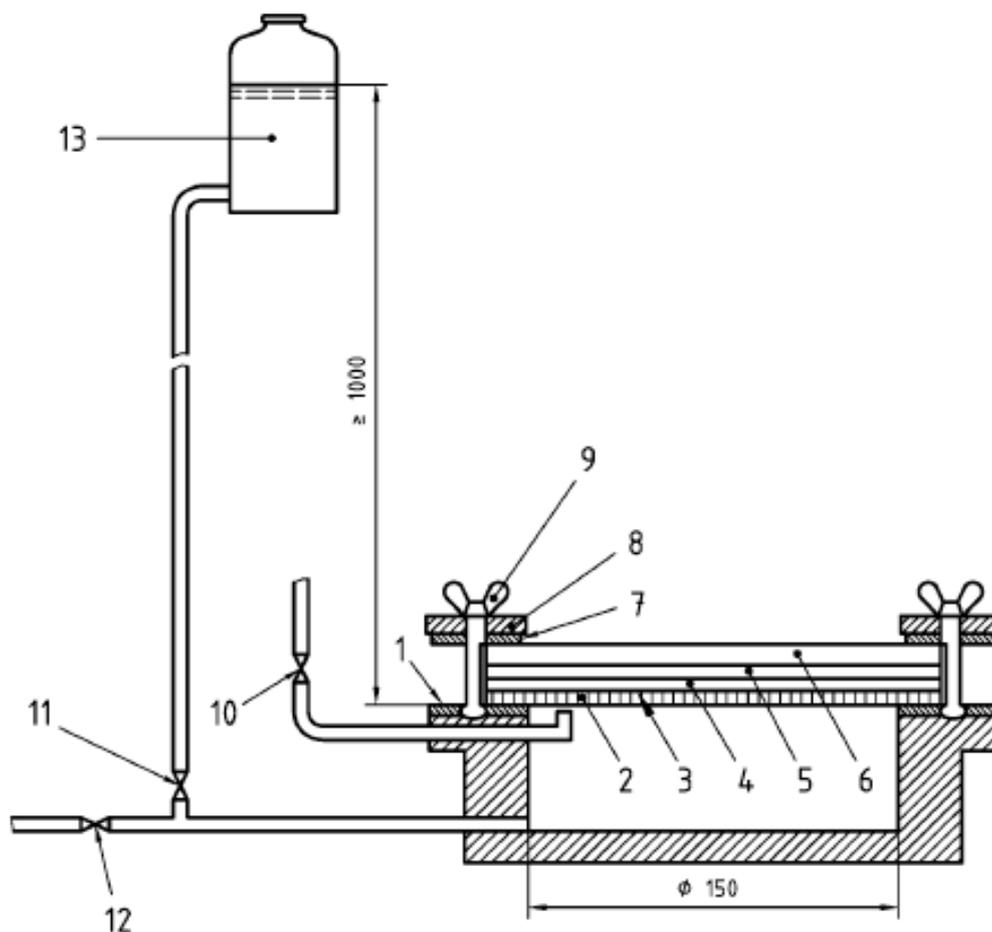
L'étanchéité à l'eau liquide d'un textile se mesure par l'essai dit « Schmerber », notamment décrit pour les pare-pluies dans la norme NF EN 1928 (AFNOR, Juillet 2000). L'essai consiste à appliquer une pression sur les toiles par l'intermédiaire d'une colonne d'eau. Les pressions auxquelles peuvent résister les toiles peuvent ainsi être déterminées. Pour les pare-pluies, il est exigé que les toiles résistent à une pression minimale de 200mm de colonne d'eau.

La Figure 51 montre le dispositif utilisé. Une boîte métallique cylindrique avec bride, d'un diamètre intérieur de 150 mm, est connectée à un tuyau ou à un réservoir, avec mise à l'air libre situé à une hauteur d'au moins 1 m au-dessus de la bride.

Une éprouvette circulaire d'un diamètre de 200 ± 2 mm est placée dans la boîte. Un papier filtre de laboratoire est ajouté par-dessus. L'éprouvette est ensuite soumise à une pression d'eau allant jusqu'à 60 kPa pendant une durée de 2h. L'éprouvette est ensuite examinée pour voir s'il y a eu décoloration du papier filtre. La feuille est considérée comme étanche si sur trois éprouvettes, aucune n'a montré un passage d'eau visible sur le papier filtre.

J'ai réalisé les essais sur un appareil WSP 3600 acquis par l'Ecole Centrale de Lille grâce à un financement FEDER dans le cadre du FUI décrit au 1.4.1.3. L'appareil permet d'appliquer des pressions allant jusqu'à 1200mm de colonne d'eau et de tester l'étanchéité de trois éprouvettes en même temps. La Figure 52 montre une photo de l'appareil utilisé. La colonne d'eau ainsi que les trois emplacements où sont placées les éprouvettes sont visibles.

Parmi les 11 toiles précédemment décrites, seules les toiles numérotées 1 à 10 ont été soumises à une pression de colonne d'eau de 200mm pendant 2h, pour vérification de leur étanchéité au sens du pare-pluie. La toile 0 étant d'office connue comme non étanche puisque étant perforée.



Légende

- 1 Joint d'étanchéité inférieur en caoutchouc
- 2 Éprouvette positionnée de telle façon que la face normalement exposée aux intempéries ou à l'humidité soit au contact de l'eau pendant l'essai
- 3 Papier-filtre de laboratoire
- 4 Indicateur d'humidité, répandu uniformément sur la surface de l'éprouvette. La détection de l'humidité traversant l'éprouvette est efficacement réalisée par un indicateur constitué d'un mélange de sucre blanc fin (99,5 % sucre glace) et de teinture de bleu de méthylène (0,5 %), filtré sur un tamis à mailles de 0,074 mm et séché dans un dessiccateur à l'aide de chlorure de calcium
- 5 Papier-filtre de laboratoire
- 6 Verre ordinaire circulaire :
— d'épaisseur 5 mm pour des pressions < 10 kPa
— d'épaisseur 8 mm pour des pressions < 60 kPa
- 7 Joint d'étanchéité supérieur en caoutchouc
- 8 Bride de serrage en acier
- 9 Écrous papillon
- 10 Vanne de mise à l'air libre
- 11 Vanne d'arrivée d'eau
- 12 Vanne d'alimentation et de vidange
- 13 Dispositif de mise sous pression et de contrôle de la pression jusqu'à 60 kPa

Figure 51 : Dispositif d'essai de mesure de l'étanchéité d'une toile



Figure 52 : Photo de l'appareil WSP 3600 de l'Ecole Centrale de Lille

Résultats et analyse

Les résultats de l'essai de mesure d'étanchéité sur des toiles numérotées 1 à 10, à une pression de 200mm de colonne d'eau pendant 2h sont présentés dans le Tableau 20. Pour chacune des toiles, trois échantillons ont été soumis à l'essai. Il est indiqué si chacune des éprouvettes a résisté à la pression ou non.

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
1	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai
2	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai
3	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai
4	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai
5	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	n'a pas résisté à l'essai
6	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai
7	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai
8	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai
9	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai
10	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai	a résisté à l'essai

Tableau 20: Résultats des essais de mesure d'étanchéité à une pression de 200mm de colonne d'eau pendant 2h, sur les toiles 1 à 10 et pour chacun des échantillons testés.

En théorie, les toiles 4 à 10 étant commercialisées en tant que Pare-pluies pour le bâtiment, l'ensemble de ces toiles auraient du résister à une pression de 200mm de colonne d'eau. Ici, l'ensemble des éprouvettes ont résistées à l'essai mis à part l'éprouvette 3 de la toile 5. La conclusion est donc que seule la toile 5 n'est pas étanche à la pression considérée, malgré sa commercialisation comme «pare-pluie ».

2.2.2.3 Mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau des toiles

Méthode

La perméabilité à la vapeur d'eau est une propriété déterminante dans le choix des toiles adaptées au système d'isolation. Pour cette raison, cette propriété doit être caractérisée. La toile 0 étant perforée, il est inutile de mesurer sa perméabilité à la vapeur d'eau, car il est évident qu'elle ne sera pas une barrière à la diffusion de la vapeur d'eau, et que donc il est possible de considérer que sa résistance à la diffusion est équivalente à celle de l'air, c'est-à-dire égale à 1. La mesure a donc été effectuée pour les toiles 1 à 10.

La méthode utilisée est similaire à celle utilisée sur les isolants et décrite au 2.1.2.3. La norme de référence est la NF EN 1931 (Octobre 2000). L'ensemble des mesures ont été effectuées au Laboratoire National d'Essai (LNE).

Résultats et analyse

Les résultats de mesure sont présentés dans le Tableau 21. La perméance à la vapeur d'eau, la perméabilité à la vapeur d'eau, le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau ainsi que l'épaisseur d'air équivalente sont donnés pour chacune des 10 toiles considérées.

Référence	perméance à la vapeur d'eau W (kg/m ² .s.Pa)	perméabilité à la vapeur d'eau δ (kg/(m.s.Pa)	Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	Epaisseur d'air équivalente S_d (m)
1	3.77E-11	1.96E-14	9692	5.04
2	5.79E-11	2.61E-14	7292	3.28
3	3.35E-11	1.27E-14	14925	5.67
4	1.1E-09	3.30E-13	576	0.17
5	7.59E-09	2.28E-12	83	0.03
6	3.19E-09	2.39E-12	79	0.06
7	5.39E-09	9.43E-13	201	0.04
8	3.28E-09	1.97E-12	97	0.06
9	2.59E-09	5.70E-13	333	0.07
10	2.41E-09	1.21E-12	158	0.08

Tableau 21 : résultats de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau des toiles considérées

Les toiles 1 à 3 ont des valeurs S_d supérieures à 3m. Ces toiles, mêmes si elles font moins d'un millimètre d'épaisseur sont équivalentes à plusieurs mètres de lame d'air vis-à-vis de la diffusion de la vapeur d'eau. Ils peuvent donc être considérés comme des freins-vapeurs. Concernant les toiles 4 à 10, les valeurs S_d sont de l'ordre de 0.1m. Ces toiles peuvent ainsi être considérées comme perméables à la vapeur d'eau puisque qu'elles ne ralentissent que très peu la diffusion de la vapeur d'eau comparé à l'air. Il est rassurant d'avoir trouvé de faibles valeurs pour ces toiles, puisqu'en tant que pare-pluie, elles sont placées coté extérieur du bâtiment et doivent donc laisser la vapeur d'eau s'échapper de la paroi pour ne pas créer de désordres (Rhônalpénergie Environnement, ADEME, avril 2010).

Dans le cas de la conception du système Isolpac, il faut une toile intérieure qui va ralentir la diffusion de vapeur, et une toile extérieure qui sera quant à elle perméable. Typiquement, placer une toile parmi les toiles 1, 2, et 3 à l'intérieur et l'une des toiles 4 à 10 à l'extérieur devrait convenir pour s'assurer qu'il n'y ait pas de condensation de vapeur dans le système. Cette affirmation doit être vérifiée par de plus amples simulations maintenant que les toiles ont été caractérisées.

2.2.2.4 Détermination de la Chaleur massique des toiles

Méthode

La chaleur massique des 11 toiles a été mesurée suivant le protocole décrit au 2.1.2.3.

Résultats et analyse

Les résultats de mesure sont présentés dans le Tableau 22 pour les toiles 1 à 10. Trois groupes de toiles peuvent être distingués selon les résultats. Les toiles 1 à 3 ont une chaleur massique apparente de l'ordre de 1300 J/(kg.K), les toiles 4 à 6 de l'ordre de 1150 J/(kg.K) et les toiles 7 à 10 de l'ordre de 1850 J/(kg.K). Ceci s'explique par la nature des toiles. En effet, les trois premières sont composées majoritairement du même matériau : le PVC. Il est donc logique d'obtenir des résultats très proches pour ces trois toiles. Il en est de même pour les toiles 4 à 6, toutes composées principalement de polyacrylique. Elles ont donc toutes des chaleurs massiques assez proches les unes des autres. Enfin, les toiles 7 à 10 sont composées principalement de PP et de PE.

Référence de l'échantillon	Température au maximum du pic enthalpique (°C)	Chaleur massique apparente (J/(kg.K))
1	28.35	1304
2	30.33	1273
3	29.36	1381
4	29.33	1162
5	29.33	1180
6	27.31	1184
7	27.32	1904
8	27.35	1923
9	27.34	1863
10	27.35	1797

Tableau 22: Résultat des mesures de chaleur massique

2.2.2.5 Analyse des classements de réaction au feu des toiles

Méthode

La réaction au feu des matériaux de construction est une donnée importante puisque la réglementation incendie limite les cas d'application des matériaux selon leur capacité à résister à une inflammation. Dans le cas d'Isolpac, c'est l'ensemble du système Isolpac qui devra être caractérisé vis-à-vis de sa réaction au feu afin de respecter cette réglementation. Néanmoins, dans une première étape de choix des matériaux qui composeront le panneau complet, il est important de pouvoir connaître les performances individuelles de chacun des matériaux.

L'essai de réaction au feu propre aux toiles est décrit dans la norme NF P 92-503 (AFNOR, Décembre 1995). Suite à cet essai, il est possible de donner un classement aux toiles : le classement M, décrit dans la norme NF P 92-507 (AFNOR, Février 2004). Un matériau peut être M0, M1, M2, M3 ou M4. Un matériau classé M0 est ininflammable. Plus un matériau s'enflamme facilement, plus son classement tend vers le M4.

Résultats et analyse

Le Tableau 23 donne les classements au feu des toiles caractérisées. Seules les toiles produites par Dickson notre partenaire ont été caractérisées dans le cadre de cette recherche. Pour les autres toiles, se sont les données fabricants qui sont données quand elles existent. Il peut être observé tout d'abord qu'aucune des toiles n'est M0. Les toiles 0 à 2 et la toile 5 sont M1, c'est-à-dire faiblement inflammable, tandis que les toiles 3 et 6 sont M2 et la toile 4 est M3.

Référence de l'échantillon	Classement M
0	M1 ⁽¹⁾
1	M1 ⁽¹⁾
2	M1 ⁽¹⁾
3	M2 ⁽¹⁾
4	M3 ⁽²⁾
5	M1 ⁽²⁾
6	M2 ⁽²⁾
7	Non déclaré
8	Non déclaré
9	Non déclaré
10	Non déclaré

⁽¹⁾ Mesure faite par le partenaire

⁽²⁾ Déclaration du fabricant

Tableau 23 : Classement au feu des 11 toiles considérées

2.2.2.6 Conclusion de la caractérisation mécanique, de perméabilité et de réaction au feu des différentes toiles du marché

Les résultats de la caractérisation des 11 toiles sont synthétisés dans le Tableau 24. Pour chaque toile, la chaleur massique, la résistance au transfert de la vapeur d'eau, le résultat de la mesure d'étanchéité pour une pression de 200mm, la résistance à la traction en chaîne et en trame, la résistance à la déchirure au clou en chaîne et en trame ainsi que le classement au feu sont donnés.

Pour une meilleure lisibilité, des couleurs ont été attribuées selon les valeurs obtenues. Pour la résistance au transfert de vapeur d'eau, une couleur rouge correspond à une valeur élevée relativement aux autres valeurs, tandis qu'une couleur verte correspond à une valeur faible. Pour l'étanchéité, la couleur verte est attribuée à une toile étanche et la couleur rouge à une toile non étanche. Pour l'ensemble des essais de résistance mécanique, une couleur verte est attribuée aux fortes résistances et une couleur rouge aux plus faibles. Pour le classement M, une couleur verte foncée est attribuée aux toiles M1, verte clair aux toiles M2, orange aux toiles M3 et rouge aux toiles non classées.

On observe ainsi clairement deux groupes de toiles : les toiles 1 à 3 plutôt imperméables à la vapeur d'eau (résistance à la vapeur d'eau en rouge) mais résistantes mécaniquement (résistances à la traction et à la déchirure en vert), et les toiles 4 à 10 au contraire plutôt perméables à la vapeur d'eau (résistance au transfert de vapeur d'eau en vert) mais moins résistantes mécaniquement (résistances à la traction et à la déchirure en rouge).

Echantillon	Chaleur massique (J/(kg.K))	Résistance au transfert de vapeur d'eau S_d (m)	Etanchéité (200mm)	Résistance à la traction (N/50mm) (chaîne)	Résistance à la traction (N/50mm) (trame)	Résistance à la déchirure au clou (N) (chaîne)	Résistance à la déchirure au clou (N) (trame)	Classement M
0		0	NON OK	2140	1185	860	1040	M1
1	1304	5.04	1200	2535	1680	795	1335	M1
2	1273	3.28	1200	2360	1555	845	1090	M1
3	1381	5.67	1200	1470	1310	200	170	M2
4	1162	0.17	OK	280	310	200	185	M3
5	1180	0.03	NON OK	215	195	55	55	M1
6	1184	0.06	OK	400	520	260	275	M2
7	1904	0.04	OK	280	280	50	50	-
8	1923	0.06	OK	360	415	300	310	-
9	1863	0.07	OK	220	165	80	85	-
10	1797	0.08	OK	245	175	160	160	-

Tableau 24 : Synthèse des résultats obtenus pour les 11 toiles considérées

Or pour les besoins du système, il convient de retenir deux toiles : l'une perméable et l'autre imperméable à la vapeur d'eau. Elles doivent être toutes les deux étanches à l'eau, résistantes mécaniquement et être de classement M1 ou M2 à minima. Il peut être noté dans ce tableau que les toiles 1 à 3 peuvent convenir pour l'un des types de toiles : la toile intérieure qui doit être imperméable à la vapeur. Pour la toile extérieure, aucune de ces toiles ne peut répondre au besoin car l'ensemble des toiles perméables à la vapeur ne sont pas suffisamment résistantes mécaniquement.

La toile intérieure peut donc être retenue dans un premier temps parmi les toiles 1 à 3. Il convient en revanche de développer une nouvelle toile pour faire office de toile extérieure. La caractérisation des 11 toiles et le Tableau 24 nous permettent d'envisager une solution : La toile 0, non étanche mais suffisamment résistante peut être assemblée avec une toile

perméable à la vapeur d'eau et moins résistante. Le résultat obtenu devrait être une toile perméable à la vapeur et résistante mécaniquement.

2.2.2.7 Développement d'une nouvelle toile « extérieure »

La première série de caractérisation des toiles a mis en évidence la nécessité de développer un produit spécifique pour la toile « extérieure ». L'analyse des résultats montre qu'une solution pourrait être de réaliser une combinaison entre deux types de toiles : l'une dite « support » qui serait non étanche et résistante mécaniquement et l'autre qui serait étanche et perméable à la vapeur d'eau.

Afin d'obtenir à la fois une résistance mécanique suffisante et une forte perméabilité à la vapeur d'eau, il a été décidé de partir de la toile 0, le Sunworker de chez Dickson, et de lui associer une fine membrane perméable. En effet, comme vu précédemment la toile 0 présente une bonne résistance mécanique mais n'est pas étanche. Elle ne peut donc à elle seule répondre au cahier des charges industriel. Mais si une membrane étanche et perméable lui est associée, la toile obtenue présentera alors les propriétés nécessaires au système Isolpac. La Figure 53 illustre cette idée.

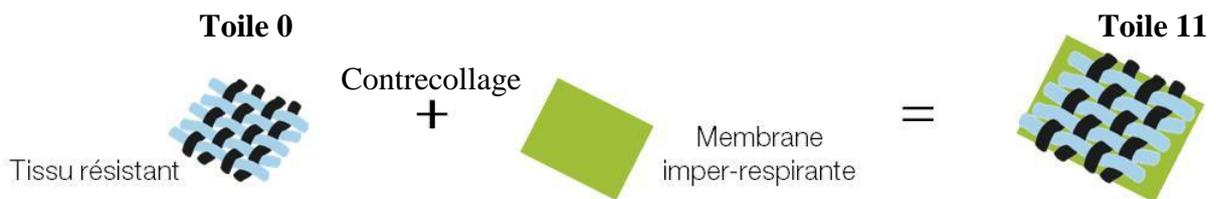


Figure 53 : Schéma illustrant l'obtention de la toile 11

La membrane retenue est une membrane en PTFE. La membrane est contrecollée à la toile 0. La toile obtenue, appelée « Sunworker PTFE » sera notée toile 11 par la suite.

La photo de la toile 11 est donnée Figure 54. Il peut être observé que le tissage du Sunworker est réalisé de manière large et l'enduction est assez fine pour que le tissu ne soit pas plein. Des vides sont ainsi présents à chaque maille. La membrane PTFE est observable en blanc derrière le Sunworker. Cette membrane doit rendre le textile Sunworker PTFE étanche en fermant l'ensemble des ouvertures, cependant, la membrane est suffisamment fine pour être perméable à la vapeur d'eau.



Figure 54 : Photo prise au microscope de la toile 11

La toile 11 a été caractérisée selon les mêmes protocoles d'essai que pour les 11 autres toiles précédemment caractérisées. Ces essais étant décrits au 2.2.2, ils ne sont pas à nouveau décrits ici.

Les résultats des essais sur la toile 11 sont synthétisés dans le Tableau 25. La résistance au transfert de vapeur d'eau, l'étanchéité à 200mm, la résistance à la traction, la résistance à la déchirure au clou et le classement M sont donnés. Il est ainsi vérifié notamment que la toile obtenue est bien perméable puisque sa résistance au transfert de vapeur d'eau S_d vaut 0.03m. Par ailleurs, la toile 11 présente bien également de bonnes propriétés mécaniques puisque sa résistance à la traction est supérieure à 1000N/50mm et sa résistance à la déchirure au clou est supérieure à 1000N. Enfin la toile est classée M1. La toile obtenue répond donc aux besoins spécifiques liés au système Isolpac.

Echantillon	Résistance au transfert de vapeur d'eau S_d (m)	Etanchéité (200mm)	Résistance à la traction (N/50mm) (chaîne)	Résistance à la traction (N/50mm) (trame)	Résistance à la déchirure au clou (N) (chaîne)	Résistance à la déchirure au clou (N) (trame)	Classement M
11	0.03	OK	2140	1260	860	1040	M1

Tableau 25 : Résultats d'essais de caractérisation de la toile extérieure

Cette toile peut donc être retenue comme toile extérieure et faire office de parement pour le bâtiment.

2.2.2.8 Choix de la toile intérieure

Contrairement à la toile extérieure, la toile « intérieure » pouvait être choisie parmi les toiles du commerce caractérisées. En effet, les toiles 1 à 3 possèdent des propriétés suffisantes pour le système Isolpac. La réaction au feu de la toile 3 étant moins bonne que pour les deux autres, cette toile est écartée. Le choix entre les toiles 1 et 2 est purement économique. La toile 2 étant moins couteuse à produire, c'est celle-ci qui est retenue.

La toile intérieure retenue est donc la Sunworker Opaque fabriquée par le partenaire Dickson.

Le Tableau 26 récapitule les propriétés de la toile intérieure retenue. La chaleur massique, la résistance au transfert de vapeur d'eau, l'étanchéité à 200mm, la résistance à la traction, la résistance à la déchirure au clou et le classement M sont donnés. Il a notamment été vérifié que la toile obtenue est bien moins perméable à la vapeur d'eau que la toile extérieure puisque sa résistance au transfert de vapeur d'eau S_d vaut 3.28m soit plus de 100 fois la résistance au transfert de vapeur de la toile extérieure. Par ailleurs, la toile 2 présente bien également de bonnes propriétés mécaniques puisque sa résistance à la traction est supérieure à 1000N/50mm et sa résistance à la déchirure au clou est supérieure à 1000N. Enfin la toile est classée M1. La toile obtenue répond donc aux besoins spécifiques liés au système Isolpac pour faire office de toile intérieure.

Echantillon	Chaleur massique (J/(kg.K))	Résistance au transfert de vapeur d'eau S_d (m)	Etanchéité (200mm)	Résistance à la traction (N/50mm) (chaîne)	Résistance à la traction (N/50mm) (trame)	Résistance à la déchirure au clou (N) (chaîne)	Résistance à la déchirure au clou (N) (trame)	Classement M
2	1273	3.28	OK	2360	1555	845	1090	M1

Tableau 26 : Résultats d'essais de caractérisation de la toile intérieure

2.2.3 Estimation de la durabilité dans le temps

2.2.3.1 Introduction à l'analyse bibliographique sur les essais de vieillissement accéléré

Les matériaux du bâtiment sont tenus de respecter la garantie décennale conformément à la loi 78-12 du 4 janvier 1978 (LOI N°78-12, 1978). Il s'agit d'une assurance que les entreprises réalisant des constructions neuves, des rénovations de grande ampleur ou des aménagements divers doivent obligatoirement souscrire. Elle couvre les dommages qui compromettent la solidité du bâtiment ou qui le rendent impropre à sa destination.

Le nouveau système est donc tenu d'avoir une durée minimale de service d'au moins 10 ans, faute de quoi il ne pourra pas être utilisé.

De plus, un bâtiment a une durée de vie de 50 voire 100 ans. A l'échelle de vie d'un bâtiment, une durée de vie de 10 ans semble donc encore peu, et économiquement, le système devrait donc être utilisable sur des durées plus longues encore.

Dans notre cas, les matériaux ne sont pas connus dans ce genre d'application. De plus, les contraintes sont fortes : le complexe sera soumis aux intempéries, au vent, aux UV...

Or, il est difficile d'estimer la durée de vie d'un matériau. Il convient dans un premier temps de définir les caractéristiques limites qu'il devra toujours respecter (ou la perte de performance maximale acceptable). Puis, dans un second temps, il faut estimer l'impact du vieillissement du matériau sur ses performances. La méthode la plus fiable serait de pouvoir avoir un retour d'expérience sur des bâtiments existants depuis plusieurs dizaines d'années. Mais encore faudrait-il avoir pu réaliser un monitoring de ces bâtiments pour réellement pouvoir observer les éventuels dysfonctionnements ou dégradations. F. Stazi et al. réalisent ainsi une étude de l'enveloppe d'un bâtiment sur 20 ans (Stazi F., juillet 2009) et donnent ainsi une bonne analyse de son vieillissement. Cependant, cette méthode est très coûteuse et surtout très longue. De ce fait, elle n'est pas applicable à un nouveau matériau.

Dans le cas d'une recherche portant sur de nouveaux produits, comme Isolpac, il convient d'élaborer des essais de vieillissement dits « accélérés ». Le principe est de placer le produit dans un environnement très contraignant, qui simule une agression réelle mais plus concentrée dans le temps, afin de pouvoir vieillir le matériau de manière naturelle mais sur des durées plus courtes.

Dans notre cas, deux méthodes ont été testées : l'une normée et incluant notamment une agression par les UV, et l'autre, réalisée avec un protocole spécifiquement développé, qui permet d'observer plus en détail le phénomène d'hydrolyse.

2.2.3.2 Essais de vieillissement accéléré par UV

Introduction : analyse bibliographique sur les essais de vieillissement accéléré par UV

Des essais de vieillissement accélérés en laboratoire normés existent, comme dans la norme NF EN 1297 qui propose un vieillissement artificiel des feuilles d'étanchéité de toitures par exposition combinée de longue durée aux rayonnements UV, à la température élevée et à l'eau (AFNOR, janvier 2005). Cependant, aucune corrélation entre la durée du test et la durée représentative en utilisation réelle n'est donnée dans une norme.

Dans la littérature, plusieurs propositions d'essais de vieillissement accéléré avec des estimations de durée de vie réelle équivalente sont proposées.

G.M. Wallner et al. proposent ainsi un test de vieillissement sur des isolants transparents (Wallner G.M., 2005). L'échantillon est placé dans une chambre climatique à 65°C et 80% d'humidité relative, contenant trois lampes UV de 2,8kW pendant 480h.

J.M. Pérez et al. (Pérez J.M., 2010) réalisent des essais de vieillissement sur un polymère en le plaçant dans une chambre climatique qui soumet les échantillons à la fois à un rayonnement UV, à un taux d'humidité élevé (100%) et à une température (4h à 333K pendant le rayonnement UV et 4h à 323K pendant l'humidité à 100%). Les échantillons sont laissés jusqu'à 600h dans ces conditions, et il a été estimé qu'une année d'exposition réelle correspondrait à 27,2h d'exposition en chambre dans ces conditions.

D. Santos et al. proposent une méthode pour tester le vieillissement de différents types d'enductions de matériaux textiles (Santos D., 2007). Ils comparent différents types d'expositions à des lampes UV en laboratoire et une exposition réelle à Lisboa. Ils constatent que les échantillons sont plus dégradés en 24 jours soumis à une lampe UV-B qu'après 5 ans d'exposition réelle à Lisboa.

Méthode

Le cycle de vieillissement choisi est celui décrit dans la norme ISO 4892-2 Méthode A cycle n°2 (AFNOR, Mai 2006). Cette norme est adaptée aux matériaux de type plastique, et semble donc la plus appropriée pour les toiles.

L'essai consiste à exposer les échantillons à une lumière artificielle (UV), avec l'échantillon maintenu à 65°C. Par ailleurs, des cycles d'arrosage de 18 minutes interviennent toutes les 102 minutes. Le niveau d'irradiance est de 0.51W/m².nm pour une longueur d'onde de 340 nm.

A titre d'exemple, en considérant une énergie absorbée en 1 an à 340nm (Europe Centrale) équivalente à 1.9MJ/m², l'exposition en chambre d'essai Xénon serait de 1035h (environ 42j), soit environ 420j d'exposition pour simuler 10 ans de vieillissement.

Les essais de vieillissement se font dans une enceinte ATLAS chez notre partenaire Dickson.

Les essais de vieillissements sont très longs. En effet, nous voulons pouvoir garantir le produit 10 ans, ce qui représente environ 10000h d'exposition.

Des échantillons destinés à des essais de traction et des échantillons destinés à des essais de déchirure au clou sont placés dans l'enceinte. L'enceinte étant limitée en place, il faut se contenter de 3 échantillons pour chacun des essais et pour chaque sens du textile testé (chaîne et trame).

Les textiles placés dans l'enceinte sont choisis au fur et à mesure des résultats des autres essais. Quand un textile est éliminé par un autre essai (essai mécanique, essai d'étanchéité, de perméabilité...), il est retiré de l'enceinte et remplacé par un autre textile qui n'avait pas encore été placé en vieillissement. Ceci pour essayer d'obtenir au plus vite des échantillons vieillis du textile qui sera finalement choisi.

Résultats et analyse

A ce jour, seuls trois textiles ont pu être qualifiés après vieillissement, et seulement via un essai de traction. Ces trois textiles sont le textile 1 et le textile 2 et le textile 8. Le textile 8 a été placé dans l'enceinte afin de servir de témoin pour comparer les résultats à ceux contenus dans sa fiche technique. En effet, ce textile a été soumis par son fabricant à 5000h de vieillissement accéléré d'après les normes EN 1297 (AFNOR, janvier 2005) et EN 1296 (AFNOR, Avril 2001). Ces deux normes définissent les conditions de vieillissement accéléré pour les feuilles souples d'étanchéité. La EN 1296 consiste à placer les échantillons dans une étuve chauffée à 70°C, tandis que la EN 1297 consiste à exposer aux UV les échantillons (avec la même puissance et la même longueur d'onde que dans l'essai réalisés dans le cadre de cette thèse), mais avec des cycles d'arrosages différents : 60min d'arrosage toutes les 360min. Le souci de la fiche technique de la toile 8 et qu'un seul résultat est indiqué pour les deux normes. Il est ainsi difficile de savoir quelles ont été exactement les conditions du vieillissement accéléré appliqué à cette toile. Néanmoins, le fabricant indique que la toile possède encore 90% de sa résistance à la traction initiale après 5000h de vieillissement, quel que soit le sens considéré.

Le Tableau 27 donne les résistances à la traction obtenues pour les trois textiles neufs, ainsi que pour le textile 1 après 5000h, pour le textile 2 après 4000 et 5000h et pour le textile 8 après 5000h. Les pertes des échantillons vieillis par rapport aux échantillons neufs sont données en pourcent.

Toile	Sens	Vieillissement				
		Aucun	4000h		5000h	
		Valeur (N/5cm)	Valeur (N/5cm)	Perte	Valeur (N/5cm)	Perte
1	Chaîne	2535	/	/	1655	-35%
	Trame	1680	/	/	1365	-19%
2	Chaîne	2360	1570	-33%	/	/
	Trame	1555	440	-72%	355	-77%
8	Chaîne	360	/	/	55	-85%
	Trame	415	/	/	100	-76%

Tableau 27 : Résultats des essais de résistance à la traction sur des échantillons neufs et vieillis pendant 4000h ou 5000h.

On observe que le textile 1 a plutôt bien vieilli en comparaison avec les deux autres textiles. Il n'a en effet perdu que 35% de sa résistance en chaîne et 19% en trame. Les textiles 2 et 8 ont quant à eux perdus environ 80% de leur résistance, mis à part la valeur obtenue en chaîne pour le textile 2 qui est de 33%. Cet écart entre chaîne et trame est surprenant. Notre partenaire Dickson n'a pas connaissance de vieillissement spécifique dans un sens plutôt que dans l'autre. Ce phénomène sera donc à étudier plus en détails par la suite pour mieux le comprendre. Il est tout de même remarquable que même si le textile 2 a une résistance en

trame qui a fortement chuté, celle-ci reste après vieillissement du même ordre de grandeur que les valeurs du textile 8 à l'état neuf.

Concernant le textile 8, les pertes sont importantes puisque supérieures à 75%. En comparaison, la fiche technique indiquait que le textile avait perdu seulement 10% de sa résistance mécanique après 5000h de vieillissement. Ceci nous indique que l'essai réalisé par nos soins est beaucoup plus pénalisant que celui réalisé dans le cadre de la fiche technique de la toile 8.

Ces essais ont pour vocation d'être poursuivis, notamment sur le textile 11 qui a été retenu pour la toile extérieure et qui est toujours en cours de vieillissement. Dans la mesure de la place disponible dans l'enceinte, des points intermédiaires (après 1000h et/ou 2000h) seront effectués afin de mieux comprendre le vieillissement, d'identifier s'il est linéaire ou non, s'il se stabilise, s'il y a une durée à partir de laquelle les échantillons se dégradent fortement...

2.2.3.3 Essais de vieillissement par hydrolyse

Introduction : analyse bibliographique sur les essais de vieillissement accélérés par hydrolyse

L'utilisation du textile en façade est encore récente et le retour d'expérience de sa tenue dans le temps est encore insuffisant.

Les conditions extérieures telles que la pluie ou l'humidité de l'air auxquelles sont soumis les matériaux créent des phénomènes d'hydrolyse (Vouyovitch Van Schoors L., 2007; Bartolomeo P., mars-avril 2003). L'hydrolyse se définit comme la destruction d'une substance chimique par l'eau. Plusieurs recherches fondamentales et appliquées ont été consacrées à la dégradation et au vieillissement des polymères. En effet, Rawal et al. (Rawal A., 2010) ont comparé les propriétés de différents polymères dont le polyester qui constitue un grand pourcentage de la composition des textiles testés au cours de cette étude. Ils montrent que ceux-ci sont vulnérables aux attaques alcalines. Gijsman et al. (Gijsman P., 1999) comparent le vieillissement de différents polymères soumis aux UV avec un vieillissement par hydrolyse. Ils montrent que le vieillissement résulte principalement de l'action de l'eau. Rahman et Alfaro (Rahman M., 2004) confirment ce point de vue et montrent que l'hydrolyse est le facteur de dégradation auquel le polyester est le plus vulnérable. A titre d'exemple, pour un vieillissement de seulement 8 heures à une température de 80°C dans une solution de NaOH à 9.92%, le PET haute ténacité a perdu 52.7% de sa masse initiale. L'effet de l'hydrolyse a également été montré grâce à la campagne expérimentale de Elias et al. (Elias V., 1998). Dans leur étude, la résistance à la traction a chuté de 33% pour un vieillissement dans l'eau distillée pendant 512 jours.

Dans ses recherches portant sur le vieillissement par hydrolyse des polyesters, Vouyovitch Van Schoors (Vouyovitch Van Schoors L., 2007) confirme que dans le cas des polyesters, toutes les études montrent que c'est bien les phénomènes d'hydrolyses qui régissent la durabilité de ces matériaux. La pluie et le contact du béton sont des exemples d'agressions acides et basiques que le parement de textile extérieur pour le bâtiment peut subir au cours de son utilisation. Ainsi, l'hydrolyse est sans aucun doute essentielle pour mieux cerner le comportement des membranes textiles tout au long de leur durée de vie. Il est admis que l'hydrolyse est le principal facteur contrôlant la durabilité des textiles de parement pour le bâtiment. Elias et al. (Elias V., 1998) ont défini un protocole d'essai pour étudier les effets du pH sur la dégradation de trois produits géosynthétiques en PET (deux géotextiles et une

géogrille). Ils ont montré qu'en milieu acide, la principale cause de dégradation est la rupture des chaînes moléculaires des polyesters, tandis que la cause principale en milieu basique est l'érosion en surface du textile induisant une perte de masse. Rahman et Alfaro (Rahman M., 2004) dans une autre étude ont montré que la principale dégradation de géotextiles polyesters est observée lorsque ces derniers sont soumis à des charges en milieu alcalin. Ils ont noté que la perte de résistance à la rupture des matériaux étudiés est plus importante quand le géotextile est soumis à des charges durant son vieillissement.

Concernant les textiles de parement de bâtiment, il n'y a pas beaucoup de travaux de recherches consacrés à ce thème et la principale raison est liée à la nouveauté de ce domaine. Ces textiles diffèrent des géotextiles car ils sont le plus souvent enduits de PVC ou d'autres polymères (PTFE, ETFE...). Ces matériaux ne vieillissent pas de la même manière. Elias et al (Elias V., 1998) ont souligné l'effet de l'ajout d'un enduit PVC sur le processus de vieillissement des géotextiles. Grâce à la loi d'Arrhenius, la perte de la résistance mécanique à 20°C est estimée à 1.61% par an pour un PET couvert de PVC contre 4.10% par an pour un PET non couvert, après vieillissement dans une solution de NaOH de pH 12. De même pour l'hydrolyse en eau distillée, où le PET enduit de PVC expose une moindre dégradation. Ceci montre que le PVC dispose de propriétés protectrices et de résistance. Le diamètre des fibres peut aussi avoir une influence sur cette différence de comportement des deux échantillons testés. D'autre part, Halse et al. (Halse Y., 1999) ont testé plusieurs types de géotextiles composés principalement de PET, de PP et de PVC. Après un vieillissement de 120 jours dans une solution de NaOH à un pH de 12. Le géotextile en PVC tissé n'a perdu aucune résistance. Le géotextile en PET non tissé a perdu par contre environ 31% de sa résistance mécanique.

Dans cette partie, l'objectif consiste à contribuer aux travaux portant sur les hydrolyses de textiles en polyesters enduits de PVC. Les hydrolyses ont été effectuées au laboratoire sur deux textiles qui présentent des structures différentes puisque l'un est fermé et étanche et l'autre est ouvert. Ces deux matériaux sont destinés à être utilisés comme parement dans le bâtiment. Les hydrolyses ont été réalisées à la fois en milieu acide et en milieu basique à 70°C. Les principaux indicateurs de durabilité retenus dans cette étude sont l'évolution de la masse, la résistance à la traction et la résistance à la déchirure au clou. Ces indicateurs ont permis de quantifier et d'analyser l'influence du vieillissement accéléré sur les textiles.

Protocole de vieillissement accéléré

L'objectif de cette étude est de concevoir et de mettre au point un essai de vieillissement accéléré par hydrolyse sur les toiles 3 (Arcade) et 11 (Sunworker PTFE). L'hydrolyse peut être faite en milieu acide, neutre ou basique. Le processus de dégradation en milieu acide et neutre est le même (Vouyovitch Van Schoors L., 2007). Au cours de l'hydrolyse, les ions H^+ et les molécules d'eau se diffusent au sein du polymère. Elles attaquent ses chaînes et les cassent. Ceci réduit la longueur des chaînes ce qui impacte directement la force des fibres. En milieu basique, le processus de dégradation est différent. En effet, la dégradation provoquée par les ions OH^- est localisée en surface (Rahman M., 2004). Afin de réaliser une étude la plus complète possible, l'impact de ces principaux modes de vieillissement sur les matériaux textiles a été étudié.

L'hydrolyse s'effectue par immersion totale d'échantillons dans un bac contenant une solution agressive. Le bac est ensuite placé dans une étuve régulée à 70°C. Plusieurs périodes de dégradations ont été retenues notamment 7, 14, 18, 21, 32, 35 et 62 jours d'immersion dans une solution basique, et 7, 11, 14, 21, 28 et 32 jours d'immersion dans une solution acide. Le

pH est contrôlé tout au long du vieillissement grâce à des mesures régulières au pH-mètre. La solution est remise à niveau au cours de l'essai afin que l'immersion soit en permanence totale.

Le choix de la solution acide s'est basé sur la composition de la pluie. En effet, l'un des composés majoritaires de la pluie est le SO_4^{2-} (Miquel G., 2002-2003). Pour cette raison, le H_2SO_4 a été retenu. Sachant que la température d'ébullition de SO_4^{2-} est de 337°C , la fixation de température de l'essai expérimental à 70°C ne sera pas une contrainte. Enfin, la concentration retenue a été fixée à 0.3 mol/L permettant ainsi de contrôler le pH à 0.5 . Ce choix de pH faible impose des conditions défavorables pour pouvoir dégrader les matériaux rapidement.

Concernant le vieillissement en milieu basique, Halse et al. (Halse Y., 1999) ont comparé le vieillissement accéléré de PET réalisé avec une solution de NaOH et une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Après 120 jours d'immersion dans ces solutions, la résistance du PET avait chuté de 23% dans le NaOH et de 9% dans le $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ils ont conclu alors que le NaOH est plus agressif. Mais ce résultat est infirmé par Haghghat et al. (Haghghat Kish M., 1999) qui ont obtenus une perte de masse après 120 jours d'immersion dans une solution de NaOH de 5% contre 20% dans une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cependant, Halse et al. (Halse Y., 1999) ont montré que l'essai de vieillissement est plus complexe avec une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de par la réaction entre le CO_2 et l'eau pour donner du calcaire. En effet, le calcaire réagit avec le H_3O^+ et le pH diminue au court du temps. Par ailleurs le précipité calcaire se dépose sur les échantillons et crée une protection contre le solvant. Pour ces raisons, c'est le NaOH qui a été retenu pour effectuer le vieillissement accéléré en milieu basique. Le pH a été choisi élevé pour accélérer le processus de vieillissement. Il a été fixé à 13.5 .

La température est un catalyseur du vieillissement. Plusieurs études ont ainsi montré que plus la température de la solution est élevée, plus le vieillissement est rapide. Ainsi, Elias et al. (Elias V., 1998) obtiennent après 400 jours de vieillissement dans une solution de NaOH à pH 10 une résistance résiduelle 45% plus faible quand le vieillissement a été fait à 70°C plutôt qu'à 50°C . D'autre part, Vouyovitch Van Schoor et al. (Vouyovitch Van Schoors L.) constatent une perte de résistance mécanique d'environ 10% pour une durée de 181 jours à un pH de 9 et une température de 75°C . Cependant, pour une température de 45°C et sous les mêmes conditions, la perte de résistance mécanique est inférieure à 2%. D'autres études ont également souligné l'effet catalyseur de la température sur le vieillissement (Grancaric A.M., 1993; Belan F., 1996).

Il est donc important de réaliser le vieillissement à température élevée. En revanche, il convient de ne pas modifier la structure du textile par la seule action de la température. Le vieillissement ne serait alors plus représentatif de la réalité. Pour éviter ce phénomène, il faut travailler à une température inférieure à la température de transition vitreuse du matériau (Datye K.V., 1989). Pour les deux matériaux étudiés, cette température a été déterminée par DSC. Elle est respectivement de 73°C pour le Sunworker PTFE et de 75°C pour l'Arcade. Dans le cadre des travaux réalisés dans la suite, la température d'essai a été fixée à 70°C pour ne pas dépasser ces températures de transition vitreuses.

Les essais expérimentaux ont duré au maximum 35 jours en milieu basique et 32 jours en milieu acide pour l'ensemble des échantillons. Seules des éprouvettes destinées à des essais de traction ont été vieilles pendant 62 jours en milieu basique.

Le Tableau 28 récapitule l'ensemble des paramètres des essais. Il indique le solvant, le pH, la durée maximale de l'essai et la température de l'essai.

Milieu	Solvant	pH	Durée d'immersion (jours)	Température (°C)
Basique	NaOH	13.5	62	70
Acide	H ₂ SO ₄	0.5	32	70

Tableau 28 : Récapitulatif des conditions d'essais

Indicateurs de suivi du vieillissement

Perte de masse

Plusieurs études ont montrés l'importance de la perte de masse comme indicateur de vieillissement (Rahman M., 2004; Haghghat Kish M., 1999; Datye K.V., 1989; Rahman M., 2012). Par exemple, Rahman et al. (Rahman M., 2012) ont constaté que la masse d'un PET haute ténacité diminuait de 18.5 % au bout de 96 heures de vieillissement dans une solution de NaOH à 10% et à 40°C. Elias et al. (Elias V., 1998) ont par contre remarqué une chute de 29% de masse pour un PET tissé vieilli 26 jours dans une solution NaOH à pH 12 et à 72°C. Dans cette étude, la perte de masse a été retenue comme indicateur de durabilité.

Les différents échantillons ont chacun été pesés avant immersion dans une solution. Une fois vieillis, ils ont été séchés pendant 48h dans l'ambiance du laboratoire (température de 25±5°C et humidité relative comprise entre 30 et 70%) puis pesés à nouveau.

Pour chacun des échantillons, la perte de masse a été calculée selon l'équation suivante :

$$\text{Perte de masse} = \frac{W_f - W_i}{W_f} \times 100\% \quad (2.6)$$

Avec W_f (g) la masse du textile après hydrolyse et W_i (g) la masse initiale du textile avant hydrolyse.

Pour chaque durée de vieillissement, la mesure a été répétée sur trois échantillons avec un soin particulier afin de s'assurer de la répétabilité et de la répétitivité des essais.

Résistance à la traction et module d'Young

La résistance à la traction a été retenue comme indicateur pour deux raisons. La première est issue d'un besoin lié à l'utilisation du nouveau système. En effet le système est soumis à des contraintes mécaniques pendant son utilisation. Il est donc important de savoir quantifier la perte de sa résistance à la traction au fur et à mesure de son vieillissement afin de savoir si le textile répond toujours au cahier des charges initial. La deuxième raison d'utilisation de cet indicateur est que d'après la littérature il s'agit d'un indicateur de vieillissement fiable. En effet, Elias et al. (Elias V., 1998) ont vieilli des fibres en PET tissées dans une solution de NaOH de pH 10 et à une température de 70°C. Ils ont obtenu des résultats intéressants

montrant l'influence et la sensibilité de cette propriété. En effet la résistance mécanique chute de 20% au bout de 120 jours et de 40% au bout de 330 jours. D'autres auteurs ont également confirmé cette tendance et considéré la variation de la résistance mécanique dans leurs travaux de recherche (Mathur A., 1994; Vouyovitch Van Schoors L., 2009).

Dans cette étude, la résistance à la traction a été déterminée selon la norme NF EN 12311-1 (AFNOR, Décembre 1999) décrite au paragraphe 2.2.2.1.

L'essai a été réalisé pour des échantillons non vieillis ainsi que pour des échantillons vieillis pendant 7, 14, 18, 21, 32, 35 et 62 jours pour la solution basique, et pendant 7, 11, 14, 21, 28 et 32 jours pour la solution acide. Pour chacun des échantillons, la force de traction et la distance de déplacement des mâchoires ont été enregistrées.

Le module d'Young a été également retenu comme un indicateur de vieillissement. En effet, Vouyovitch Van Schoors (Vouyovitch Van Schoors L.) a pris en compte la variation du module d'Young au cours du vieillissement accéléré par immersion dans une solution de Na_2CO_3 . Au bout de 181 jours de vieillissement, à un pH de 9 et une température de 75°C , ce module chute de 40%. A pH 11, il chute de 60%. Ainsi, ce coefficient peut se présenter comme un bon indicateur.

Le module d'Young est calculé directement à partir de la courbe « Force-Allongement » fournie par l'essai de traction. Ce coefficient caractérise la raideur de la matière : à contrainte égale (et dans le domaine élastique), un matériau avec le plus grand module d'Young connaîtra moins de déformation irréversibles.

Les résultats obtenus ont montré que le domaine élastique de l'Arcade est plus grand que celui du Sunworker PTFE (plus de 8mm pour l'Arcade contre 5mm pour le PTFE). Par conséquent, Le module d'Young ne se calcule pas en se basant sur les mêmes valeurs de déformations pour les deux textiles.

Ainsi, le calcul du module d'Young se fait pour des valeurs d'allongement de 2 et 6 mm pour l'Arcade suivant la formule suivante :

$$E_A = \frac{F(6) - F(2)}{6 - 2} \times \frac{1000}{50} \quad (2.7)$$

Avec E_A le module d'Young de l'arcade en kPa et $F(x)$ la valeur de la force de traction en Newton pour x mm d'allongement.

En revanche, le module d'Young se calcule pour des valeurs d'allongement de 2 et 4 mm pour le Sunworker PTFE selon la formule suivante :

$$E_P = \frac{F(4) - F(2)}{4 - 2} \times \frac{1000}{50} \quad (2.8)$$

Résistance à la déchirure au clou

La résistance à la déchirure au clou est un indicateur spécifique retenu lors de cette étude liée à l'utilisation des textiles. En effet, les recherches bibliographiques n'ont pas permis de trouver des résultats suivant cet indicateur. En revanche, les textiles de parement considérés ici peuvent être amenés à être percés d'un clou, d'une vis ou soumis à d'autres efforts

ponctuels (Biger, 2007) au cours de leur utilisation. La détermination de l'évolution de ce critère est donc primordiale pour déterminer quand le textile ne répond plus à son cahier des charges industriel français. Il a donc semblé important de considérer cette propriété comme un indicateur de suivi du vieillissement du produit.

Les mesures des résistances à la déchirure au clou ont été réalisées comme décrit au paragraphe 2.2.2.1.

L'essai a été réalisé pour des échantillons non vieillis ainsi que pour des échantillons vieillis pendant 7, 14, 18, 21, 32, et 35 jours pour la solution basique, et pendant 7, 11, 14, 21, 28 et 32 jours pour la solution acide. Pour chacun des échantillons, la force de traction et la distance de déplacement des mâchoires ont été enregistrées.

Résultats et analyse

Pour mieux repérer les échantillons et le processus de vieillissement, la nomenclature suivante a été adoptée : La première lettre est réservée au type de textile. L'Arcade est noté « A » et le Sunworker PTFE est noté « P ». La deuxième lettre est réservée au type de solution. Ainsi, le NaOH est noté « N » et le « H₂SO₄ » est noté « H ». Enfin, le chiffre désigne le temps de vieillissement de l'échantillon en jours.

A titre d'exemple, les échantillons d'Arcade vieillis 14 jours dans une solution de NaOH seront notés AN14.

Suivi de la perte de masse

- Milieu basique

En milieu basique, lors du vieillissement, la membrane PTFE s'est détachée de la partie Sunworker après 7 jours de vieillissement. Il n'y a alors plus de sens à réaliser un suivi de la perte de masse sur ces échantillons. Le suivi de la perte de masse a donc été fait uniquement sur l'Arcade en milieu basique. Le suivi de la perte de masse a été effectué sur les échantillons destinés aux essais de traction (300x50mm²).

La Figure 55 montre la variation de la perte de masse en pourcentage des échantillons d'Arcade en fonction de la durée de vieillissement au NaOH. Il peut être constaté que la perte de masse est constante et semble linéaire. La perte de masse est de 1.2% par jour de vieillissement. Au bout de 35 jours de vieillissement, le textile a perdu plus de 45% de sa masse initiale. Il semble que ce résultat confirme ceux obtenus en littérature, l'ordre de grandeur semble être aussi normal en milieu basique (Elias V., 1998; Haghghat Kish M., 1999). En effet dans une solution basique, les hydroxydes modifient les propriétés diélectriques de la surface des polymères. De ce fait, l'hydrolyse s'intensifie à la surface, d'où la formation de chaînes polymères plus courtes et solubles dans la solution alcaline. Le diamètre des fibres diminue et une perte de masse est donc inévitable.

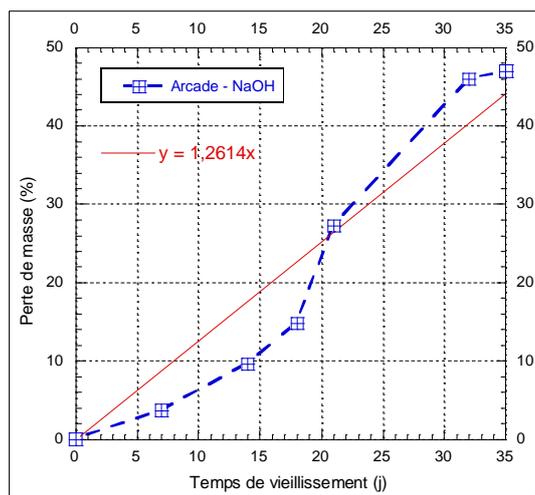


Figure 55 : Perte de masse (%) de l'Arcade en fonction de la durée de vieillissement (j) en milieu basique.

- Milieu acide

Le suivi de la perte de masse a été effectué sur les échantillons destinés aux essais de traction (300x50mm²).

La Figure 56 montre l'influence de la perte de masse en pourcentage des échantillons d'Arcade et de Sunworker PTFE en fonction de la durée de vieillissement au H₂SO₄. Il peut être noté que la perte de masse est croissante mais reste très faible voire négligeable. Au bout de 32 jours de vieillissement, L'arcade a uniquement perdu 1% de sa masse après 35 jours de vieillissement, tandis que le Sunworker PTFE a perdu moins de 2%. D'après la littérature, il est normal d'obtenir une perte de masse en milieu acide quasi nulle (Doll W.W., 1995). En effet, en milieu acide, la diffusion des ions H⁺ est le phénomène le plus prépondérant. Ceci cause une dégradation relativement homogène des fibres contrairement au milieu basique où l'attaque des ions OH⁻ provoque un phénomène d'érosion qui va de pair avec une baisse de masse.

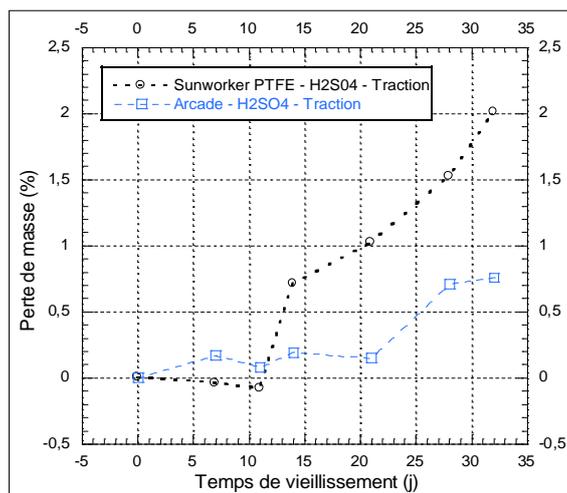


Figure 56 : Perte de masse (%) de l'Arcade en fonction de la durée de vieillissement (j) en milieu acide.

Résistance à la traction et module d'Young

- Milieu basique

La Figure 57 donne les résultats obtenus lors de l'essai de traction sur les échantillons neufs et vieillis dans la solution basique. Les courbes représentent la force de traction de l'éprouvette en fonction de son allongement. La courbe (a) concerne les échantillons Arcade neufs et vieillis au NaOH pendant 7, 14, 18, 21, 32, 35 et 62 jours. La courbe (b) concerne les échantillons de Sunworker PTFE neuf et vieillis au NaOH pendant 7, 14, 18, 21, 32 et 62 jours. Il convient de rappeler que pour les échantillons de Sunworker PTFE, la membrane PTFE s'est détachée après 7 jours de vieillissement accéléré. Cependant, cette membrane n'ayant pas de rôle structurel, la perte de cette membrane ne perturbe pas le suivi de l'indicateur résistance à la traction. Toutes les courbes ont la même allure : elles sont croissantes de manière linéaire pendant les premiers millimètres d'allongement, puis croissantes sans linéarité, jusqu'à un maximum avant que la force ne devienne nulle. Cette allure est tout à fait typique des courbes force-allongement. La première partie linéaire correspond à la zone de déformation élastique, dans laquelle le textile ne subit pas de déformation majeure et où si la sollicitation s'arrête il pourra reprendre son état initial. La seconde partie correspond à une zone de déformation plastique dans laquelle le textile subit des déformations irréversibles. Enfin, le textile atteint la rupture et sa résistance devient nulle. Plus l'échantillon a été vieilli, moins la courbe correspondante a d'amplitude. Les résistances à la rupture moyennes sont respectivement de 1250, 808, 920, 315, 358, 82, 97, et 46 N/50mm pour les échantillons Arcade vieillis au NaOH pendant 0, 7, 14, 18, 21, 32, 35 et 62 jours. Elles sont respectivement de 1258, 769, 544, 305, 65, 23, et 5 N/50mm pour les échantillons Sunworker PTFE vieillis au NaOH pendant 0, 7, 14, 18, 21, 32 et 62 jours. Il y a donc diminution de la résistance à la traction au fur et à mesure du vieillissement en milieu basique.

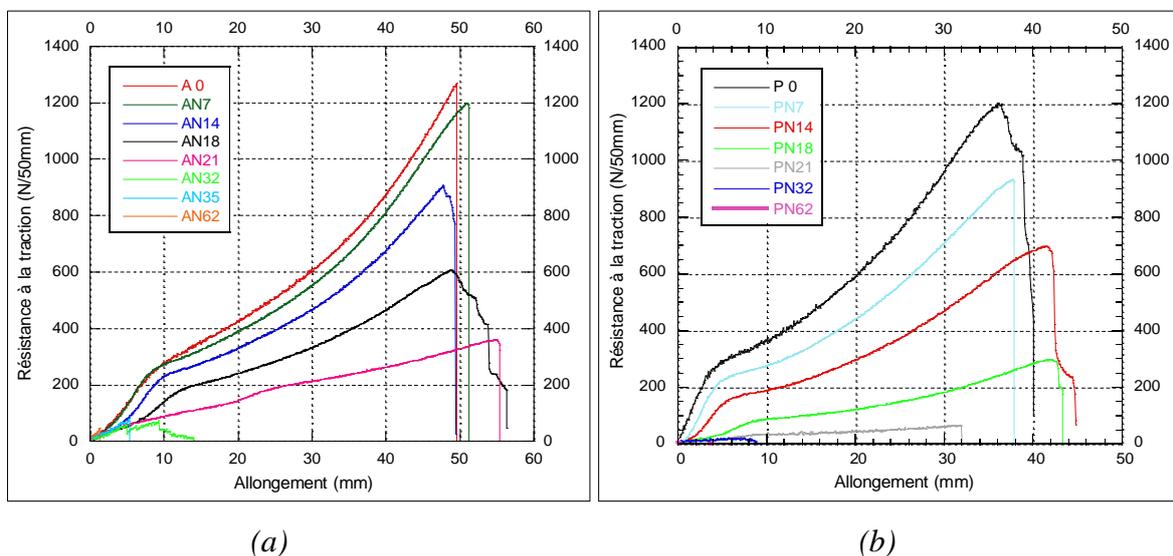


Figure 57 : Résistance à la traction (N/50mm) mesurée en fonction de l'allongement (mm) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE, neuf et vieilli en milieu basique

La Figure 58 représente les résistances à la traction de l'Arcade (a) et du Sunworker PTFE (b) en fonction de la durée de vieillissement au NaOH. Dans les deux cas les courbes décroissent et tendent vers 0. Il y a clairement une diminution de la résistance à la traction sous l'action du NaOH. Ceci est conforme aux études précédemment menées (Elias V., 1998; Vouyovitch Van Schoors L., 2009; Mathur A.). La perte de résistance est ici plus rapide pour le

Sunworker PTFE qui a une résistance quasi nulle au bout de 20 jours de vieillissement contre encore 400 N/50mm pour l'Arcade. Ceci s'explique par la structure du Sunworker qui présente une surface directement attaquable par le NaOH plus importante puisqu'il est ouvert. La durée de l'essai est suffisante pour s'assurer que le produit n'est plus valable. Il a en effet été remarqué qu'à 62 jours de vieillissement le textile est devenu très cassant. Il s'est en effet plastifié et a perdu toute souplesse. Le textile peut alors se briser rien qu'en le positionnant dans les mâchoires de l'appareil de traction. Il est alors inutile de poursuivre le vieillissement accéléré.

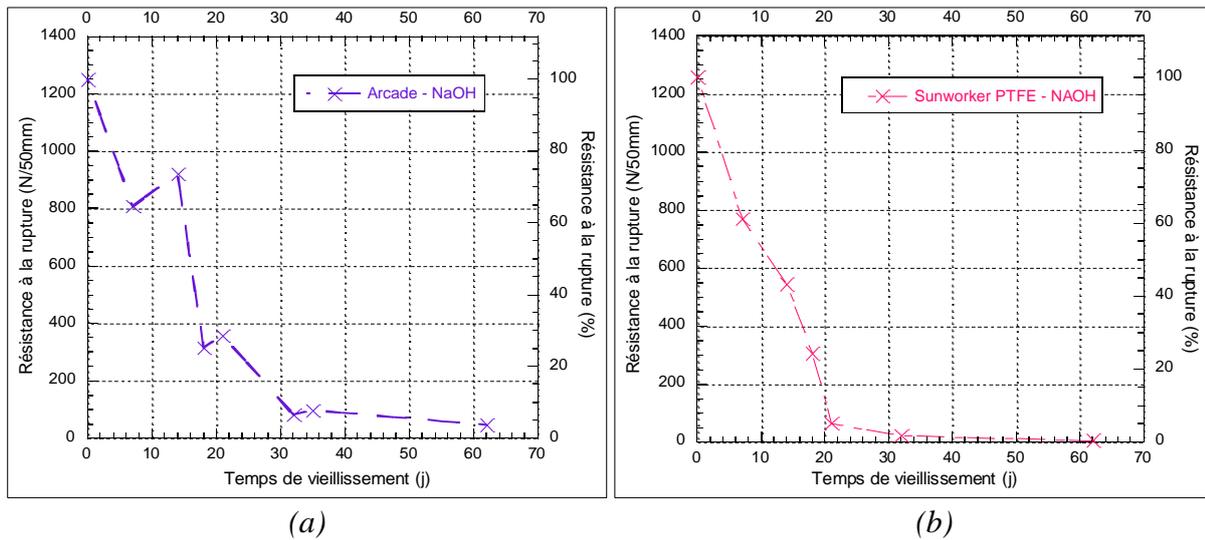


Figure 58 : Résistance à la rupture (N/50mm) en fonction de la durée de vieillissement en milieu basique (j) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE

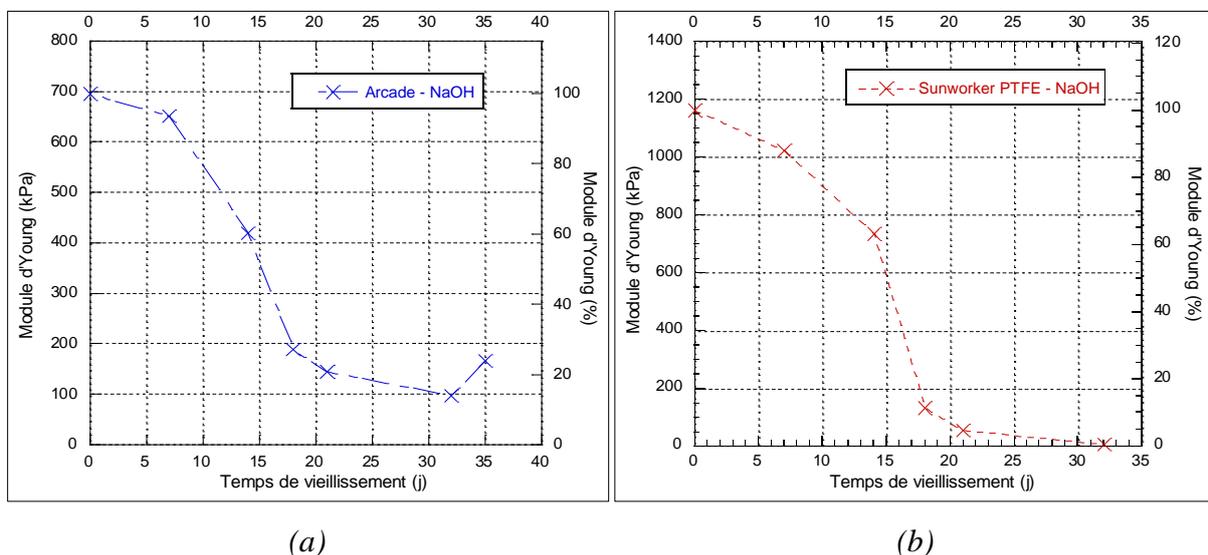


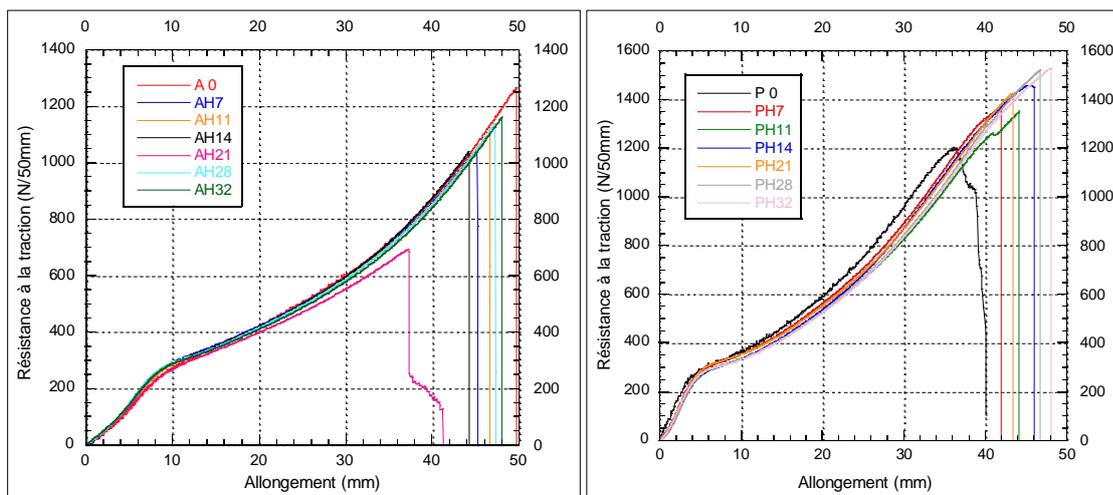
Figure 59 : Modules d'Young (kPa) obtenues en fonction de la durée de vieillissement en milieu basique (j) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE

Les modules d'Young déduits des courbes force-allongement sont présentés dans la Figure 59. Les courbes représentent le module d'Young moyen en kPa obtenu en fonction de la durée de vieillissement au NaOH pour l'Arcade (a) et le Sunworker PTFE (b). L'allure de la courbe est la même que précédemment, avec une décroissance forte puis une stabilisation. Pour

l'Arcade, la stabilisation se fait aux alentours de 150 kPa, tandis que pour le Sunworker la stabilisation se fait proche de 70kPa, soit une chute de 78% du module d'Young pour l'Arcade contre 94% pour le Sunworker PTFE. Ceci peut être dû à la structure poreuse du deuxième textile. Ainsi, même si, initialement, le module d'Young du deuxième textile est plus grand, l'Arcade est plus approprié pour une durabilité à long terme.

- Milieu acide

La Figure 60 illustre les résultats expérimentaux obtenus lors de l'essai de traction sur les échantillons neufs et vieillis dans la solution acide. Les courbes expriment la force de traction de l'éprouvette en fonction de son allongement. La courbe (a) concerne les échantillons Arcade neufs et vieillis au H_2SO_4 pendant 7, 11, 14, 21, 28, et 32 jours. La courbe (b) concerne les échantillons de Sunworker PTFE neuf et vieillis au NaOH pendant 7, 11, 14, 21, 28, et 32 jours. Toutes les courbes ont la même allure : elles sont croissantes de manière linéaire pendant les premiers millimètres d'allongement, puis croissantes sans linéarité, jusqu'à un maximum avant que la force ne devienne nulle. Cette allure est également typique des courbes force-allongement tout comme pour les courbes obtenues en milieu basique. En revanche, les courbes sont ici superposables quelque soit la durée de vieillissement. La résistance à la rupture est de l'ordre de 1100 N/50mm pour l'Arcade et de 1250N/50mm pour le Sunworker PTFE indépendamment de la durée de vieillissement. La résistance à la traction se maintient au fur et à mesure du vieillissement en milieu acide.



(a)

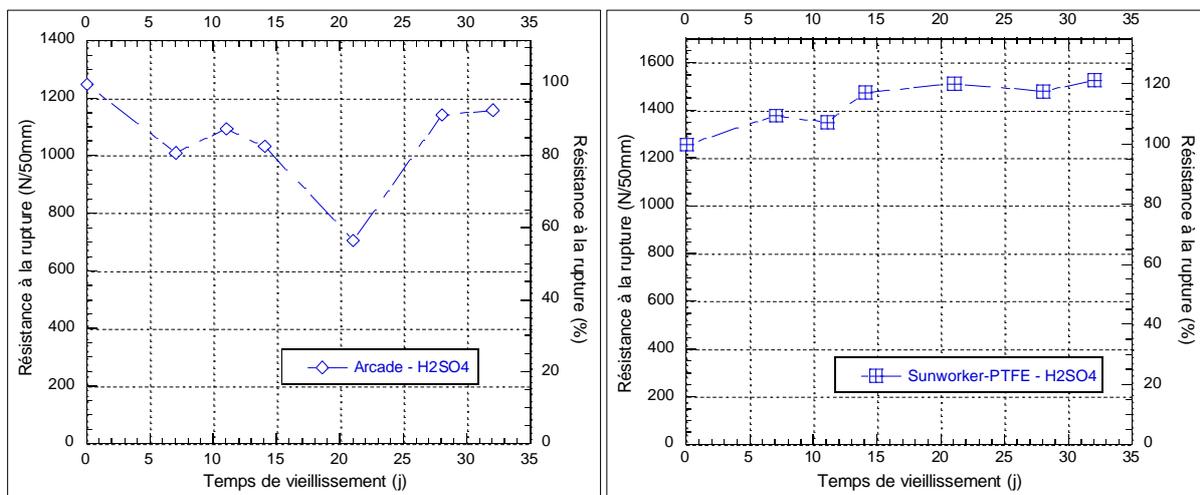
(b)

Figure 60 : Résistance à la traction (N/50mm) de traction mesurée en fonction de l'allongement (mm) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE, neuf et vieilli en milieu acide

La Figure 61 représente les résistances à la traction de l'Arcade (a) et du Sunworker PTFE (b) en fonction de la durée de vieillissement au H_2SO_4 . Dans les deux cas les courbes sont quasi constantes. En effet, pour l'Arcade, la valeur de résistance à la traction au bout de 32 jours de vieillissement est plus élevée que la valeur obtenue au bout de 7 jours de vieillissement. Concernant le Sunworker PTFE, la résistance à la traction a même tendance à légèrement augmenter. Ce résultat a également été obtenu par Elias (Elias V., 1998). En effet, la résistance à la traction augmente légèrement avant de diminuer pour les trois produits géosynthétiques testés pour un vieillissement en milieu neutre. Cette tendance est également obtenue pour un seul type d'échantillon dans le milieu acide. A l'inverse en milieu basique, il n'y a par contre aucune augmentation de la résistance. Ceci peut être dû à la nature de la

dégradation dans ces milieux. En effet, le vieillissement suit le même processus en milieu acide et neutre contrairement au milieu basique. Le déclenchement du vieillissement prend alors plus de temps dans le milieu acide et neutre. Cette augmentation de résistance peut s'expliquer par une rigidification du textile de par la perte de plastifiants dans la solution, qui a d'abord tendance à rendre le matériau plus résistant, avant de le rendre plus cassant.

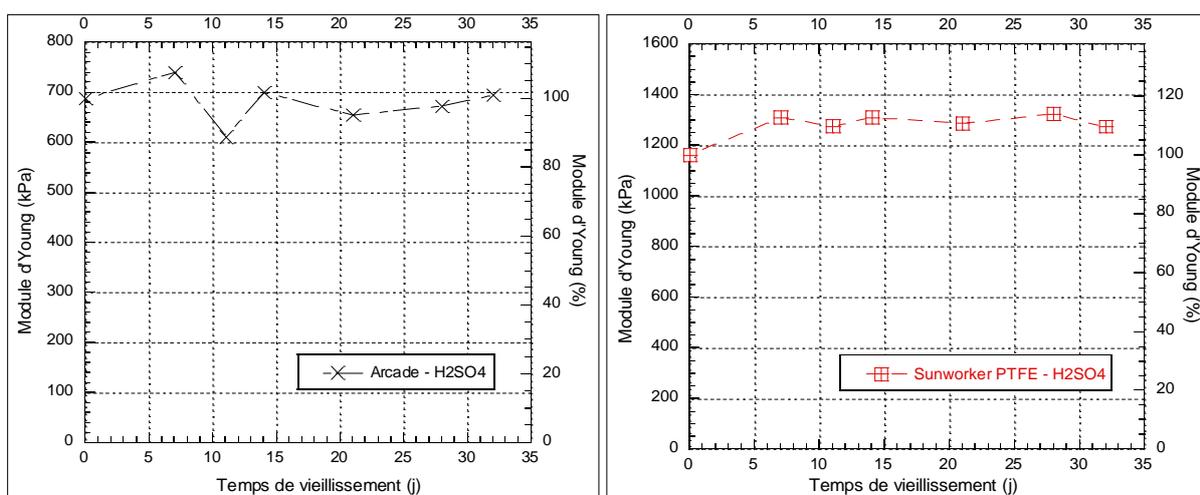
Les modules d'Young déduits des courbes force-allongement sont présentés sur la Figure 62. Les courbes représentent le module d'Young moyen en kPa obtenu en fonction de la durée de vieillissement au H₂SO₄ pour l'Arcade (a) et le Sunworker PTFE (b). Les courbes sont quasi constantes également. Le module d'Young pour l'Arcade est quasiment égal à 700 kPa quelque soit la durée du vieillissement, tandis que celui du Sunworker PTFE reste constant à environ 1200 kPa.



(a)

(b)

Figure 61 : Moyennes de résistance à la rupture (N) obtenues en fonction de la durée de vieillissement en milieu acide (j) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE



(a)

(b)

Figure 62 : Modules d'Young (kPa) obtenues en fonction de la durée de vieillissement en milieu acide (j) pour (a) l'Arcade et (b) le Sunworker PTFE

Résistance à la déchirure au clou

- Milieu basique

La Figure 63 présente les résultats de mesure de la résistance à la déchirure au clou sur l'Arcade (a) et sur le Sunworker PTFE (b) en fonction de la durée de vieillissement dans la solution de NaOH. La courbe pour l'Arcade est croissante dans un premier temps et décroît ensuite. La courbe concernant le Sunworker PTFE est différente puisque constamment décroissante, avec une forte décroissance durant les premiers jours de vieillissement. Pour l'Arcade, la résistance à la déchirure passe de 170N à 350N après 7 jours de vieillissement. Elle décroît ensuite progressivement pour atteindre 235N au bout de 35 jours de vieillissement. Cette augmentation de la résistance à la déchirure de l'Arcade s'explique par la rigidification du textile sous l'action de la solution basique. Le textile devient alors plus résistant à une force ponctuelle. Le comportement du Sunworker PTFE est différent : Sa résistance à la déchirure au clou initiale est de plus de 950N soit plus de 5 fois plus que celle de l'Arcade. En revanche, cette résistance passe à 150N après 7 jours de vieillissement. Elle décroît ensuite progressivement pour atteindre moins de 50N au bout de 35 jours de vieillissement. Cette forte décroissance pendant les premiers jours de vieillissement coïncide avec la forte perte de résistance à la traction constatée sur le Sunworker PTFE pendant cette même durée de vieillissement. Encore une fois, il est possible de conclure que la plus grande surface exposée au NaOH du Sunworker par rapport à l'Arcade accélère l'effet du vieillissement. En effet, le Sunworker ayant une structure ouverte, il est rapidement attaqué en surface par la solution basique.

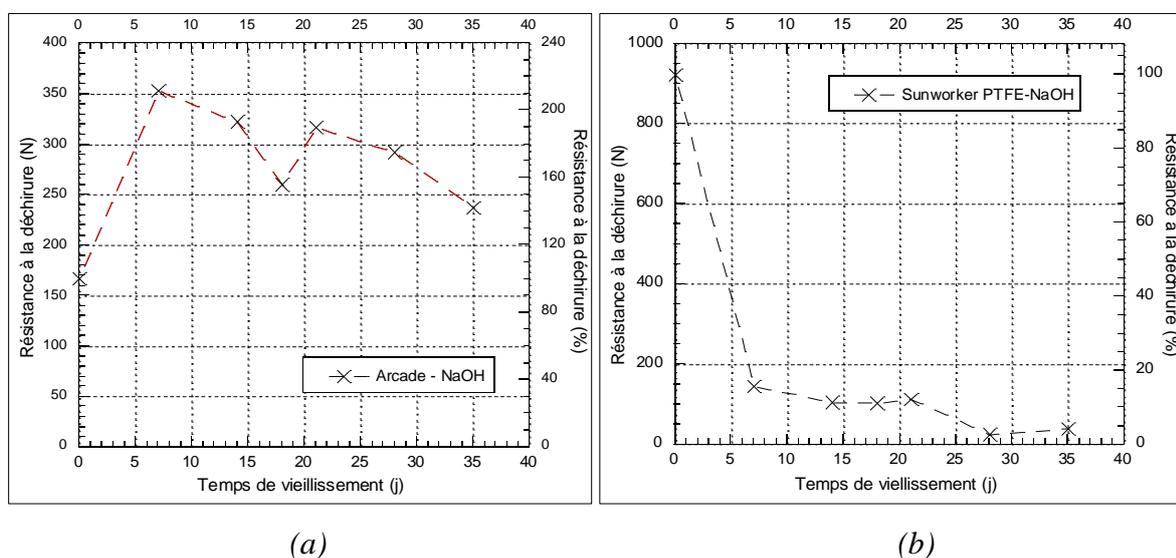


Figure 63 : Résistance à la déchirure au clou (N) en fonction du temps de vieillissement (j) de l'arcade (a) et du Sunworker PTFE (b) en milieu basique

- Milieu acide

La Figure 64 présente les résultats de mesure de la résistance à la déchirure au clou sur l'Arcade (a) et sur le Sunworker PTFE (b) en fonction de la durée de vieillissement dans la solution de H₂SO₄. Les deux courbes sont quasi constantes. L'Arcade garde une résistance à la déchirure proche de 170N et le Sunworker PTFE garde une résistance à la déchirure proche

de 950N. Comme pour la résistance à la traction, il y a pas ou peu d'influence du vieillissement en milieu acide sur la résistance à la déchirure au clou. Il peut être conclu que ce vieillissement n'influe pas sur les propriétés mécaniques des deux textiles.

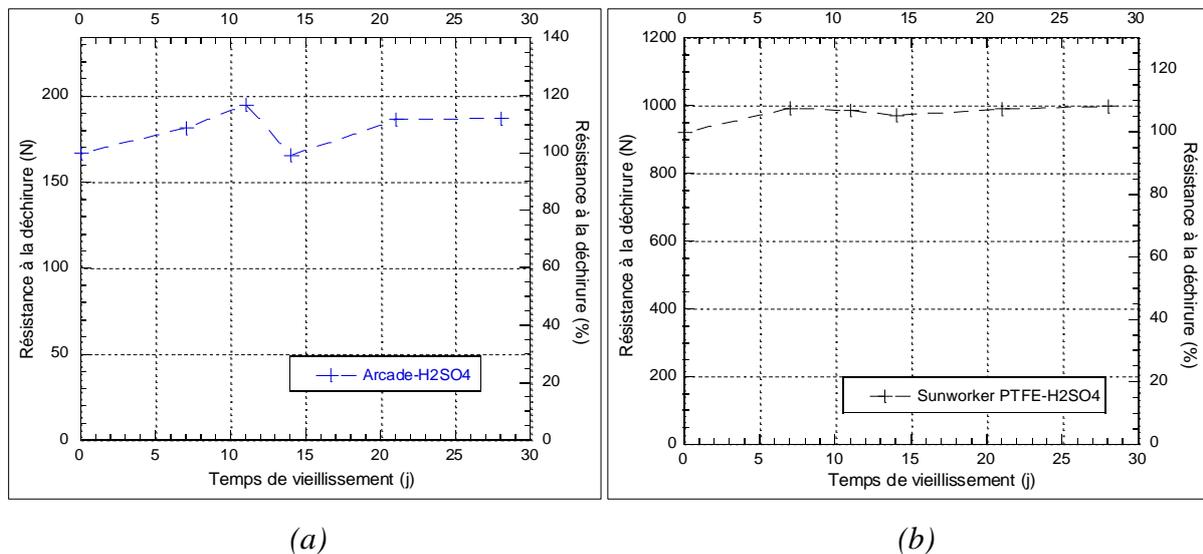


Figure 64 : Résistance à la déchirure au clou (N) en fonction du temps de vieillissement (j) de l'arcade (a) et du Sunworker PTFE (b) en milieu acide

Conclusion

Le travail présenté dans cette partie consiste en la conception et la mise au point d'un protocole de vieillissement accéléré par hydrolyse en milieu basique et acide, ainsi qu'en l'application de ce protocole sur deux textiles de parement pour le bâtiment.

Ces deux textiles, l'Arcade et le Sunworker, sont tous deux des tissés polyester enduits de PVC. En revanche, il a été contrecollé sur le Sunworker une membrane PTFE. Les deux textiles présentent une structure différente puisque l'Arcade a une structure fermée et étanche tandis que le Sunworker est à mailles ouvertes. Ces textiles sont destinés à être utilisés en tant que produit de parement pour le bâtiment. Ils seront donc soumis à de nombreuses contraintes mécaniques et climatiques. L'une des agressions majeures que va rencontrer le matériau est l'action de l'hydrolyse due à l'action de la pluie et de l'humidité de l'air.

Deux types de vieillissement ont été expérimentés : l'un en milieu basique, l'autre en milieu acide, car il est connu que les vieillissements sont différents selon le milieu. Les solutions ont été choisies selon la littérature et les composants présents dans l'eau de pluie. Ainsi, le NaOH a été utilisé pour l'essai en milieu basique, et le H₂SO₄ pour l'essai en milieu acide. Les pH des deux solutions ont été choisis extrêmes pour accélérer au mieux l'effet de la solution. Le pH du NaOH a été fixé à 13.5 et le pH du H₂SO₄ à 0.5. La température de l'essai a été fixée à 70°C, soit en dessous de la température de transition vitreuse des matériaux afin de ne pas modifier leur structure. Elle a été cependant maximisée pour accélérer le vieillissement.

Après vieillissement, un suivi de la perte de masse, de la résistance à la traction et de la résistance à la déchirure au clou a été effectué pour le suivi du vieillissement accéléré. Les textiles ont été vieillis 62 jours pour les échantillons destinés aux essais de traction et 32 ou 35 jours pour les autres essais. Les essais ont montré que le vieillissement en milieu acide est très peu perceptible. La perte de masse est seulement de 1% pour l'arcade et de 2% pour le

Sunworker PTFE après 32 jours. De la même manière, les résistances à la traction et à la déchirure au clou restent constantes pour les deux textiles pendant les 32 jours de vieillissement en milieu acide. A l'inverse, le vieillissement en milieu basique est très sévère. L'Arcade perd 45% de sa masse après 35 jours de vieillissement. Les résistances à la traction des deux textiles sont proches de zéro après 35 jours de vieillissement. En revanche, la résistance à la déchirure au clou de l'Arcade augmente pendant les premiers jours de vieillissement et est encore supérieure à sa valeur initiale après 35 jours de vieillissement. La solution basique a rigidifié le textile et lui a conféré une résistance ponctuelle plus importante. Ça n'est pas le cas pour le Sunworker PTFE qui voit sa résistance à la déchirure au clou chuter fortement pendant les premiers jours de vieillissement.

Cette étude montre que les vieillissements accélérés sont très différents selon que l'on utilise une solution basique ou acide. Le vieillissement en solution basique met en avant les différences entre les deux textiles. Ainsi l'Arcade qui est à structure fermée résiste mieux à l'hydrolyse que le Sunworker PTFE qui est ouvert, même si le Sunworker PTFE est plus résistant à l'état neuf. Suite à cette étude il conviendrait d'estimer la durée de vie des textiles par une loi du type loi d'Arrhenius. Pour cela il faudra reproduire l'essai avec une autre température de vieillissement. Il sera également nécessaire de combiner les résultats expérimentaux obtenus avec un travail de modélisation et de simulation numérique afin de corréler ces résultats avec une utilisation réelle des matériaux.

2.3 Conclusion du deuxième chapitre

L'objectif de ce chapitre était d'étudier ou de développer les matériaux pouvant être utilisés pour composer le panneau Isolpac, et de les caractériser. Ces matériaux sont de deux types : d'une part un isolant, et d'autre part deux toiles différentes.

L'isolant développé pour le système Isolpac est un isolant en ouate de polyester, issu à plus de 50% du recyclage de bouteilles d'eau. L'isolant est assemblé mécaniquement et thermiquement, sans liant chimique spécifique.

Une caractérisation hygrothermique de l'isolant ainsi que d'autres isolants du marché a été effectuée. Elle a mis en évidence le bon comportement de l'isolant vis-à-vis de l'humidité ainsi que ses performances thermiques. Cette caractérisation complète nous permettra par la suite d'utiliser les propriétés déterminées dans des simulations hygrothermiques dynamiques afin de prédire le comportement de l'isolant au sein d'une paroi isolée avec le système Isolpac.

11 toiles ont également été caractérisées afin de définir si parmi celles-ci il pouvait être trouvé une toile extérieure ainsi qu'une toile intérieure pour le nouveau système. La caractérisation a porté sur le comportement mécanique des toiles, mais également sur leur capacité à être étanche à l'eau, et à la vapeur d'eau à l'aide d'outils spécifiquement dédiés à la thèse.

Parmi ces 11 toiles, aucune n'a pu être sélectionnée pour servir de toile extérieure dans le système Isolpac. Une 12^{ème} toile a donc été spécifiquement développée dans le cadre de cette thèse. Cette nouvelle toile, permet de répondre aux besoins mécaniques, d'étanchéité à l'eau liquide et de perméabilité à la vapeur d'eau que demande la toile extérieure.

En revanche, la toile intérieure a pu être sélectionnée parmi ces 11 toiles du marché, puisque la caractérisation a mis en valeur plusieurs toiles à la fois résistantes mécaniquement, mais aussi étanche aussi bien à l'eau qu'à la vapeur d'eau.

Par ailleurs, des essais de vieillissement accélérés ont été effectués afin de pouvoir prédire le vieillissement des toiles dans le temps. Deux essais ont été effectués : un essai normé d'une part, et un essai au laboratoire réalisé avec un protocole que nous avons spécifiquement élaboré durant la thèse. Ces essais, s'ils ne sont pas terminés, nous permettent de comprendre le vieillissement de ces matériaux et d'envisager un bon comportement sur à minima une dizaine d'années.

L'ensemble des matériaux composants le panneau ont ainsi été sélectionnés et caractérisés. Ce travail important est nécessaire au projet de recherche et constitue un préalable au travail à effectuer sur le système Isolpac dans son ensemble. Il a permis de connaître et de sélectionner des matériaux qui répondent indépendamment les uns des autres à leur cahier des charges. Il reste maintenant à travailler sur l'assemblage de ces matériaux et à la caractérisation du panneau dans son ensemble. C'est l'objet du chapitre 3 de cette thèse.

Chapitre 3

**Développement des panneaux : fabrication, équilibre
hygrothermique, réaction au feu et résistances mécaniques**

3 Développement des panneaux : fabrication, équilibre hygrothermique, réaction au feu et résistances mécaniques

Les différents matériaux composant les panneaux ont été développés et caractérisés. Il reste à qualifier le panneau dans son ensemble, afin d'évaluer les interactions entre les différents éléments.

3.1 Méthodes et moyens de confection du panneau

Dans cette première partie, nous verrons comment sont assemblés les deux toiles et l'isolant pour former un panneau, et quels sont les « accessoires » qui vont s'y ajouter.

La confection est effectuée par BHD, qui est spécialiste de la découpe, de l'assemblage et de la pose de toiles tendues pour le bâtiment. Pour des raisons de confidentialité, le mode d'assemblage des panneaux ne sera pas détaillé.

Pour réaliser les panneaux, les deux toiles sont assemblées autour de l'isolant. L'isolant est ainsi « emballé », à l'image d'une mousse à l'intérieur d'un coussin. Il n'y a pas de fixations entre les toiles et l'isolant.

Les deux toiles sont assemblées entre elles au moyen de soudures à Hautes Fréquences (soudures HF). Ces soudures ont le mérite de ne pas nécessiter l'ajout d'une matière supplémentaire (colle, fil, bande d'apport...). Ce qui nous permet de conserver au mieux la maîtrise des composants du panneau. Par ailleurs, la littérature montre que deux toiles soudées par HF fusionnent à l'endroit de la soudure et qu'ainsi la soudure est plus résistante que la moins résistante des deux toiles soudées. La soudure HF n'est donc pas un point faible mécanique dans le panneau.

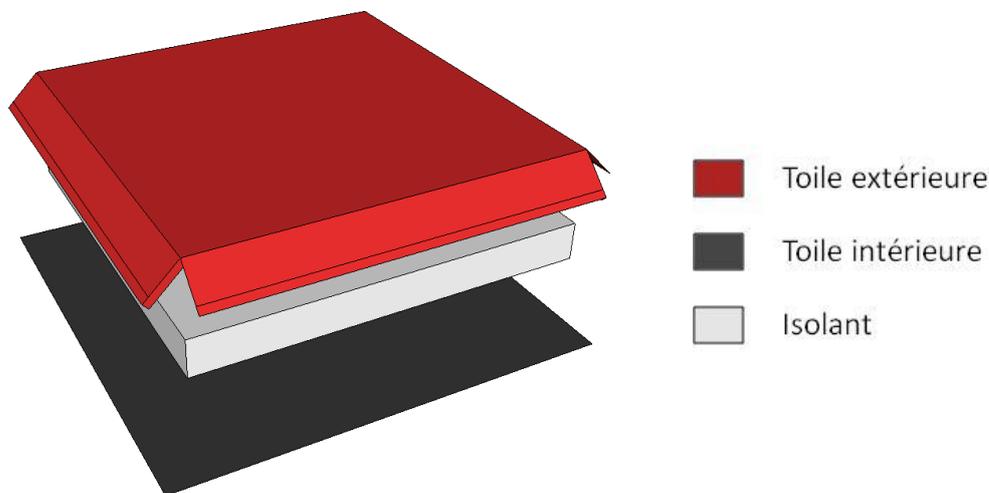


Figure 65 : Vue éclatée d'un panneau Isolpac

La Figure 65 montre une vue éclatée du panneau avec ces trois principaux composants : la toile extérieure, la toile intérieure et l'isolant. Comme représentée sur la vue, la toile extérieure vient se rabattre pour venir se fixer sur la toile intérieure, formant ainsi les cotés du panneau.

3.2 La gestion du risque de condensation dans les parois du bâtiment

3.2.1 Les Flux hygrothermiques dans les parois du bâtiment

Les bâtiments, construits pour durer au moins plusieurs dizaines d'années possèdent un grand nombre de matériaux susceptibles de se détériorer à cause de leur interaction avec l'humidité. (Kumaran M.K., 2009)

Les matériaux de construction subissent trois processus de transferts :

- transfert thermique
- flux d'humidité
- flux d'air

Les trois états de l'eau (gazeux, liquide, solide) peuvent exister dans un matériau de construction. De plus, les matériaux peuvent capter les molécules d'eau contenues dans l'air et les conserver sur leur surface. L'humidité ainsi contenue est dite dans un état adsorbée. La capacité d'adsorption d'un matériau est différente selon le matériau. Les matériaux captant beaucoup d'eau par adsorption sont dits hygroscopiques.

En l'absence d'un autre matériau, l'équilibre entre les phases solides, liquides et gazeuses est bien défini. Pour une température donnée, il existe une pression de vapeur maximale, appelée pression de vapeur saturante. Quand la pression partielle de vapeur d'eau atteint cette pression de vapeur saturante, il y a condensation de la vapeur.

Il n'y a qu'à une température (273,16K) et à une pression de vapeur saturante (611 Pa) que les trois états de l'eau peuvent coexister. Cette configuration s'appelle le point triple de l'eau.

Pour toute autre température T (en K), la pression de vapeur saturante p_{vsat} (en Pa) est définie par (Kumaran M.K., 2009) :

$$p_{vsat} = e^{28,542 - \frac{5869,9}{T} - 2882/T^{1,5}} \quad (3.1)$$

pour $250K < T < 273,16K$

$$p_{vsat} = e^{22,565 - \frac{2377,1}{T} - 33623/T^{1,5}} \quad (3.2)$$

pour $273,16K < T < 330K$

On constate Figure 66 que plus la température est élevée, plus la pression de vapeur saturante est élevée, ce qui signifie que plus la température est élevée, moins la vapeur d'eau aura tendance à se condenser.

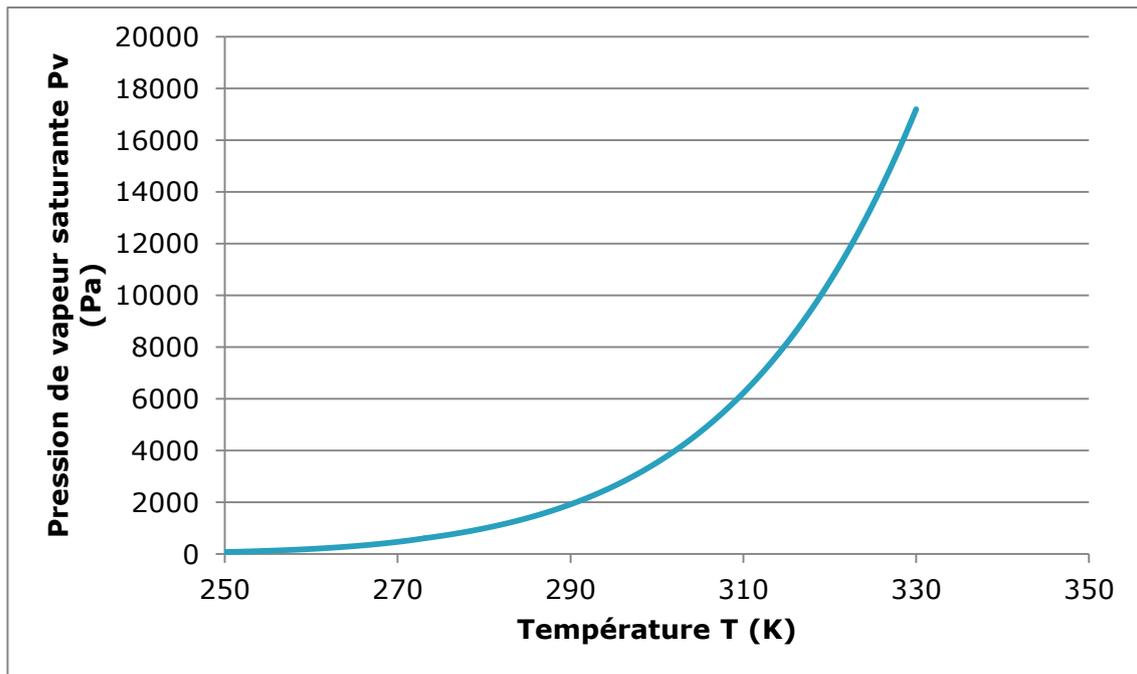


Figure 66 : Courbe de pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température

De plus, l'humidité relative de l'air (exprimée en %) se définit par :

$$HR = p_v / p_{vsat} \quad (3.3)$$

Avec p_v la pression partielle de vapeur d'eau (Pa).

Lorsqu'un matériau est soumis à l'air ambiant humide, il y a adsorption. La totalité de la surface du matériau est susceptible de capter de l'humidité, y compris les surfaces offertes par les pores du matériau, ce qui augmente significativement la surface prise en compte. La Figure 67 décrit ce phénomène.

Quand la pression partielle de vapeur d'eau est inférieure à la pression de saturation, les molécules d'eau adsorbées forment une couche mono-moléculaire de molécules d'eau sur la surface du matériau poreux. Quand la pression augmente, des couches multimoléculaires commencent à se former dans les pores. Puis, quand la pression partielle approche la saturation, des gouttes d'eau liquide ou des cristaux de glace se forment dans le matériau. A partir de là, la vapeur d'eau se condense très rapidement, et les pores peuvent même devenir saturés si l'air environnant a une humidité relative de 100%. La pression de vapeur saturante dans un milieu poreux est inférieure à celle d'un milieu libre. La différence dépend de la taille des pores. Et comme le matériau possède souvent des pores de dimensions variables, la pression de vapeur saturante n'est pas constante dans le matériau.

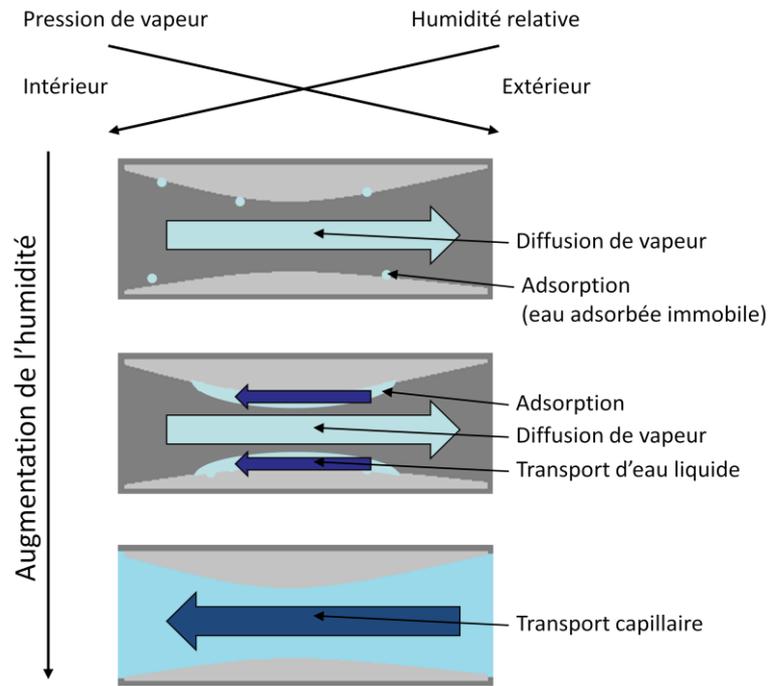


Figure 67 : Phénomènes de diffusion, d'adsorption et de transport capillaire dans les pores des matériaux (Künzel H.M., 1995)

L'effet inverse se produit également : un matériau saturé en eau au contact d'un environnement partiellement saturé va sécher. Cela s'appelle la désorption. En fonction de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant, l'humidité relative du matériau poreux va atteindre un équilibre. Généralement, pour une même pression partielle de vapeur d'eau de l'air, l'humidité relative atteinte après désorption est plus élevée que celle atteinte après sorption. Ce phénomène s'appelle l'hystérésis (Johannesson B., 2009).

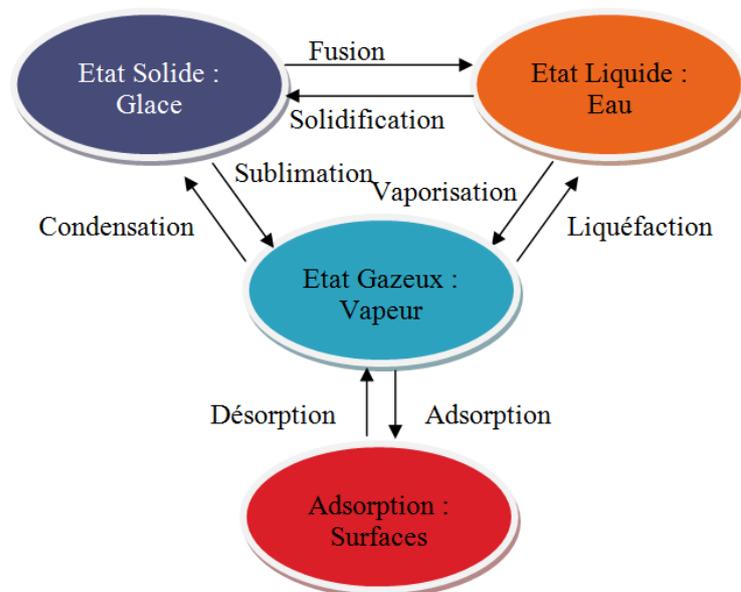


Figure 68 : Les différents processus subis par l'eau impliquant un changement de phase (Kumaran M.K., 2009)

L'eau soumise aux variations de température peut subir des changements de phases (*Figure 68*). Ce changement affecte deux propriétés de l'eau : sa mobilité et son énergie.

Chaque état possède ses modes de transferts, induits par différents paramètres et à vitesses différentes.

Les équations de transfert sont de la forme :

$$J_B = -k \cdot \text{grad } \phi_B \quad (3.4)$$

Avec J_B le flux auquel l'entité B est transportée, $\text{grad } \phi_B$ le potentiel de transfert et k le coefficient de transfert.

Le flux est tridimensionnel et ses composantes J_{Bx} , J_{By} et J_{Bz} peuvent être exprimées par :

$$J_{Bx} = -k_x \cdot \left(\frac{d}{dx}\right) \phi_{Bx} \quad (3.5)$$

Si le matériau est isotrope, il peut être écrit que :

$$k_x = k_y = k_z \quad (3.6)$$

Mais en général, les matériaux de construction sont anisotropes.

Par exemple, le flux de chaleur, J_q , dans un isolant sec s'écrit :

$$J_q = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (3.7)$$

Avec λ la conductivité thermique du matériau exprimée en W/mK. Ainsi, plus la conductivité thermique λ est faible, plus les flux sont faibles et donc moins il y a de déperdition de chaleur dans le matériau.

3.2.2 Impact de l'humidité sur la conductivité des isolants

Ces phénomènes de transferts se retrouvent dans les parois d'un bâtiment. De ce fait, il est important d'étudier les flux hygrothermiques traversant ces parois, afin de contrôler que les taux d'humidité ne sont pas trop importants. En effet, selon le niveau d'humidité, des champignons, des bactéries, des acariens, des cafards et autres insectes vont se développer. Ces microorganismes vont être source pour les habitants d'allergies, asthmes, infections, toxicoses... En plus de ces effets sur l'être humains, ces organismes dégradent les propriétés des matériaux de construction du bâtiment et peuvent aller jusqu'à complètement détruire certains matériaux de construction organiques. (Burge H.A., 2009)

Enfin, la condensation dans les parois est à éviter absolument : Elle peut être la cause de dégradation de l'enveloppe et diminue fortement les propriétés thermiques des isolants. En effet, il faut garder en tête que l'isolation thermique provient de la capacité qu'ont ces matériaux à emprisonner de l'air. Cet air a une conductivité thermique de l'ordre de 0.026W/mK. Quand ces matériaux absorbent de l'humidité, une partie de cet air est remplacé par de l'eau, qui a une conductivité thermique de l'ordre de 0.6W/mK. La conductivité thermique du matériau augmente donc fortement avec l'humidité. (Karamanos A., 2008)

Karamanos A. et al. ont montré dans une étude (Karamanos A., 2008) l'impact de l'humidité sur des isolants en laine de roche, en mesurant la conductivité thermique à l'état sec, à l'état humide et après séchage. L'étude montre (Figure 69) que la conductivité thermique à l'état humide est bien supérieure à la conductivité thermique à sec. Mais après séchage, la conductivité thermique redevient égale à la conductivité initiale.

Il est important de mentionner que les laines de roches testées dans cette étude sont toutes traitées pour que les fibres aient des propriétés d'étanchéité à l'eau. Cette étude ne peut donc s'étendre à l'ensemble des laines de roche.

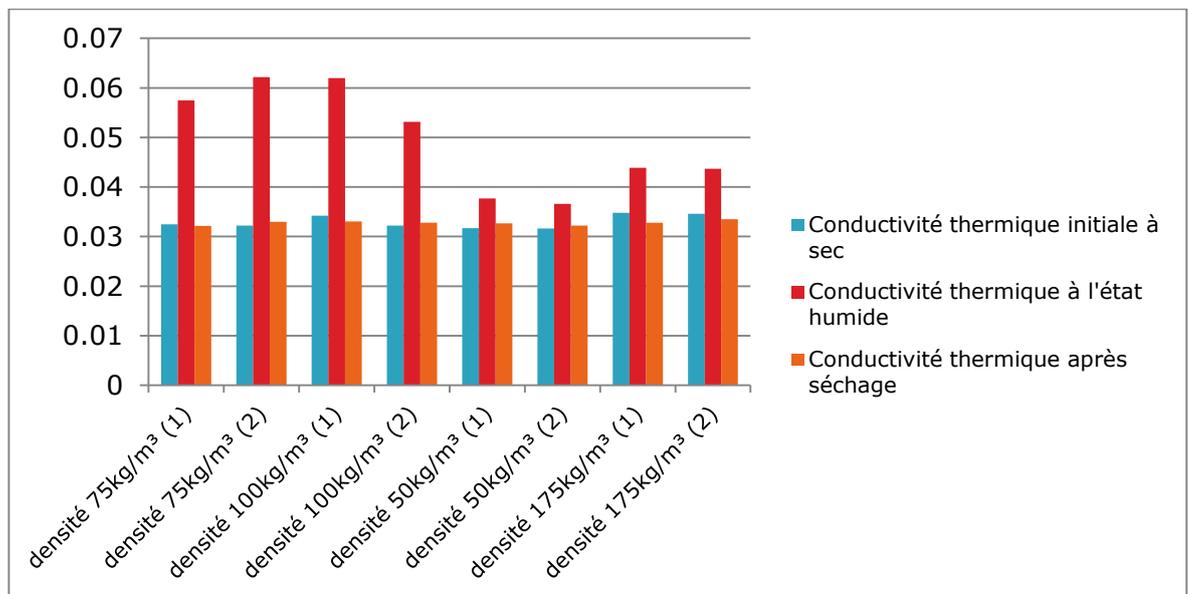


Figure 69 : Conductivité thermique (en W/mK) des différents échantillons secs, humides et après séchage

L'isolant utilisé dans le développement du nouveau système d'isolation par l'extérieur est un isolant en polyester dont le comportement à l'eau a été caractérisé dans le cadre de cette thèse. Cette caractérisation est présentée dans la partie 2.1.2.

3.2.3 Problème de condensation dans l'enveloppe du bâtiment

Les parois du bâtiment sont composées de plusieurs matériaux, ayant chacun des propriétés différentes (diffusivité, perméabilité à la vapeur d'eau...). Ces différences de propriétés sont à regarder avec beaucoup de précautions puisqu'elles peuvent être la cause de condensation dans l'isolant.

le flux de vapeur d'eau, J_v , peut s'écrire sous la forme des équations de transfert vues au paragraphe 3.2.1 :

$$J_v = -\delta \cdot \text{grad } p \quad (3.8)$$

avec δ la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau considéré et p la pression pouvant varier de 0 à la pression de vapeur saturante

La norme EN ISO 12572 :2011 (AFNOR, Octobre 2001) définit le facteur de résistance à la vapeur d'eau par :

$$\mu = \delta_a / \delta \quad (3.9)$$

Avec δ_a la perméabilité à la vapeur de l'air définie par la formule de Schirmer par :

$$\delta_a = \frac{0,083 p_0}{R_v T p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (3.10)$$

Avec R_v , la constante des gaz pour la vapeur d'eau valant 462 N.m/(kg.K), p_0 la pression barométrique normale valant 1013,25 hPa, p la pression barométrique et T la température de l'essai en K (souvent égale à 23°C).

La perméabilité à la vapeur d'eau de l'air à 23°C est représentée Figure 70.

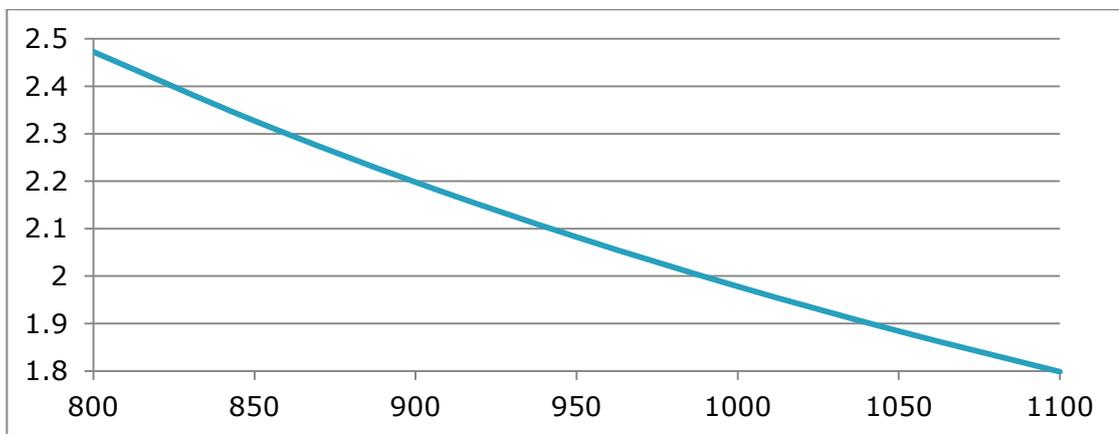


Figure 70 : Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (en 10^{-10} kg/(m.s.Pa) en fonction de la pression barométrique à 23°C (en hPa)

L'épaisseur d'air équivalente S_d est donnée par :

$$S_d = \mu \cdot d \quad (3.11)$$

Avec d l'épaisseur du matériau.

Afin de s'assurer du bon fonctionnement du complexe vis-à-vis de la vapeur d'eau, il est important de déterminer les μ et S_d de chacun des matériaux qui le compose. En effet, ce sont ces valeurs qui vont déterminer la pression partielle p_v de vapeur d'eau dans les matériaux. La connaissance de ces paramètres nous permettra de calculer la possibilité de condensation dans les parois grâce à la méthode Glaser (B.B.S Slam - service technique, 31 janvier 2011).

En observant les variations de température sur une coupe d'une paroi multicouche, il peut être constaté que la température varie linéairement dans chacun des matériaux, et ce en fonction de la conductivité thermique de chacun de ces matériaux. C'est également le cas pour le nouveau matériau (Figure 71).

Le béton ayant une conductivité élevée, la température reste quasiment constante dans le matériau. C'est logiquement la partie « isolant » qui a un réel effet sur la température,

puisque sa face froide est à environ -9°C lors que sa face chaude est située aux alentours de 17°C .

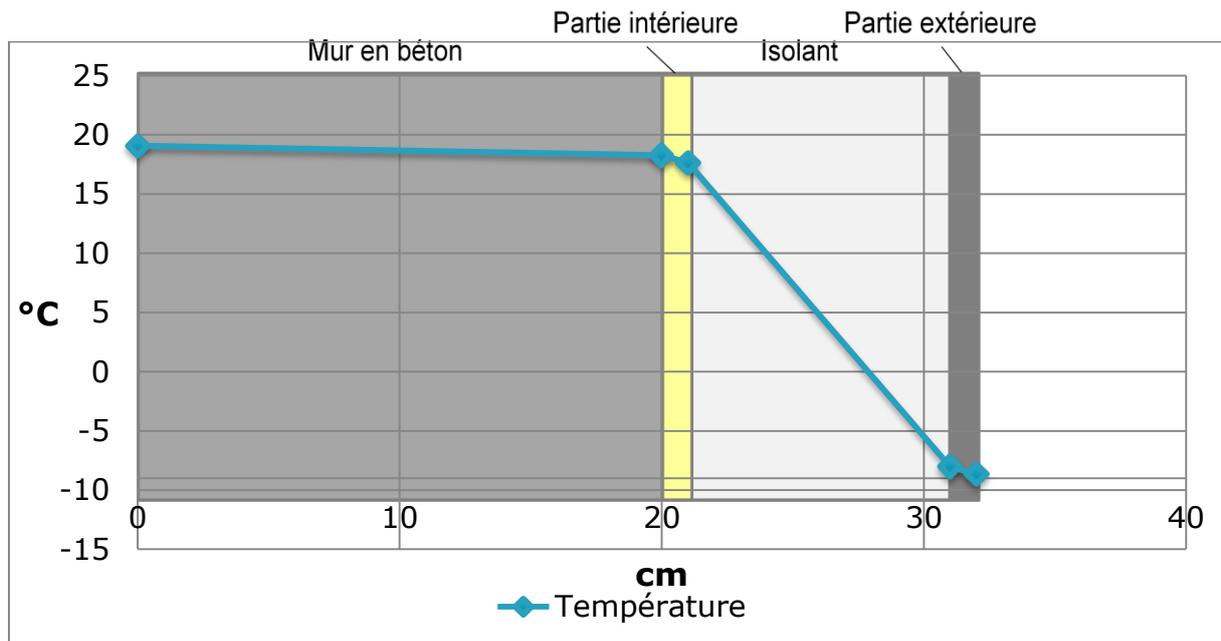


Figure 71 : Variation de la température sur une vue en coupe d'un mur béton isolé avec le nouveau système d'isolation par l'extérieur.

Sur cette même coupe, les variations de pression partielle de vapeur d'eau dans la paroi (Figure 72) sont données, grâce à la méthode de calcul Glaser. Cette pression partielle va dépendre des taux d'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment ainsi que des S_d des différents matériaux composant l'enveloppe.

En effet, la pression partielle à l'intérieure est donnée par :

$$p_{v_{int}} = HR_{int} P_{vsat_{int}} \quad (3.12)$$

Avec HR_{int} l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment (souvent prise à 60% pour simuler une situation très défavorable)

De même, la pression partielle à l'extérieure est donnée par :

$$p_{v_{ext}} = HR_{ext} P_{vsat_{ext}} \quad (3.13)$$

Avec HR_{ext} l'humidité relative à l'extérieur du bâtiment (souvent prise à 90% pour simuler une situation très défavorable).

La pression partielle de vapeur pour chaque couche d'une enveloppe à n couches est calculée selon la méthode Glaser par itération de l'intérieur vers l'extérieur par les formules suivantes :

$$P_{v_i} = P_{v_{i-1}} - S_{d_i} |P_{v_{int}} - P_{v_{ext}}| / S_{d_{tot}} \quad (3.14)$$

Avec $P_{v_i} = P_{v_{int}}$, S_{d_i} l'épaisseur d'air équivalente de la couche i et $S_{d_{tot}} = \sum_1^n S_{d_i}$

On en déduit alors les pressions partielles à chaque intersection entre deux matériaux. Le long d'un matériau, la pression partielle évolue de manière linéaire.

Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.2.1, la pression de vapeur saturante dépend directement de la température. Nous la représentons sur la même coupe que la pression partielle de vapeur afin d'observer si cette pression partielle est parfois supérieure à la pression de vapeur saturante dans quel cas il y aura alors condensation dans la paroi (Figure 72).

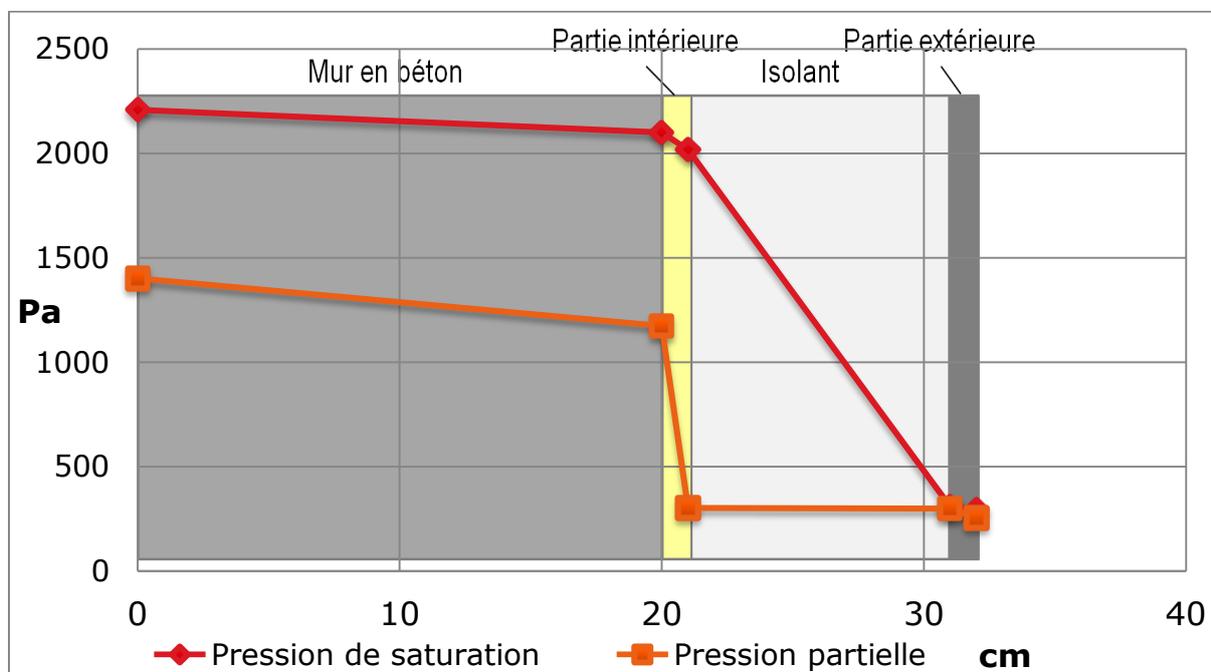


Figure 72 : Variation de la pression partielle et de la pression de saturation sur une vue en coupe d'un mur béton isolé avec le nouveau système d'isolation par l'extérieur.

On constate que c'est à la limite entre l'isolant et la partie extérieure qu'il y a risque de condensation. Il faut donc observer les propriétés des composants du complexe isolant afin de garantir leur compatibilité en vue d'éliminer toute possibilité de condensation dans l'isolant.

Le point critique se situant au niveau de la toile extérieure, nous avons donc travaillé à avoir une toile ayant une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau la plus faible possible. A l'inverse, la toile intérieure permet de diminuer la pression partielle dans l'isolant. Sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau doit donc être élevée.

3.2.4 Contraintes sur les toiles utilisées dans le panneau Isolpac

La toile extérieure doit avoir une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau relativement faible, tout en étant tout de même imperméable pour que l'isolant ne soit pas mouillé par la pluie. Dans le milieu textile, la toile est qualifiée de « imper-respirante ».

Ces toiles sont notamment connues dans le milieu des textiles sportifs, où l'on cherche à procurer au sportif un vêtement étanche pour le protéger de la pluie, mais permettant d'évacuer sa transpiration (sous forme de vapeur d'eau). Certains de ces vêtements contiennent également une partie isolante afin de protéger son porteur du froid. La configuration est ainsi très proche de celle du complexe isolant étudié : une toile intérieure (coté peau dans le cas du vêtement ou coté mur dans le cas du bâtiment), une partie isolante, et une toile extérieure respirante.

Des études ont été réalisées dans le domaine des vêtements. J. fan et al. ont testé des superpositions de membranes et d'isolant sur une plaque chaude gardée qu'ils ont adaptée pour qu'elle soit « transpirante » (Fan J., 2003). Ils ont ensuite réalisé une comparaison entre un modèle mathématique et un modèle expérimental (Fan J., 2004).

Dans notre cas, les conditions ne sont pas les mêmes : la température intérieure est plutôt de l'ordre de 20°C alors que dans le cas du vêtement, elle se situe plus aux alentours de 35°C. De plus, les épaisseurs sont beaucoup plus importantes dans le bâtiment. Enfin, les quantités d'humidité sont très différentes et surtout l'isolant ne s'enlève pas, contrairement au vêtement qui est régulièrement retiré, l'isolant est lui toujours « porté » par le bâtiment.

Les travaux présentés dans les paragraphes 2.2.2.7 et 2.2.2.8 ont cherché à répondre à ces besoins. Nous nous sommes ainsi assurés d'obtenir une toile extérieure avec une grande perméabilité à la vapeur d'eau, et à l'inverse, une toile intérieure faisant barrage à la diffusion de vapeur d'eau. La présente partie a pour but de vérifier que ces propriétés sont suffisantes pour s'assurer du bon fonctionnement du système et de sa pérennité.

3.2.5 Analyse bibliographique des méthodes dynamiques de prédiction des flux hygrothermiques dans les parois et validation de ces méthodes

Au cours d'une même journée, les températures fluctuent énormément à l'extérieur d'un bâtiment. De ce fait, la description du problème de condensation dans l'enveloppe réalisée au paragraphe 3.2.3 selon la méthode Glaser, si elle pose bien le problème, n'est pas proche de la réalité. En effet, le calcul est réalisé dans les pires conditions pour observer l'apparition éventuelle de condensation. Par exemple, pour une région comme le nord de la France, une température intérieure de 20°C, avec une humidité relative de 60% et une température extérieure de -9°C avec une humidité relative de 90% sont imposées. Or, ces conditions extrêmes ne sont en réalité que très peu souvent atteintes et surtout uniquement de manières ponctuelles, s'alternant avec des conditions plus favorables. La méthode Glaser n'est donc qu'un outil mais ne permet pas de représenter la réalité.

Sur ce sujet, Z. Pavlik et al. réalisent une analyse en laboratoire du phénomène de condensation dans un isolant en plaçant un échantillon de mur isolé entre deux chambres climatiques, chacune des chambres climatique reproduisant les conditions réelle de températures et d'humidité dans des périodes de temps défavorables, l'une simulant l'intérieur du bâtiment, l'autre l'extérieur (Pavlik Z., 2008). J. Toman et al. ont comparé cette étude avec des mesures réalisées sur site et montrent que les conditions sont bien plus favorables sur site qu'en laboratoire (Toman J., 2009). En effet, il y avait condensation dans la simulation en laboratoire alors que les mesures sur site ont montré que l'humidité relative n'avait jamais dépassé 54%.

Les tests effectués en laboratoire soumettent des produits à des conditions d'exposition sévères et arbitraires. Cette pratique est prudente mais peu souvent représentative des conditions réelles d'exposition. Les mesures sur site sont souvent des adaptations des tests réalisés en laboratoire. Un jugement professionnel est alors nécessaire pour évaluer la pertinence de ces tests et interpréter les résultats. (Cammalleri V., Octobre 2009)

Tout ceci montre l'intérêt d'une étude dynamique, tout particulièrement dans notre cas, puisque les matériaux sont nouveaux dans cette application et nous ne pouvons baser sur l'expérience pour connaître leurs comportements.

Pour réaliser ces études dynamiques, des logiciels tels que le logiciel Wufi® développé par l'institut IBP Fraunhofer permettent de réaliser des simulations hygrothermiques dynamiques de parois.

H.M. Künzle a réalisé une comparaison entre un calcul avec la méthode Glaser et une simulation réalisée sous Wufi d'une toiture cathédrale non ventilée comportant une laine minérale entre une membrane respirante (à l'extérieur) et un frein-vapeur (à l'intérieur) (Künzel H.M., September 2000). Son étude montre que les résultats sont bien plus pénalisants avec la méthode Glaser que sous Wufi, notamment de par la prise en compte dans Wufi des radiations solaires qui permettent un séchage de la paroi (Figure 73).

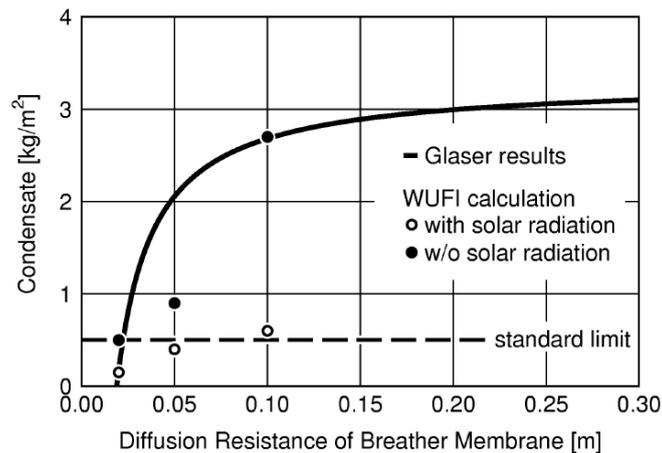


Figure 73 : Condensation dans une toiture selon le calcul Wufi, Wufi sans radiations solaires et Glaser (Künzel H.M., September 2000)

Il constate en effet une quantité d'eau condensée dans la toiture trois fois plus importante dans le calcul Glaser que dans le calcul Wufi®.

Plusieurs études ont validé la pertinence du logiciel Wufi®. M. Krus a par exemple instrumenté une paroi et comparé les mesures avec des résultats de simulation sous Wufi de cette même paroi (Krus M., 10-11 September 1998). La Figure 74 montre l'excellente corrélation entre les mesures et les résultats calculés par Wufi®.

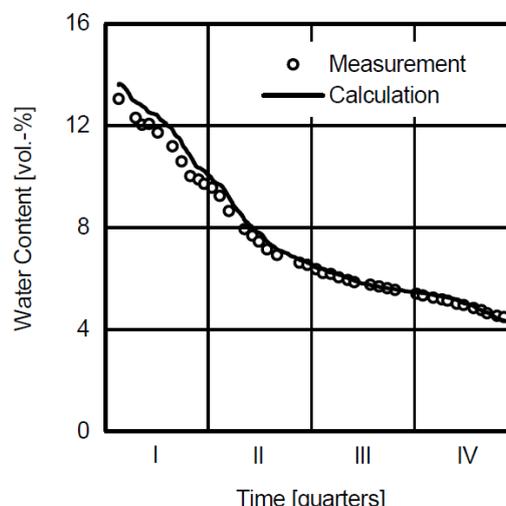


Figure 74 : Taux d'humidité mesuré et calculé en fonction du temps dans un échantillon de maçonnerie imprégné pour repousser l'eau (Krus M., 10-11 September 1998)

Il sera donc intéressant d'utiliser le logiciel Wufi® pour observer les flux hygrothermiques dans une paroi isolée avec le nouveau système Isolpac, afin de déterminer les résistances à la diffusion optimales pour les membranes textiles, et d'analyser le comportement de la paroi isolée au cours du temps. Pour cela, j'ai suivi une formation au CSTB de Grenoble donné par l'Institut Fraunhofer sur les flux hygrothermiques dans les parois du bâtiment et l'utilisation du logiciel Wufi®. J'ai ainsi pu mener de nombreux cas d'études sur des bâtiments courants construits par Norpac, mais surtout pour les besoins de la thèse. Cette dernière étude est décrite dans les parties qui suivent.

3.2.6 Méthodologie de notre étude du comportement hygrothermique du panneau

La méthode utilisée est une combinaison de simulations sur Wufi® et d'expérimentations in situ (Figure 75).

Dans un premier temps, les matériaux ont été caractérisés. La caractérisation a été détaillée dans le chapitre 2 de la thèse. Des mesures de résistances à la diffusion de la vapeur d'eau ont été effectuées sur les toiles du partenaire Dickson. Le matériau isolant a également été caractérisé. Sa porosité, sa courbe de sorption, sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, son coefficient d'absorption d'eau, sa conductivité thermique en fonction de l'humidité et sa chaleur spécifique ont été déterminées. Cette caractérisation fait l'objet du précédent chapitre. Une fois les matériaux caractérisés, une simulation sous Wufi® a été réalisée afin de déterminer si les matériaux sont compatibles et sinon quelles caractéristiques ils devront obtenir.

En parallèle de cette simulation, des mesures ont été réalisées in situ afin de confronter la théorie du logiciel et la pratique.

Afin d'identifier de comparer les matériaux utilisés dans le complexe et des matériaux disponibles sur le marché, d'autres toiles et isolants ont été caractérisés de la même manière. Des simulations pourront ainsi être effectuées avec ces matériaux.

L'ensemble des résultats permettront l'élaboration d'un bâtiment démonstrateur sans risque de perturbation de son équilibre hygrothermique.

Nous présentons plus particulièrement dans cette partie la simulation hygrothermique dynamique réalisée sur le logiciel Wufi réalisée sur une paroi isolée avec le nouveau système Isolpac, suite à la caractérisation des différents matériaux composants le système réalisée dans la partie précédente.

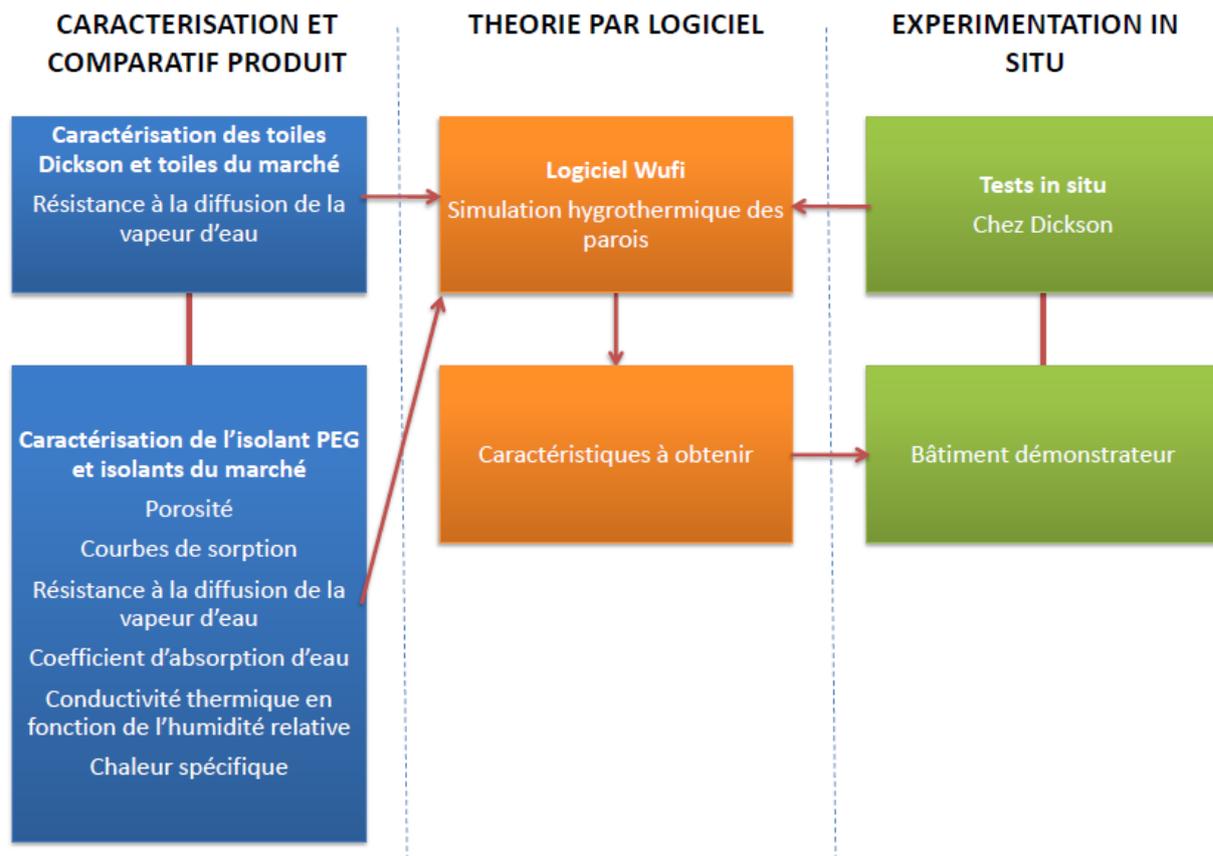


Figure 75 : Méthodologie de travail pour l'analyse des flux hygrothermiques dans le complexe isolant

3.2.7 Présentation du modèle dynamique utilisé

L'objet de cette partie est de décrire le modèle utilisé par le logiciel Wufi, qui est également utilisé dans le cadre de cette thèse.

Afin de décrire la diffusion des molécules de vapeur dans l'air au moyen d'équations, il est supposé que le gradient de pression total est négligeable. Il est alors possible d'écrire l'équation suivante :

$$g_v = (D_m \nabla m + D_T \nabla T) \quad (3.15)$$

La diffusion basée sur le gradient de température est négligeable dans les matériaux du bâtiment en comparaison avec la diffusion causée par la différence de fraction massique. Par ailleurs, pour des gaz parfaits, il y a une relation de proportionnalité entre la fraction massique et sa portion de pression totale. La diffusion de la vapeur d'eau dans l'air peut donc s'écrire par l'équation simplifiée suivante :

$$g_v = -\delta_a \nabla p \quad (3.16)$$

D'après la norme EN ISO 12572 (AFNOR, Octobre 2001), la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air peut être déterminée par l'équation suivante :

$$\delta_a = 2 \cdot 10^{-7} T^{0,81} / P_L \quad (3.17)$$

Cependant, la diffusion de la vapeur d'eau dans un matériau poreux n'est pas similaire à la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air. En effet, des collisions entre les parois des pores et les molécules sont fréquentes. Par ailleurs, les phénomènes d'adsorption décrits au 3.2.1 ralentissent la diffusion des molécules de vapeur à travers les matériaux. Un facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ propre à chaque matériau est introduit afin d'exprimer cette diffusion dans un matériau poreux :

$$g_v = -\frac{\delta_a}{\mu} \nabla p \quad (3.18)$$

Concernant la conduction capillaire, l'équation de diffusion utilisée est :

$$g_w = -D_\varphi \nabla \varphi \quad (3.19)$$

L'enthalpie de changement de phase peut être exprimée par :

$$S_w = -h_v \nabla g_v \quad (3.20)$$

Par ailleurs, le transport d'humidité dans les matériaux poreux du bâtiment peut être décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(g_w + g_v) + S_w \quad (3.21)$$

De même, concernant les transferts de chaleur, l'équation suivante peut s'écrire :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla q + S_h \quad (3.22)$$

Ces deux dernières équations sont fortement couplées par l'intermédiaire notamment de la conductivité thermique, l'enthalpie totale, et la dépendance de la température au flux de vapeur. Elles peuvent être résolues ensemble quand elles sont limitées à deux variables : la température et l'humidité relative.

Ainsi, le transport simultané de chaleur et d'humidité est exprimé de la façon suivante :

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_v \nabla \left(\frac{\delta_a}{\mu} \nabla(\varphi p_{sat}) \right) \quad (3.23)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (3.24)$$

Ces deux équations peuvent s'écrire en explicitant les propriétés des matériaux :

$$\rho C_m \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_v \nabla \left(\frac{\delta_a}{\mu} \nabla(\varphi p_{sat}) \right) \quad (3.25)$$

$$\rho_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(\rho_w D_w \nabla w + \frac{\delta_a}{\mu} \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (3.26)$$

h_v et ρ_w sont deux propriétés connues de l'eau. δ_a est déduit de la température T et de la pression de l'air.

Ainsi, ρ , C_m , λ , D_w et μ sont les propriétés intrinsèques aux différents matériaux qui doivent être déterminées. De plus, pour résoudre ces équations, une relation entre la teneur en eau w et l'humidité relative φ doit être donnée. Cette relation correspond à la courbe de sorption des matériaux.

Le coefficient de transfert d'eau liquide D_w est difficile à mesurer. Cependant, le coefficient de transfert d'eau liquide par succion peut être approximé par une relation entre D_{ws} et le coefficient d'absorption d'eau liquide A grâce à la relation (Krus M., 1996) :

$$D_{ws}(w) = 3.8 \left(\frac{A}{w_f} \right)^2 1000 \left(\frac{w}{w_f} \right)^{-1} \quad (3.27)$$

Dans ce chapitre, c'est l'ensemble de ce modèle qui a été utilisé pour simuler le comportement du produit vis-à-vis des flux de chaleur et d'humidité. Les propriétés ρ , C_m , λ , μ et A ainsi que les courbes de sorptions ont été mesurées pour l'isolant (voir 2.1.2). Pour les toiles, seules le C_m et le μ (voir 2.2.2.3 et 2.2.2.4) ont été caractérisés car les autres valeurs ne sont pas significatives pour des toiles. En effet, une toile n'absorbe pas d'eau liquide, et son épaisseur est trop faible pour qu'il y ait une influence de sa capacité à absorber de la vapeur ou de la chaleur.

Ces mesures expérimentales associées au modèle nous permettent d'analyser le comportement des panneaux Isolpac.

3.2.8 Modélisation du problème

3.2.8.1 Configuration de la paroi modélisée

La paroi considérée est celle d'un bâtiment neuf classique : une structure en béton et une plaque de plâtre comme habillage intérieur. Le bâtiment est isolé avec le système Isolpac.

La modélisation se fait en une dimension. La Figure 76 représente la vue en coupe de la paroi modélisée. Les matériaux suivants sont modélisés de l'extérieur vers l'intérieur : la toile extérieure, l'isolant, la toile intérieure, le béton, une lame d'air et une plaque de plâtre. Les propriétés des différents matériaux tels qu'ils ont été rentrés dans le logiciel sont données dans le Tableau 29.

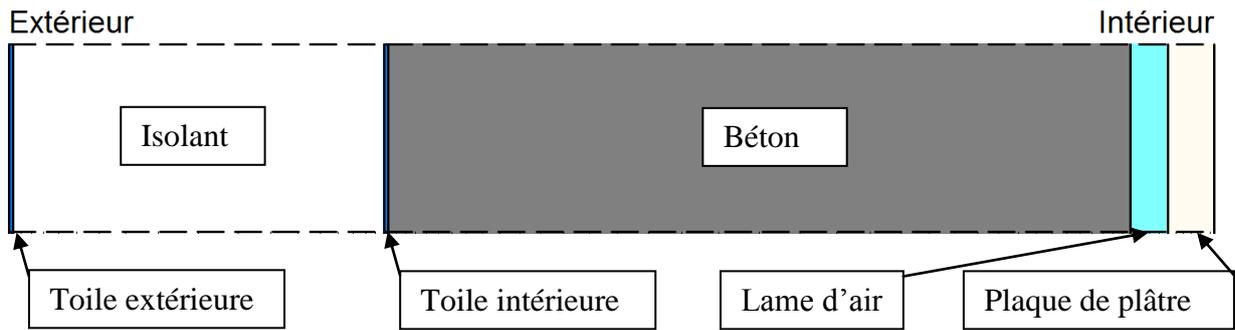


Figure 76 : Vue en coupe de la paroi modélisée

	Densité (kg/m ³)	Porosité (m ³ /m ³)	Chaleur spécifique (J/kgK)	Conductivité thermique (W/mK)	Résistance à la diffusion (-)	Epaisseur (mm)
Toile extérieure	455	0.001	1304	2.2	33	1
Isolant	21	0.98	1189	0.031	2	100
Toile intérieure	470	0.001	1273	2.2	3280	1
Béton	2220	0.18	850	1.6	248	200
Lame d'air	1.3	0.999	1000	0.071	0.73	10
Plaque de plâtre	850	0.65	850	0.2	8.3	12.5

Tableau 29 : Propriétés des matériaux tels qu'ils ont été modélisés

3.2.8.2 Climat extérieur utilisé pour la simulation

Le bâtiment considéré se situe à Lille. Le fichier météo utilisé pour le calcul est donc un fichier météo issu des données météorologiques mesurées à Lille dans la période 2000-2009. Ces données prises sur 10 années sont moyennées afin d'en déduire une année typique. Cette année typique est ensuite utilisée par le logiciel qui va la répéter successivement. Ainsi, comme notre calcul est fait sur 10 ans, le fichier météo est utilisé successivement 10 fois. Les Figure 77 et Figure 78 représentent les variations de température et d'humidité relative au cours d'une année pour le climat choisi.

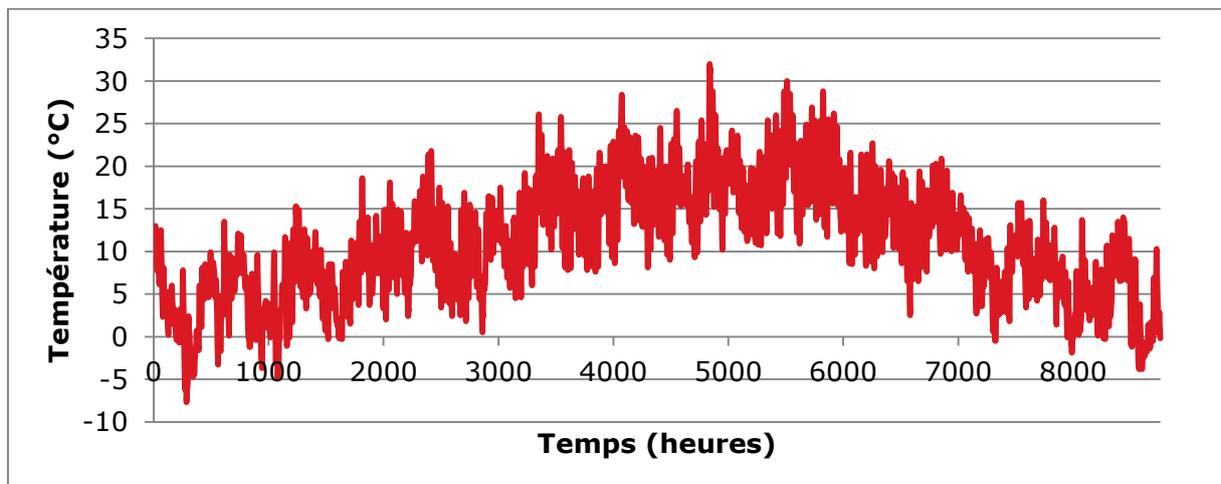


Figure 77 : Température (°C) moyenne à Lille en fonction du temps (heures) au cours d'une année

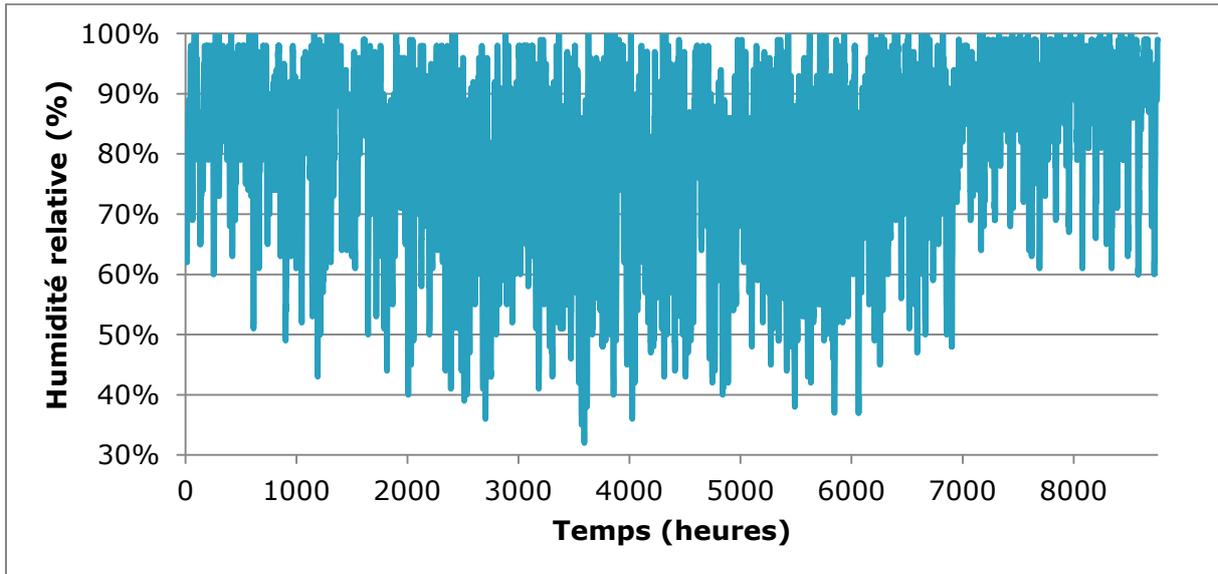


Figure 78 : Humidité relative (%) moyenne à Lille en fonction du temps (heures) au cours d'une année

3.2.8.3 Climat intérieur utilisé pour la simulation

Les conditions intérieures utilisées sont définies en fonction du climat intérieur selon la norme EN 15026 (AFNOR, Avril 2008), en prenant le cas où la charge en humidité est élevée (cas le plus pénalisant).

La Figure 79 donne la façon dont la température intérieure est calculée. Ainsi quand la température extérieure est inférieure à 10°C, la température intérieure est fixée à 20°C. Ceci représente l'action du chauffage du bâtiment qui ne laisse pas la température descendre en dessous de 20°C. Quand la température extérieure augmente au dessus de 10°C, la température intérieure augmente également de manière linéaire afin de représenter l'équilibre qui se fera entre le bâtiment et l'extérieur par l'action des transferts thermique et l'ouverture des fenêtres. Cependant, la température intérieure est plafonnée à 25°C. Il est considéré que le bâtiment sera ventilé ou climatisé pour permettre de ne pas dépasser cette température.

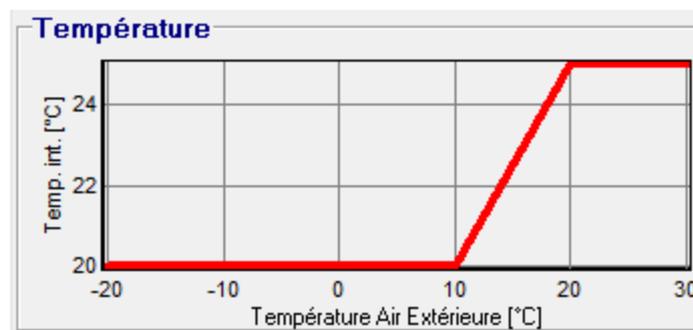


Figure 79 : Evolution de la température intérieure (°C) en fonction de la température extérieure (°C)

La Figure 80 donne la façon dont l'humidité relative intérieure est calculée. Ainsi quand la température extérieure est inférieure à -10°C , l'humidité relative intérieure est fixée à 40%. Quand la température extérieure augmente au dessus de -10°C , l'humidité relative intérieure augmente également de manière linéaire. Cependant, l'humidité relative intérieure est plafonnée à 70%. Il est considéré que le bâtiment sera ventilé pour permettre de ne pas dépasser ce taux d'humidité. Cette évolution s'explique par le fait que le transfert d'humidité se faisant du chaud vers le froid, il est logique d'avoir un air intérieur plus sec en saison froide qu'en saison chaude.

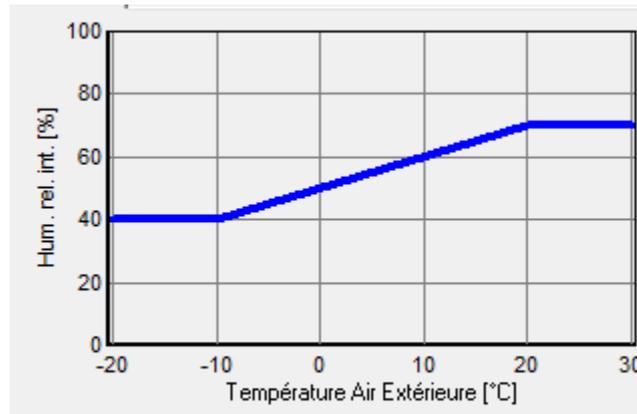


Figure 80 : Evolution de l'humidité relative intérieure (%) en fonction de la température extérieure ($^{\circ}\text{C}$)

Le début du calcul est pris le 1^{er} octobre. Ceci pour représenter une pose de l'isolant avant la saison froide, ce qui est le cas le plus pénalisant pour le nouveau système étudié.

3.2.9 Résultats et analyse de la simulation hygrothermique dynamique

Les teneurs en eau en kg/m^3 initiales, finales, minimales et maximales pour chacun des matériaux composant la paroi sont données dans le Tableau 30. Pour les deux toiles et l'isolant, la teneur en eau reste quasi nulle pendant toute la simulation. Dans le cas du béton et de la plaque de plâtre, la teneur en eau maximale correspond à la teneur en eau initiale, ce qui signifie que ces matériaux ont plutôt eu tendance à sécher.

Matériau	Teneur en eau (kg/m^3)			
	initiale	finale	minimale	maximale
Toile extérieure	0.00	0.00	0.00	0.03
Isolant	0.00	0.31	0.00	0.39
Toile intérieure	0.00	0.00	0.00	0.01
Béton	135.00	57.90	56.74	135.00
Plaque de plâtre	8.00	5.01	3.49	8.00

Tableau 30 : Teneur en eau (kg/m^3) initiale, finale, minimale et maximale pour chacun des matériaux obtenues après simulation

On constate d'après ce tableau que la teneur en eau n'évolue quasiment pas dans les toiles. Ceci s'explique par leur très faible capacité d'absorption. L'observation de l'évolution de la teneur en eau dans les toiles n'est donc pas nécessaire.

Les Figure 81, Figure 82 et Figure 83 nous donnent l'évolution de la teneur en eau respectivement dans l'isolant, le béton et la plaque de plâtre. Il est constaté Figure 81 que la teneur en eau dans l'isolant se stabilise très rapidement. Après stabilisation elle oscille entre 0.2 et 0.4 kg/m^3 , ce qui reste très faible. La Figure 82 quant à elle nous montre que la teneur en eau dans le béton décroît d'année en année pour se stabiliser en dessous de 60kg/m^3 après une dizaine d'année. Il est notable que la teneur en eau du béton est constamment inférieure à 73kg/m^3 après 3 ans. Cette valeur correspond à 80% d'humidité relative dans le béton, qui est la valeur seuil en dessous de laquelle il est conseillé que le béton se stabilise. Concernant la plaque de plâtre, la Figure 83 nous montre que la teneur en eau se stabilise après quelques semaines et qu'elle oscille ensuite entre 3.5 et 6 kg/m^3 , soit en permanence inférieure à la teneur en eau initiale de 8 kg/m^3 .

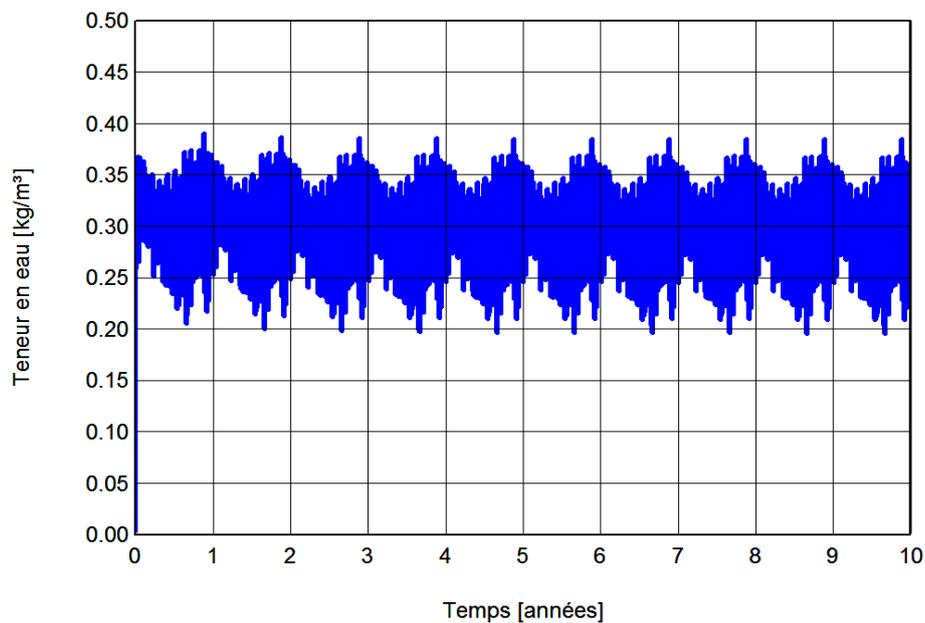


Figure 81 : Teneur en eau (kg/m^3) en fonction du temps (années) dans l'isolant obtenue après simulation

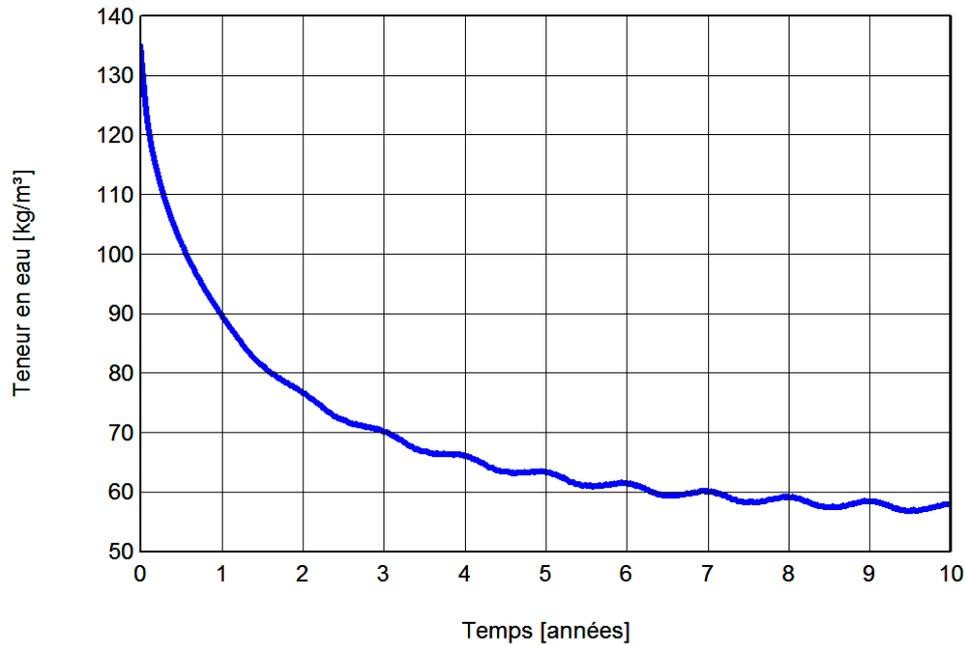


Figure 82 : Teneur en eau (kg/m^3) en fonction du temps (années) dans le béton obtenue après simulation

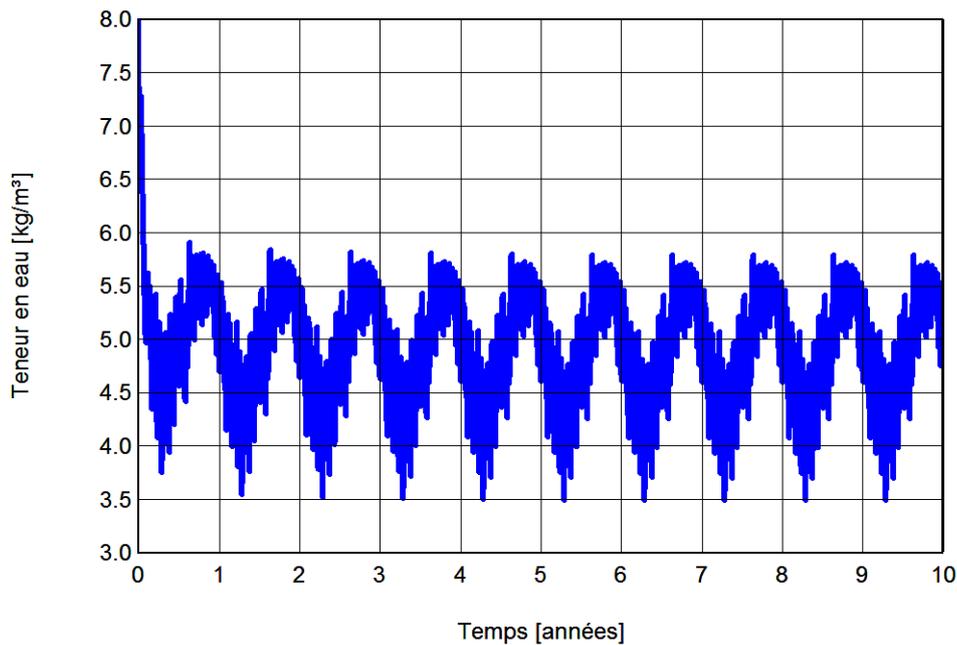


Figure 83 : Teneur en eau (kg/m^3) en fonction du temps (années) dans la plaque de plâtre obtenue après simulation

Ces résultats montrent que les matériaux ne sont pas soumis à des conditions hygrométriques défavorables qui pourraient les détériorer. Les différents matériaux (toiles et isolant) sont donc validés d'un point de vue hygrothermique. Le panneau ne pose pas de problème de déséquilibre hygrothermique du bâtiment.

3.3 Réaction au feu : normes, exigences, essais et résultats

3.3.1 Exigences, normes et réglementation concernant la réaction au feu

3.3.1.1 Essais de réaction au feu

Une des premières préoccupations concernant les produits du bâtiment est de savoir quelle est leur réaction au feu, et ce tout particulièrement pour les matériaux de façade. La norme NF EN 13501-1 (AFNOR, Septembre 2007) définit la réaction au feu par : « comportement d'un produit qui, dans des conditions spécifiées, alimenté par sa propre décomposition un feu auquel il est exposé ». Cette norme détermine le classement des produits et éléments de construction en fonction des données d'essais.

Les essais de classement au feu sont nombreux :

- Essai d'incombustibilité (EN ISO 1182) (AFNOR, Avril 2002)

Cet essai identifie les produits qui ne contribueront pas, ou peu, à un feu. Il s'applique aux classes A1 et A2.

Une éprouvette représentative du produit est placée sur un porte-éprouvette adéquat dans un four muni de thermocouples chauffé à $750 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à ce qu'un équilibre thermique soit atteint. La durée de persistance d'éventuelles flammes est notée. L'éprouvette est ensuite pesée et l'on en déduit sa perte de masse en pourcent. L'élévation de la température ΔT est également relevée. Dans le cas du système Isolpac, cet essai ne sera pas passé car le panneau ne pourra pas être incombustible au vu des matériaux qui le composent.

- Détermination de la chaleur de combustion (EN ISO 1716) (AFNOR, Novembre 2002)

Cet essai détermine le dégagement de chaleur total maximal potentiel d'un produit lors d'une combustion vive complète. Il s'applique aux classes A1 et A2. Il permet la détermination des pouvoirs calorifiques supérieurs (PCS) et inférieurs (PCI).

Dans cet essai, une éprouvette d'une masse spécifiée est brûlée dans des conditions normalisées, à un volume constant, dans une atmosphère d'oxygène, à l'intérieur d'une bombe calorimétrique étalonnée par la combustion d'un acide benzoïque certifié. Le pouvoir calorifique déterminé dans ces conditions est calculé d'après l'élévation de température observée en tenant compte de la perte calorifique et de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. De la même manière que pour l'essai précédent, cet essai ne concerne pas le nouveau système.

- Essai d'un objet isolé en feu (EN 13823) (AFNOR, Décembre 2002)

Cet essai couramment appelé SBI pour « Single Burning Item » évalue la contribution potentielle d'un produit au développement d'un feu, dans une situation de feu simulant l'embrassement d'un seul élément dans l'angle d'une pièce à proximité de ce produit. Il s'applique aux classes A2, B, C et D. C'est un essai couramment passé pour les matériaux de façade. Cet essai concerne donc directement le nouveau système.

- Essai d'allumabilité (EN ISO 11925-2) (AFNOR, Novembre 2002)

Cet essai évalue l'allumabilité d'un produit exposé à une petite flamme. Il s'applique aux classes B, C, D, E, et F. Il concerne également notre système Isolpac.

Suite à ces essais, le classement du produit selon la norme NF EN 13501-1 (AFNOR, Septembre 2007) (Figure 84) est déterminé, parmi les classes A1, A2, B, C, D et E.

En plus de ces normes, des normes complémentaires permettent de déterminer la production de fumée (EN 13823 (AFNOR, Décembre 2002)) ainsi que la production de gouttelettes ou de particules enflammées (EN 11925-2 (AFNOR, Décembre 2002) et EN 13823 (AFNOR, Décembre 2002)). Ces deux classements sont obtenus pendant l'essai SBI.

Les classements pour l'ensemble de ces critères sont spécifiés Figure 84. un classement de production de fumée s1, s2 ou s3 et un classement de production de gouttelettes d0, d1 ou d2 sont ainsi déterminés, en plus d'une classe de réaction au feu A1, A2, B, C, D et E.

Classe	Méthode(s) d'essai	Critères de classement	Classement supplémentaire
A1	EN ISO 1182 ^{a)} et	$\Delta T \leq 30 \text{ °C}$; et $\Delta m \leq 50 \%$; et $\dot{t}_f = 0$ (c.-à-d., pas de flamme persistante)	—
	EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0 \text{ MJ/kg}$ ^{a)} et $PCS \leq 2,0 \text{ MJ/kg}$ ^{b) c)} et $PCS \leq 1,4 \text{ MJ/m}^2$ ^{d)} et $PCS \leq 2,0 \text{ MJ/kg}$ ^{e)}	—
A2	EN ISO 1182 ^{a)} ou	$\Delta T \leq 50 \text{ °C}$; et $\Delta m \leq 50 \%$; et $\dot{t}_f \leq 20 \text{ s}$	—
	EN ISO 1716 et	$PCS \leq 3,0 \text{ MJ/kg}$ ^{a)} et $PCS \leq 4,0 \text{ MJ/m}^2$ ^{b)} et $PCS \leq 4,0 \text{ MJ/m}^2$ ^{d)} et $PCS \leq 3,0 \text{ MJ/kg}$ ^{e)}	—
	EN 13823	$FIGRA \leq 120 \text{ W/s}$ et $LFS < \text{côté de l'éprouvette}$ et $THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$	Production de fumée ^{f)} et Gouttelettes/particules enflammées ^{g)}
B	EN 13823 et	$FIGRA \leq 120 \text{ W/s}$ et $LFS < \text{côté de l'éprouvette}$ et $THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$	Production de fumée ^{f)} et Gouttelettes/particules enflammées ^{g)}
	EN ISO 11925-2 ⁱ⁾ : Exposition = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ en 60 s	
C	EN 13823 et	$FIGRA \leq 250 \text{ W/s}$ et $LFS < \text{côté de l'éprouvette}$ et $THR_{600s} \leq 15 \text{ MJ}$	Production de fumée ^{f)} et Gouttelettes/particules enflammées ^{g)}
	EN ISO 11925-2 ⁱ⁾ : Exposition = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ en 60 s	
D	EN 13823 et	$FIGRA \leq 750 \text{ W/s}$	Production de fumée ^{f)} et Gouttelettes/particules enflammées ^{g)}
	EN ISO 11925-2 ⁱ⁾ : Exposition = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ en 60 s	
E	EN ISO 11925-2 ⁱ⁾ : Exposition = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ en 20 s	Gouttelettes/particules enflammées ^{h)}
F	Aucune performance déterminée		

a) Pour les produits homogènes et les composants substantiels de produits non homogènes.
b) Pour tout composant non substantiel extérieur de produits non homogènes.
c) Sinon, tout composant non substantiel ayant un $PCS \leq 2,0 \text{ MJ/m}^2$, à condition que le produit satisfasse les critères suivants de l'EN 13823 : $FIGRA \leq 20 \text{ W/s}$, et $LFS < \text{côté de l'éprouvette}$, et $THR_{600s} \leq 4,0 \text{ MJ}$, et $s1$, et $d0$.
d) Pour tout composant non substantiel intérieur de produits non homogènes.
e) Pour le produit dans son intégralité.
f) Lors de la dernière phase de développement du mode opératoire d'essai, des modifications du système de mesure de la fumée ont été introduites dont les effets doivent faire l'objet d'une enquête ultérieure. Cela peut donner lieu à une modification des valeurs limites et/ou des paramètres pour l'évaluation de la production de fumée.
 $s1 = \text{SMOGRA} \leq 30 \text{ m}^2/\text{s}^2$ et $\text{TSP}_{600s} \leq 50 \text{ m}^2$; $s2 = \text{SMOGRA} \leq 180 \text{ m}^2/\text{s}^2$ et $\text{TSP}_{600s} \leq 200 \text{ m}^2$; $s3 = \text{ni } s1 \text{ ni } s2$
g) $d0 = \text{Aucune gouttelette/particule enflammée conformément à l'EN 13823 en 600 s}$;
 $d1 = \text{aucune gouttelette/particule enflammée persistant pendant plus de 10 s conformément à l'EN 13823 en 600 s}$;
 $d2 = \text{ni } d0, \text{ ni } d1$;
L'inflammation du papier conformément à l'EN ISO 11925-2 aboutit à un classement d2.
h) Succès = aucune inflammation du papier (aucun classement) ;
Échec = inflammation du papier (classement d2).
i) Dans des conditions d'attaque de la flamme de surface et, si approprié à l'utilisation finale du produit, d'attaque de la flamme de côté.

Figure 84 : Classes de performances de réaction au feu pour les produits de construction, hormis les revêtements de sol et les produits d'isolation thermique pour conduites linéaires (AFNOR, Septembre 2007).

3.3.1.2 Réglementation vis-à-vis de la réaction au feu des matériaux de construction

L'Arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation (1989), donne un classement des bâtiments d'habitation en 4 familles. Selon la famille de bâtiment, une classification minimale de réaction au feu est exigée. Cette classification est donnée selon l'ancien classement : le « classement M » défini par la norme française NF P.92.507. Une correspondance existe entre cet ancien classement et le classement européen actuel « Euroclasses ».

Famille	Description	Classement M des façades	Correspondance Euroclasses
Première famille	-Habitations individuelles avec un étage au plus -Habitations individuelles groupées en bande	M3	D
Deuxième famille	-Habitations individuelles de plus d'un étage -Habitations collectives d'au plus trois étages	M3	D
Troisième famille	Habitations collectives dont le plancher bas du logement le plus haut est situé à moins de 28m	M2 Si $P/H < 0.8$ (P : distance avec un immeuble voisin H : hauteur la plus élevée entre les deux immeubles) M3 sinon	C ou D
Quatrième famille	Habitations collectives dont le plancher bas du logement le plus haut est situé à plus de 28m et à moins de 50m	M2 Si $P/H < 0.8$ (P : distance avec un immeuble voisin H : hauteur la plus élevée entre les deux immeubles) M3 sinon	C ou D

Tableau 31 : Classification des familles d'habitation collective et classement au feu des façades exigé

Un classement D permet donc de poser le nouveau système sur un large panel de bâtiments d'habitation, tandis qu'un classement C permettrait de poser le système sur l'ensemble des bâtiments d'habitation (à l'exception des immeubles de grande hauteur, c'est-à-dire des bâtiments supérieurs à 50 mètres qui ne sont pas considérés ici).

Par ailleurs, un revêtement de façade doit être non-gouttant, c'est-à-dire classé d0. A l'inverse, il n'y a pas de contraintes sur les fumées pour les façades extérieures. Un classement s3 est donc suffisant.

Le classement Euroclasses visé est donc C,s3,d0, et un classement D,s3,d0 pourrait déjà permettre au nouveau système l'accès à un marché significatif.

3.3.2 Essais d'orientation au feu réalisés sur nos matériaux

3.3.2.1 Méthode d'essai d'orientation de réaction au feu

Avant de réaliser des essais contraignants et coûteux, des essais d'orientation ont été effectués. Les essais ont été réalisés par le laboratoire Enveho. Ces essais ont été réalisés sur les toiles seules et sur l'isolant seul. Ils ont permis d'orienter le choix des toiles vis-à-vis de la contrainte feu, et de mieux comprendre le comportement des matériaux.

Les essais ont été réalisés sur les toiles de Dickson, à savoir le Sunworker Cristal, le Sunworker Opaque, l'Arcade, ainsi que la toile développée pour le projet le Sunworker PTFE. Ces toiles ont été respectivement désignées précédemment par les numérotations 1, 2, 3 et 11.

Les essais d'orientation consistent à utiliser un brûleur que l'on met au contact de l'échantillon pendant une durée de 10s. Deux types d'attaque ont été effectuées : l'une sur la face de l'échantillon (flamme perpendiculaire à la face de l'échantillon) et l'autre sur la tranche (flamme formant un angle avec la face de l'échantillon). La Figure 85 montre deux photos du dispositif selon que l'attaque soit sur la face (a) ou sur la tranche (b).

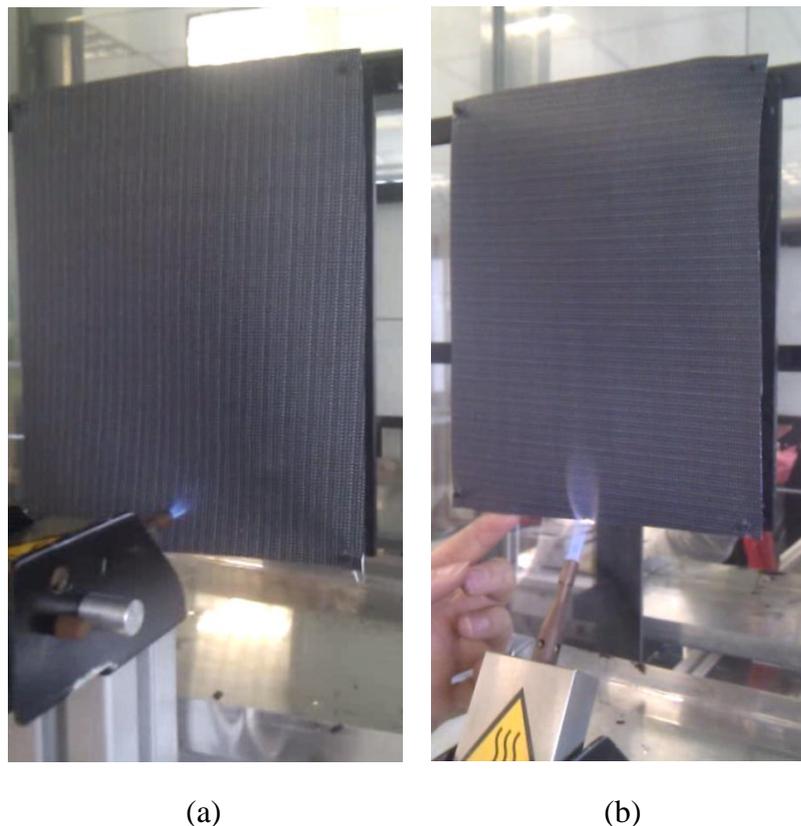


Figure 85 : Photo du dispositif d'essai d'orientation au feu avec attaque sur la face (a) ou sur la tranche (b)

Dans chacun des cas, le temps de post-inflammation est mesuré. Il s'agit du temps après extinction du brûleur pendant lequel une flamme persiste. Ceci montre la capacité qu'a le matériau à propager la flamme. Par ailleurs, les matériaux sont observés visuellement après l'essai, afin de comparer les surfaces brûlées.

3.3.2.2 Résultats des essais d'orientation au feu

Essais sur les toiles :

Les résultats d'essai d'orientation au feu réalisés sur les toiles 1, 2, 3 et 11 sont donnés dans les Tableau 32 (attaque sur la face) et Tableau 33 (attaque sur la tranche).

Pour chaque toile et pour chacune des deux méthodes la durée de post-inflammation est donnée, et l'on fait des observations visuelles lors de l'essai. Ces observations portent sur la présence ou non d'incandescence résiduelle, la formation ou non de trou, la chute ou non de débris fondus et l'atteinte ou non des bords de l'éprouvette.

Pour toutes les toiles et pour les deux configurations d'essai, les observations visuelles lors de l'essai sont les mêmes : il n'y a pas d'incandescence résiduelle, il y a formation de trou, il n'y a pas de chute de débris et les bords de l'éprouvette ne sont jamais atteints.

Cependant, les durées de post-inflammation sont différentes. Elles sont respectivement de 0, 0, 1 et 0 secondes dans la méthode 1 et de 1.2, 0, 3.1 et 0 secondes pour la méthode 2 pour les toiles 1, 2, 3 et 11. Ainsi, seules les toiles 2 et 11 n'ont aucune post-inflammation lors d'une attaque sur la tranche.

Toile	Durée de post-Inflammation	Incandescence résiduelle	Formation de trou	Chutes ou débris fondus	Bords atteints
1	0s	Non	Oui	Non	Non
2	0s	Non	Oui	Non	Non
3	1s	Non	Oui	Non	Non
11	0s	Non	Oui	Non	Non

Tableau 32: Résultats des essais d'orientation au feu avec attaque sur la face

Toile	Durée de post-Inflammation	Incandescence résiduelle	Formation de trou	Chutes ou débris fondus	Bords atteints
1	1.2s	Non	Oui	Non	Non
2	0s	Non	Oui	Non	Non
3	3.1s	Non	Oui	Non	Non
11	0s	Non	Oui	Non	Non

Tableau 33: Résultats des essais d'orientation au feu avec attaque sur la tranche

Par ailleurs, les Figure 86 et Figure 87 nous donnent les photos des échantillons après essai respectivement pour une attaque sur la face et sur la tranche. De fortes disparités entre la toile 3 et les autres toiles sont constatées. En effet, le trou créé par la flamme est plus important que pour les autres toiles, et la toile s'est vrillée sous l'action de la chaleur. Nous avons indiqué au paragraphe 2.2.2.5 que cette toile était classée M2, contrairement aux trois autres toiles qui

sont M1. La différence de comportement entre cette toile et les autres n'est donc pas étonnante.

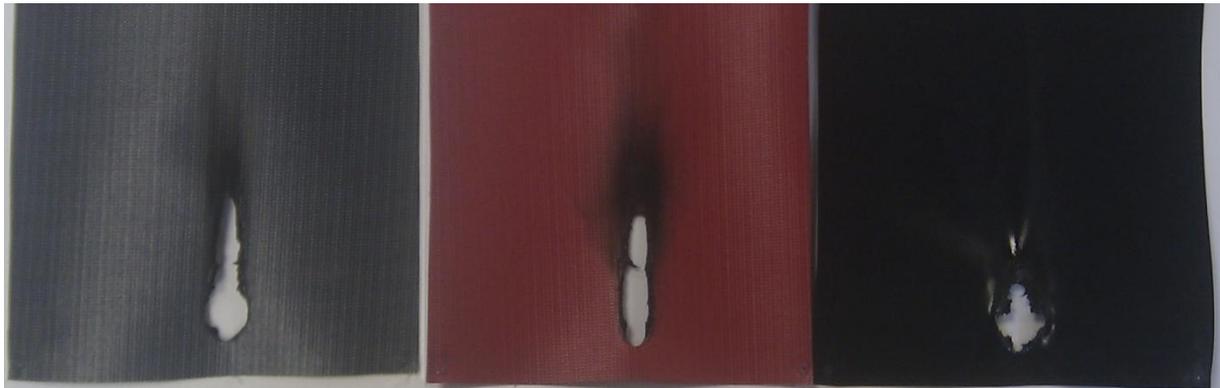


Figure 86 : Photo des échantillons après essai d'orientation au feu sur les toiles avec attaque sur la face. De gauche à droite : toile 11, toile 1 et toile 3.



Figure 87 : Photo des échantillons après essai d'orientation au feu sur les toiles avec attaque sur la tranche. De gauche à droite : toile 11, toile 3 et toile 1.

Essai sur l'isolant

Les résultats d'essai d'orientation au feu réalisés sur l'isolant sont donnés dans le Tableau 34. Ils portent uniquement sur un essai avec attaque sur la tranche.

On donne la durée de post-inflammation et l'on fait des observations visuelles lors de l'essai. Ces observations portent sur la présence ou non d'incandescence résiduelle, la formation ou non de trou, la chute ou non de débris fondus et l'atteinte ou non des bords de l'éprouvette.

Les observations visuelles lors de l'essai sont les mêmes que pour les toiles, quelle que soit l'attaque effectuée : il n'y a pas d'incandescence résiduelle, il y a formation de trou, il n'y a pas de chute de débris et les bords de l'éprouvette ne sont jamais atteints.

Attaque	Durée de post-Inflammation	Incandescence résiduelle	Formation de trou	Chutes ou débris fondus	Bords atteints
tranche	0s	Non	Oui mais en surface et non traversant	non	non

Tableau 34: Résultats des essais d'orientation au feu sur l'isolant

Par ailleurs, la Figure 88 nous donne les photos des échantillons après essai pour une attaque sur la tranche. Un trou s'est formé autour de la flamme. Ce trou ne traverse pas l'échantillon. Seule la zone située à proximité de la flamme est fondue. Pendant l'essai, le matériau fuit la flamme, c'est-à-dire que la matière autour de la flamme se résorbe très rapidement, mais aucune inflammation ne se produit.

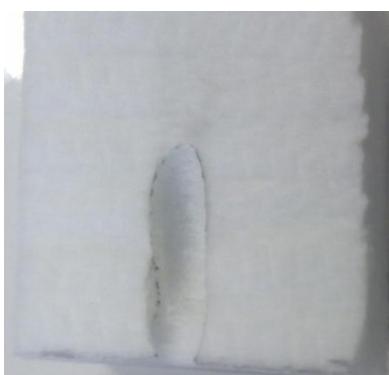


Figure 88 : Photo de l'échantillon d'isolant après essai d'orientation au feu.

3.3.3 Les Essais Euroclasses concernant la réaction au feu

3.3.3.1 Méthode d'essais Euroclasses pour la réaction au feu

Les différents essais pour un classement Euroclasses ont été décrits au 3.3.1. Nous avons vu que selon la classification attendue, tous les essais ne sont pas à passer.

Dans notre cas, la façade sera classée au mieux B, puisqu'elle n'est pas incombustible (classement A1 et A2). Les essais à réaliser sont donc :

- L'essai d'allumabilité (EN ISO 11925-2) (AFNOR, Novembre 2002)
- L'essai SBI (EN 13823) (AFNOR, Décembre 2002)

Essai Allumabilité

L'essai d'allumabilité est assez proche du dispositif utilisé pour les essais d'orientation. Il consiste à mettre en contact la flamme d'un brûleur pendant une durée de 30 secondes sur la face et sur la tranche de l'échantillon. Il est ensuite observé s'il y a eu inflammation, si la flamme a atteint plus de 150mm de l'échantillon, et si le papier filtre situé au dessous de l'échantillon s'est enflammé.

Nous avons mené cet essai au CREPIM sur un assemblage Toile-Isolant-Toile sur 6 échantillons.

Essai SBI

L'essai SBI est à plus grande échelle. Il consiste à créer un angle avec les matériaux à tester et à mettre en fonctionnement un brûleur dans cet angle.

L'essai dure 20 minutes. Les valeurs suivantes sont mesurées au cours de l'essai :

- Le dégagement de chaleur dégagée par la combustion de l'éprouvette (THR), et plus particulièrement le THR_{600s} qui correspond au dégagement de chaleur pendant les 600 premières secondes de l'essai.
- La valeur maximale du quotient de débit calorifique de l'éprouvette (FIGRA), et particulièrement les valeurs $FIGRA_{0,2 MJ}$ et $FIGRA_{0,4 MJ}$ qui correspondent à la valeur maximale du quotient calorifique quand le THR a dépassé respectivement les seuils de 0,2 MJ et 0,4 MJ.
- Le SMOGRA qui est le taux de développement de fumée
- La propagation latérale du front de flamme le long de la grande aile (LFS)

On observe également s'il y a chute de gouttes enflammées.

La Figure 89 donne le schéma de montage de l'essai. L'essai a été réalisé deux fois au CREPIM. La première fois sur un complexage composé de la toile 1 en face extérieure, de l'isolant et de la toile 3 coté intérieur. La seconde sur un complexage composé de la toile 11 à l'extérieur, de l'isolant et de la toile 2 à l'intérieur.

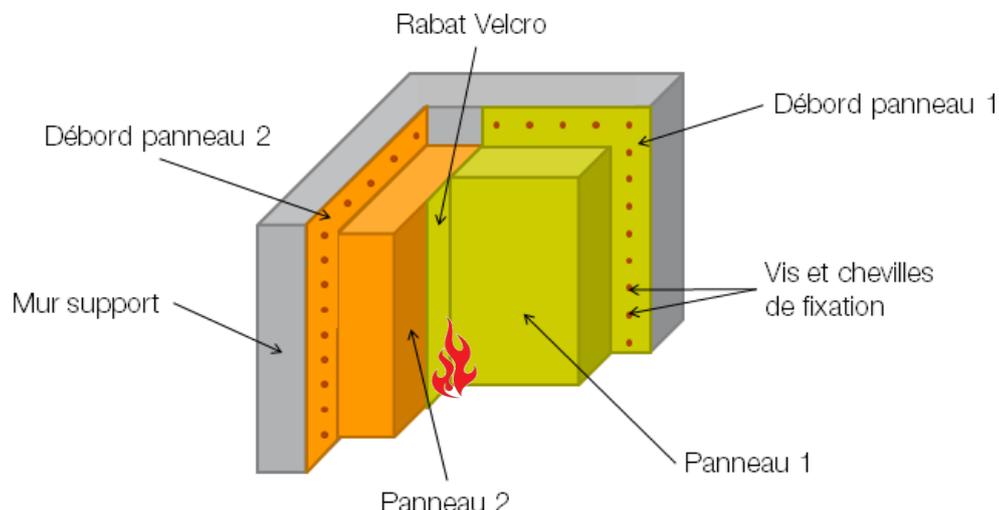


Figure 89 : Schéma de montage de l'essai SBI

3.3.3.2 Résultats des essais Euroclasses de réaction au feu réalisés sur les panneaux Isolpac

Essai Allumabilité

Les résultats des essais d'allumabilité sont présentés dans les Tableau 35 et Tableau 36, respectivement pour une attaque sur le bord et sur la surface de l'échantillon. Pour chaque échantillon, il est noté s'il y a eu inflammation ou non, si la flamme s'est propagée à plus de 150mm et s'il y a eu inflammation du papier filtre au dessous de l'échantillon. Il est constaté que dans tous les cas, il y a eu inflammation mais la flamme ne s'est jamais propagée à plus de 150mm, et il n'y a pas eu non plus inflammation du papier filtre.

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Inflammation	OUI	OUI	OUI
La flamme atteint 150mm	NON	NON	NON
Inflammation du papier filtre	NON	NON	NON

Tableau 35 : Résultat des essais d'allumabilité (attaque sur le bord)

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Inflammation	OUI	OUI	OUI
La flamme atteint 150mm	NON	NON	NON
Inflammation du papier filtre	NON	NON	NON

Tableau 36 : Résultat des essais d'allumabilité (attaque sur la surface)

Ces résultats ne restreignent pas le classement. C'est-à-dire que le nouveau système peut toujours être classé au mieux B. En effet, si la flamme avait atteint 150mm, le nouveau système aurait pu au mieux être classé E, et encore en repassant l'essai avec une attaque de 15 secondes (contre 30 ici).

Par ailleurs, le fait que le papier filtre ne se soit pas enflammé permet encore au système d'être classé d0 ou d1. Si le papier s'était enflammé il aurait d'office été classé d2.

Cet essai ne permet donc pas à lui seul de classer un produit, mais est une première étape à franchir. Dans le cas d'Isolpac cet essai ne pose donc aucun problème.

Essai SBI

L'essai SBI a été réalisé sur deux versions de panneaux : la première version est composée de la toile 1 à l'extérieur, de l'isolant et de la toile 3 coté intérieur (configuration 1). La seconde est composée de la toile 11 à l'extérieur, de l'isolant et de la toile 2 à l'intérieur (configuration 2).

Les résultats sont donnés dans le Tableau 37 pour les deux configurations. De grandes différences dans les résultats sont constatées. Les valeurs de FIGRA_{0,2MJ} et de FIGRA_{0,4MJ} sont presque trois fois plus importantes dans la deuxième configuration que dans la première. A l'inverse, le SMOGRA, le THR_{600s} et le TSP_{600s} sont plus faibles dans la deuxième configuration. Le THR_{600s} est notamment deux fois plus faible et le TSP_{600s} trois fois plus faible. Par ailleurs, des chutes de débris sont présentes dans la configuration 1 et non dans la configuration 2.

	Configuration 1	Configuration 2
FIGRA _{0,2MJ} (W/s)	351.7	908.8
FIGRA _{0,4MJ} (W/s)	351.7	825
SMOGRA (cm ² /s ²)	429.9	351.8
THR _{600s} (MJ)	23.2	11.3
TSP _{600s} (m ²)	1551.8	479.8
Propagation jusqu'au bord	NON	NON
Chute de débris enflammés <10s	OUI	NON
Chute de débris enflammés >10s	OUI	NON
Apparition de flash	NON	NON
Chute de débris hors de la zone du bruleur	OUI	NON
Défaut de fixation de l'éprouvette	NON	NON
Déformation / Chute de l'éprouvette	NON	NON

Tableau 37 : Résultats de l'essai SBI pour deux configurations de panneau

La Figure 90 montre une photo prise à la fin de l'essai pour chacune des deux configurations. La quantité de matière brûlée est bien plus importante dans la première configuration. En effet, la propagation a eu lieu presque jusqu'au bord de la grande aile, et a été jusqu'au sommet de l'éprouvette dans l'angle. Par ailleurs, les débris qui ont chuté au pied de l'éprouvette sont visibles sur la photo. A l'inverse dans la configuration 2 la propagation n'a pas dépassé le milieu de la grande aile et il y a encore de la matière en haut de l'éprouvette dans l'angle. Aucun débris n'est visible au sol sur la configuration 2.



Figure 90 : Photos des éprouvettes après l'essai SBI : à gauche la configuration 1, à droite la configuration 2.

Au vu des photos il est possible de penser que la deuxième configuration est plus performante en termes de réaction au feu. Pourtant, nous avons vu que les valeurs de $FIGRA_{0,2MJ}$ et de $FIGRA_{0,4MJ}$ sont presque trois fois plus importantes dans la deuxième configuration. Or ces valeurs sont déterminantes dans le classement des produits. Par conséquent la configuration 1 obtient un classement D, tandis que la configuration 2 obtient un classement E.

Concernant les gouttelettes, la configuration 1 serait au mieux classée d1, et la configuration 2 peut encore être classée d0.

L'explication du mauvais classement de la configuration 2 provient du fait que l'inflammation de l'éprouvette se fait de manière très rapide au démarrage de l'essai. Cette inflammation brusque produit une grande quantité de chaleur soudaine. C'est ce qui donne une importante valeur de FIGRA. La configuration semble ensuite très bien se comporter puisque très rapidement l'inflammation diminue et l'essai n'évolue presque plus une fois la zone autour du brûleur fondue. A l'inverse, dans la configuration 1 la combustion avait été plus lente, donc le pic de chaleur a été moins élevé. En revanche la combustion avait été plus longue et la quantité de matière brûlée plus importante.

3.3.4 Perspectives concernant les essais de réaction au feu

Les deux essais SBI, s'ils n'ont pas été concluants, nous ont permis de mieux comprendre le comportement au feu un peu particulier de nos matériaux.

Les pistes d'améliorations de la réaction au feu des panneaux sont les suivantes :

- de l'éthanol a été utilisé pour nettoyer les toiles. C'était plusieurs mois avant l'essai et par conséquent l'éthanol s'est probablement évaporé. Mais il est possible de se demander s'il n'a pas tout de même pénétré les fibres et contribué à ce que l'inflammation soit si rapide.
- Un « effet cheminée » se crée lors de l'inflammation. Cela signifie qu'une poche d'air apparaît pendant la combustion entre la toile et l'isolant. Le feu ayant besoin d'air pour persister, il est clair que cette effet est défavorable à la bonne réaction au feu du nouveau système. Une solution sera par conséquent testée : coller la toile à l'isolant.
- La contribution du Velcro n'est pas facilement identifiable. Afin de la déterminer plus précisément, un prototype sans velcro sera soumis à l'essai.
- La toile extérieure très fine ne parvient pas à ralentir la fonte de l'isolant. Une toile qui réagit moins au feu ou plus épaisse pourrait être une solution.

Trois essais SBI sont programmés afin de mieux comprendre le comportement de nos panneaux :

- Une configuration où les toiles et l'isolant seront collés
- Une configuration sans velcro
- Une configuration en remplaçant les toiles par de la toile M0 (mais cette toile ne répond pas aux autres critères du cahier des charges).

Ces essais nous permettront d'orienter les recherches futures en vue d'obtenir un bon classement au feu des panneaux. Ils seront réalisés après la fin de la thèse.

3.4 Résistance mécanique du panneau

3.4.1 Résistance à la pénétration du panneau

3.4.1.1 Principe de l'essai de mesure de la résistance à la pénétration du panneau

Quand un produit est fixé sur une façade de bâtiment, sa résistance à la pénétration, c'est-à-dire sa capacité à résister au contact d'une charge, doit être évaluée.

La norme NF EN 13498 (AFNOR, Février 2003) permet la détermination de la résistance à la pénétration d'un système composite d'isolation. Cette norme est utilisée pour les systèmes d'isolation du type enduit sur isolant et les vêtements.

L'échantillon est placé sous une machine d'essai de compression qui doit être capable d'un déplacement à vitesse constante de 10 ± 1 mm/min et être adaptée à un mesurage continu de la force permettant une lecture à 1% près.

La machine doit avoir d'un côté une plaque parallèle plane très rigide dont la largeur est au moins égale à celle de l'éprouvette à soumettre à l'essai, et de l'autre côté un dispositif de pénétration. Le dispositif est composé d'un cylindre en acier d'une longueur au moins égale à 30mm et de diamètre 20 ± 0.1 mm (Figure 91). Son extrémité est hémisphérique de rayon 10 ± 0.05 mm.

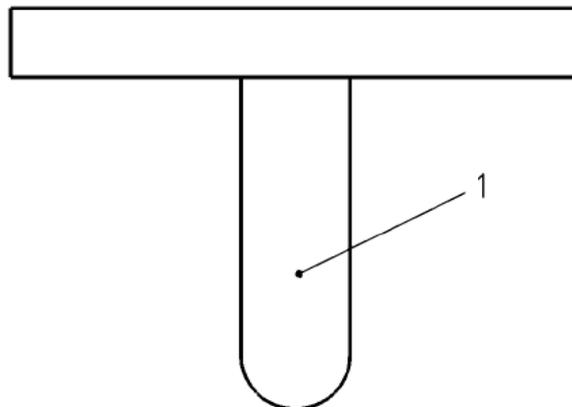


Figure 91 : Dispositif de pénétration selon la norme NF EN 13498.

Pendant l'essai l'axe du cylindre est perpendiculaire à la surface de l'éprouvette, qui est posée sur la plaque et l'essai est réalisé au centre de l'éprouvette. L'essai doit être effectué à 23 ± 2 °C.

Les dimensions minimales de l'éprouvette sont de 200mmx200mmx60mm.

On mesure la force maximale atteinte avant rupture.

3.4.1.2 Observations et perspectives concernant l'essai de pénétration

L'essai est prévu pour des systèmes du type isolation sous enduit et les vêtements. Il permet d'évaluer la résistance de l'enduit et de la grille à une charge, afin de s'assurer que l'isolant est protégé.

Dans le cas du système Isolpac, le comportement est très différent. Le panneau étant souple, la résistance mesurée ne sera pas très élevée puisque l'isolant va se courber sous l'avancement du cylindre. Lorsque l'épaisseur de panneau entre le cylindre et le plateau arrière sera faible, l'effort deviendra important et risque même d'endommager la plaque arrière.

La question de la pertinence d'un tel essai se pose. Pour autant, c'est la norme qui paraît la plus adaptée puisque le nouveau système pourrait se définir comme une vêtue.

Les perspectives sur ce sujet seraient de montrer la bonne résistance à la pénétration du panneau via d'autres essais, ou via une expérience in situ.

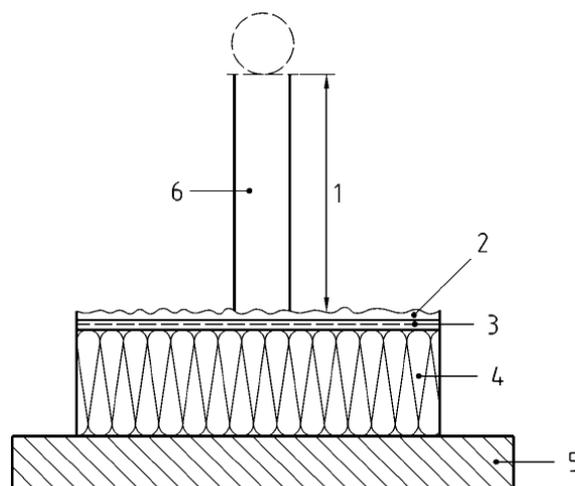
3.4.2 Essais de résistance aux chocs du panneau

3.4.2.1 Principe de l'essai de résistance aux chocs

Le nouveau panneau développé étant « mou », ce qui n'est pas courant en façade de bâtiment, il nous est indispensable de mesurer sa résistance aux chocs pour pouvoir comparer celle-ci aux autres systèmes d'isolation.

La norme NF EN 13497 (AFNOR, Février 2003) permet la détermination de la résistance au choc d'un système composite d'isolation.

Les éprouvettes testées sont dimensions minimales 200mmx200mmx60mm. Des billes d'acier sont ensuite lâchées sur les éprouvettes grâce à l'appareillage décrit Figure 92.



Légende

- | | | | |
|---|---|---|----------------------------|
| 1 | Hauteur pour 2 J : 408 mm
Hauteur pour 10 J : 1 020 mm | 4 | Plaque d'isolant thermique |
| 2 | Matériau de finition | 5 | Surface plane et rigide |
| 3 | Couche de base avec armature | 6 | Tube vertical |

Figure 92 : Appareillage de test de la résistance au choc d'un système d'isolation selon la norme NF EN 13497.

Une bille tombera dans un tube vertical de diamètre intérieur plus grand d'au moins 2mm que celui de la bille d'acier et de hauteur la hauteur de la chute.

Pour simuler une énergie de 2J, une bille d'acier de 500 ± 5 g tombe sur l'ITE d'une hauteur de 408 ± 1 mm.

Pour simuler une énergie de 10J, une bille d'acier de 1000 ± 10 g tombe sur l'ITE d'une hauteur de 1020 ± 1 mm.

Chaque essai est à réaliser 5 fois en différent points de l'éprouvette. Ces points doivent être distants d'au moins 100mm les uns des autres et par rapport aux bords de l'éprouvette.

On observe ensuite la dégradation éventuelle de l'éprouvette

3.4.2.2 Perspectives concernant l'essai de résistance aux chocs

Cet essai n'a pas encore été réalisé faute de temps, mais la connaissance des matériaux qui composent le panneau permet de s'assurer que le test sera réussi. En effet, l'isolant étant souple, il a une grande capacité à absorber les chocs. Par ailleurs, contrairement à un enduit, la toile ne peut pas se craqueler. Là encore sa souplesse lui permettra d'encaisser le choc sans que sa structure ne soit modifiée.

L'essai sera réalisé par la suite pour prouver le bon comportement du procédé Isolpac vis-à-vis des chocs.

3.5 Conclusion du chapitre 3

L'objectif de ce chapitre était de valider le bon comportement du panneau dans son ensemble.

Un travail important, non décrit dans cette thèse pour raisons de confidentialité a été effectué pour assembler les différents matériaux qui composent le panneau. Il est assemblé par soudures Hautes Fréquences, ce qui lui garantit un assemblage sain, pérenne et résistant.

Il a été montré que des risques importants de condensation des flux de vapeur d'eau dans les parois du bâtiment existent, et que cette condensation est néfaste pour la pérennité du bâti et pour la performance thermique des isolants. Il a par conséquent été jugé nécessaire de pouvoir prédire le comportement et l'influence du panneau Isolpac sur le fonctionnement hygrothermique d'une paroi de bâtiment. Ainsi, j'ai été formée à l'utilisation du logiciel Wufi afin de pouvoir réaliser une simulation hygrothermique dynamique à partir des données disponibles sur les matériaux suite à la caractérisation effectuée au chapitre 2. Cette modélisation a montré que, dans une configuration classique plutôt défavorable, le panneau se comportait bien : il n'y avait pas de condensation dans la paroi, l'isolant n'était jamais surchargé en eau, et le béton frais parvenait à sécher rapidement.

Par ailleurs, des essais de réaction au feu ont été effectués sur le panneau. Ces essais ont montré le comportement atypique des matériaux composant le panneau qui fondent face à une flamme. Les essais n'ont pas donné de résultats suffisants pour que la pose du nouveau

système soit autorisée sur la plupart des bâtiments, mais des perspectives d'améliorations ont été données. Ces pistes seront explorées après la thèse.

Des essais mécaniques complémentaires tels que des essais de résistance à la pénétration et aux chocs ont été identifiés. Ils restent à être effectués sur le panneau. Un travail d'adaptation de ces essais devra avoir lieu au préalable.

Chapitre 4

**Conception d'un système d'accroche adapté :
fonctionnement, résistance mécanique, résistance au feu et
essais in situ**

4 Conception d'un système d'accroche adapté : fonctionnement, résistance mécanique, résistance au feu et essais in situ

4.1 Premières idées pour le système d'accroche et d'assemblage

Ce chapitre s'intéresse à la réponse à deux problématiques : Comment fixer les panneaux sur le mur, et comment créer une continuité de la peau extérieure en assemblant les panneaux entre eux. Ces deux problématiques doivent à la fois être traitées séparément, et sont à la fois dépendantes l'une de l'autre, et doivent répondre ensemble à des contraintes communes.

Pour le système d'accroche et d'assemblage, diverses idées et concepts ont été imaginés et testés. Le principe étant de s'affranchir des techniques traditionnelles décrites au 1.2.3.1. Les fonctions que doivent remplir ce système de fixation sont les suivantes :

- Permettre une pose simple et rapide
- Assurer la tenue mécanique de la façade
- Assurer l'étanchéité entre les panneaux
- Ne pas créer de ponts thermiques trop importants
- Ne pas engendrer de surcoûts trop importants
- Assurer l'esthétisme de la façade (effet « tendu » de la toile extérieur, fixations non visibles...)

4.1.1 L'accroche des panneaux sur le mur

Pour fixer les panneaux sur le mur, des techniques issues du milieu du textile ont d'abord été envisagées.

4.1.1.1 Fixation des panneaux sur le mur par bandes auto-agrippantes

La première étude a porté sur l'utilisation de bandes ou pastilles auto-agrippantes (communément appelée « Velcro® », d'après la marque du même nom). La Figure 93 montre le principe de fixation. Des pastilles ou bandes auto-agrippantes mâles sont vissées au mur. A l'inverse, des bandes auto-agrippantes femelles sont soudées sur la face arrière des panneaux. Le panneau est ensuite simplement appliqué contre les éléments vissés au mur, et va tenir grâce à l'adhérence des bandes auto-agrippantes femelles dans les bandes ou pastilles mâles.

Un travail avec l'entreprise Velcro a permis de trouver des produits répondant à nos besoins mécaniques, de durabilité, de réaction au feu et de coût. Ils ont donc été testés in situ à l'échelle 1.

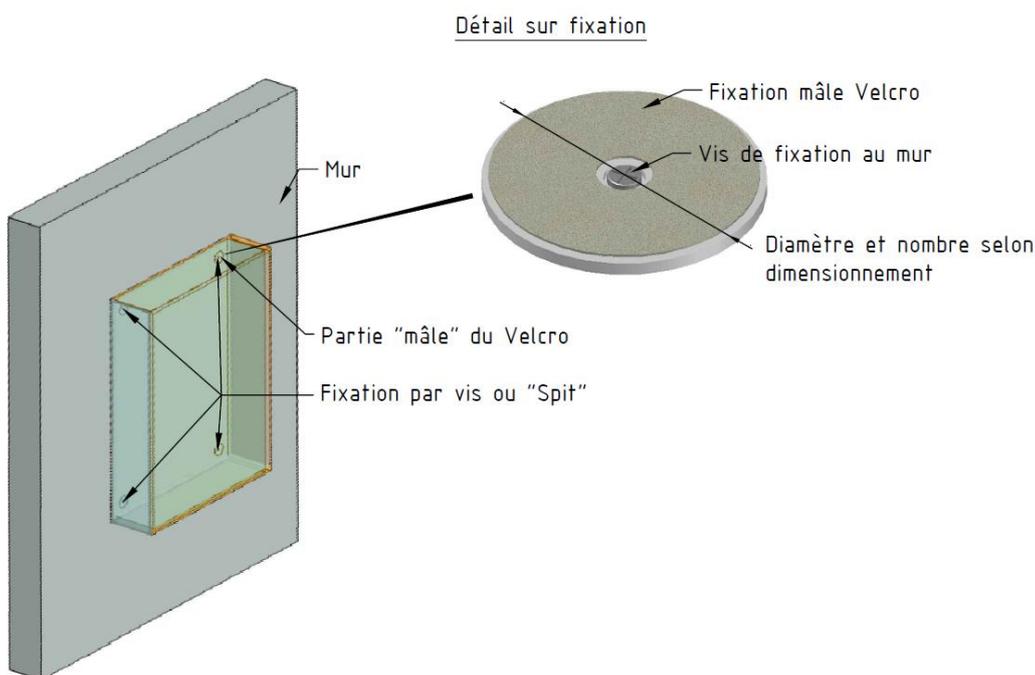


Figure 93 : Schéma de fixation des panneaux Isolpac par Velcro©

4.1.1.2 Fixation des panneaux sur le mur par rails métalliques

Une deuxième étude est issue de la fixation de textiles sur les camping-cars. Il s'agit de rails métalliques dans lesquels un jonc est glissé. Un jonc est une baguette cylindrique en plastique qui est ensuite enfermée dans une toile. La Figure 94 montre des exemples de joncs.

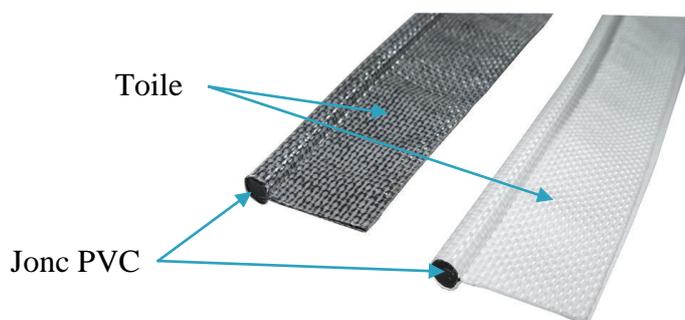


Figure 94 : Photos de joncs

L'idée est simple : deux joncs verticaux parallèles sont soudés à l'arrière du panneau. Deux rails métalliques sont vissés sur le mur, le panneau est ensuite glissé dans les rails par l'intermédiaire des joncs. Cette technique a été également testée in situ à l'échelle 1.

4.1.1.3 Fixation des panneaux sur le mur par vissage de débords de toile

Enfin, une troisième technique a été imaginée. Il s'agit de réaliser des débords de toile coté intérieur du panneau (contre le mur), et de visser ces débords de toile au mur comme représenté sur la Figure 95. Ces débords sont présents sur deux cotés consécutifs du panneau, et comprennent le coté supérieur. Le panneau voisin vient se positionner en superposition des débords et se fixe de la même façon.

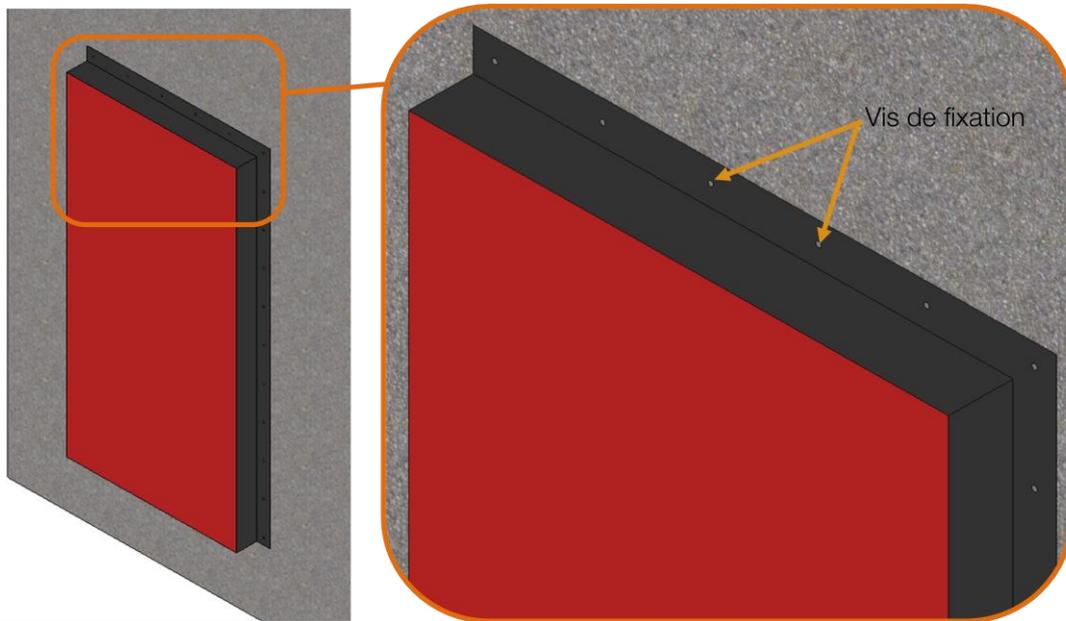


Figure 95 : Schéma de fixation des panneaux Isolpac par vissage de débords

4.1.2 L'assemblage des panneaux entre eux

Pour l'assemblage également, les premières idées ont été inspirées de l'univers du textile. Les moyens les plus courants et les plus simples pour rattacher deux toiles dans le milieu du textile sont les fermetures éclair et les bandes auto-agrippantes.

4.1.2.1 Assemblage des panneaux par fermetures éclair

Concernant les fermetures éclair, il a été pensé, comme décrit sur la Figure 96, d'utiliser ces fermetures éclair pour assembler les panneaux entre eux. Il était alors indispensable de trouver des fermetures étanches. Ces fermetures éclair existent, notamment pour le milieu de la plongée, mais également dans l'habillement. En revanche, les coûts engendrés par cette étanchéité sont très importants, et ne permettaient pas une adaptation dans le bâtiment. En effet, une fermeture éclair étanche d'un mètre coûte environ 100€, ce qui correspond au cout global moyen en fourniture et pose d'une solution d'isolation thermique par l'extérieur. Par ailleurs, le point de jonction entre les 4 panneaux ne pouvait pas être rendu étanche de cette façon. Cette possibilité a donc été très vite abandonnée.

► Assemblage par fermetures éclairs

cousues ou thermosoudées sur la toile extérieure de manière à tendre la toile et à coller les différents panneaux

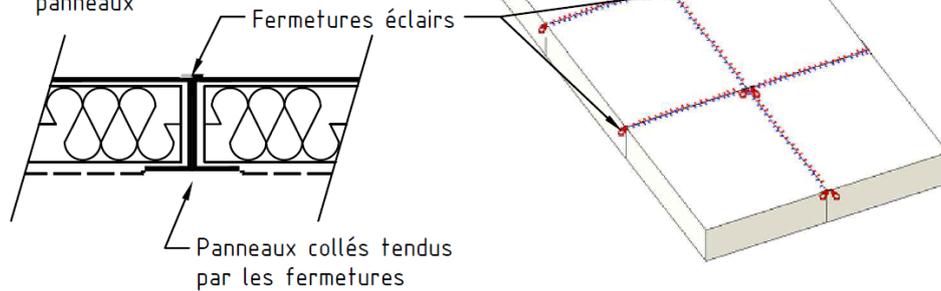


Figure 96 : Schéma d'assemblage par fermetures éclairs des panneaux Isolpac

4.1.2.2 Assemblage des panneaux par bandes auto-agrippantes

La deuxième technique issue du textile est d'utiliser des bandes auto-agrippantes, comme décrit sur la Figure 97. Des rabats en textile dépassent du panneau sur sa face extérieure sur deux cotés latéraux. Une bande auto-agrippante femelle est soudée sur ce rabat. A l'opposé, sur les deux cotés du panneau sans rabats, une bande auto-agrippante mâle est soudée. Les rabats du panneau viennent se fixer sur les bandes mâles du panneau voisin, et ainsi de suite, créant un effet de superposition similaire à des tuiles.

► Assemblage par rabats auto-agrippants

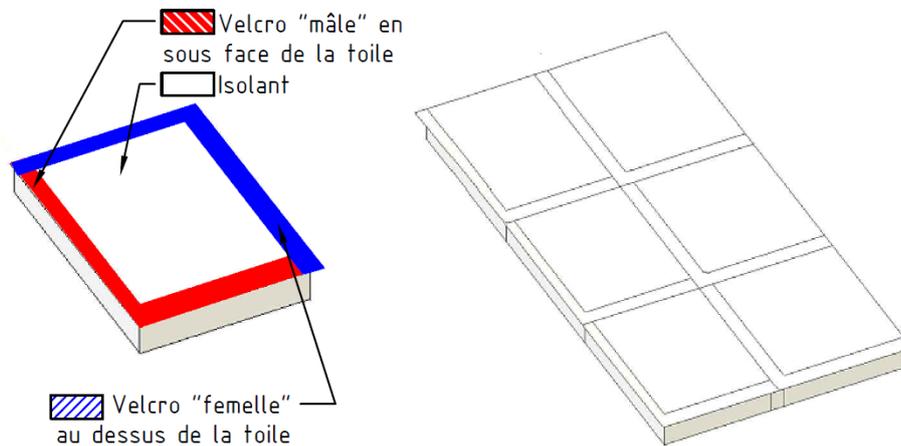


Figure 97 : Schéma d'assemblage par rabats auto-agrippants des panneaux Isolpac

Des travaux avec la société Velcro nous ont permis d'identifier des solutions adaptées à nos contraintes, en termes d'accroche mécanique, de durabilité, de réaction au feu et de coût. Des essais in situ nous ont permis de vérifier la pertinence de cette technique.

4.1.2.3 Assemblage des panneaux par rail et par jonc

Dans le milieu du store textile, des systèmes de joncs associés à des rails sont également utilisés.

Pour utiliser ce système de jonc, un rail doit être spécifiquement développé. Ce rail permettra de maintenir le jonc et d'assurer ainsi l'étanchéité entre deux panneaux et le maintien mécanique de l'ensemble. La Figure 98 montre un schéma du dispositif. Sur les cotés de la face extérieure des panneaux est fixé un jonc par l'intermédiaire d'un rabat textile mobile. Ce jonc vient ensuite se fixer dans un rail développé spécifiquement.

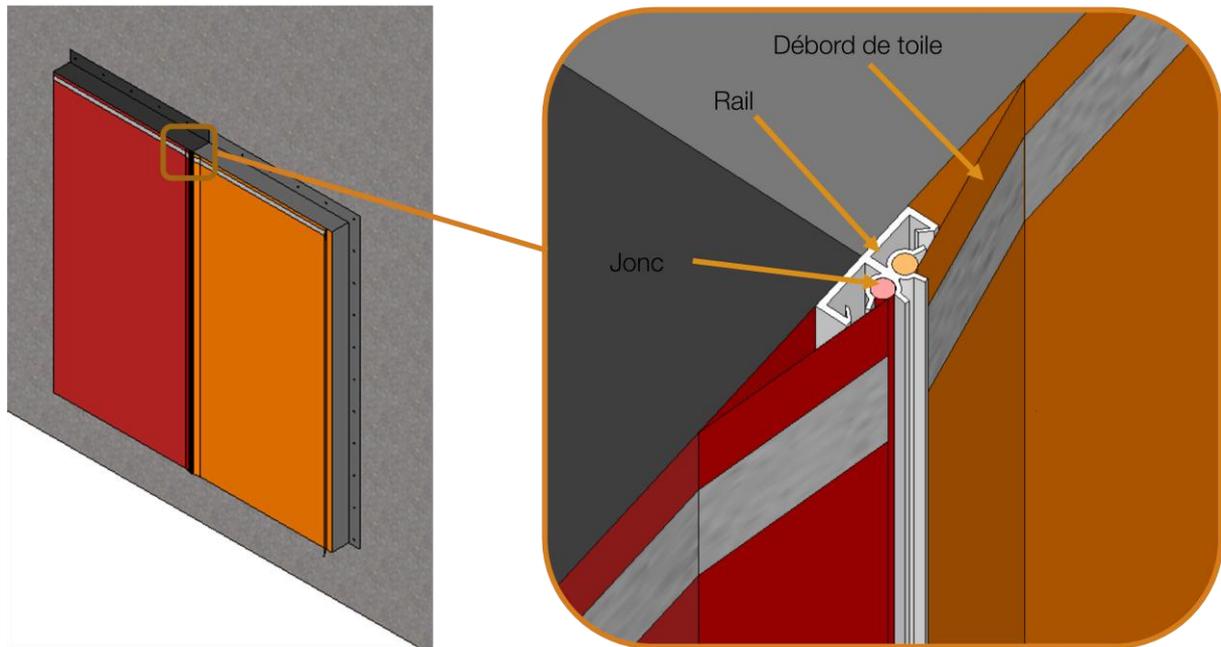


Figure 98 : Schéma représentant l'assemblage par rails et joncs des panneaux Isolpac

La conception du rail de fixation est un sujet complexe. Afin de se faire une première idée de la faisabilité de cette technique, un premier modèle de rail a été développé. Ce rail est en PVC et permet uniquement une accroche par « clipsage » des joncs. C'est ce rail qui est représenté sur la Figure 98. Il possède deux emplacements pour venir y « clipser » deux joncs, ainsi qu'une gouttière à l'arrière permettant à l'eau qui éventuellement se serait infiltrée derrière les joncs de s'écouler.

Cette solution ne peut être celle retenue car elle ne permettra pas un maintien durable et en toute sécurité des panneaux. En effet le « clipsage » ne permet pas de résister à de grandes sollicitations mécaniques. Néanmoins, des essais de pose ont été réalisés in situ à l'échelle 1 afin de définir s'il était pertinent de persévérer sur le développement d'un rail spécifique.

Pour développer ce rail, j'ai réalisé plusieurs modélisations 3D de celui-ci, puis nous avons fait des impressions 3D de ces modèles, afin de produire des rails d'une dizaine de centimètres. Ces rails ont été testés sur des joncs, et la forme et le diamètre les plus adaptés ont été retenus afin de développer une filière d'extrusion PVC spécifique.

4.2 Résistance mécanique du système d'accroche et d'assemblage

Les systèmes de fixation des systèmes d'isolation par l'extérieur « classiques » décrits au paragraphe 1.2.3.1 sont réglementés dans des normes et DTU. Cependant, ces normes et DTU sont spécifiques aux techniques existantes et ne s'adressent pas aux techniques nouvelles. Des parallèles avec les exigences de ces normes doivent être faits afin de juger des critères à respecter pour le système de fixation.

Ainsi, le nouveau système d'accroche devra prouver sa capacité à maintenir l'isolant sur la façade en respectant les règles de sécurité propres à la construction.

En conséquences, le système devra résister aux actions du vent, aux charges telles que celles induites par son poids propre, par la pluie ou par la neige et devra tenir en cas d'incendie.

4.2.1 Actions du vent

Le DTU NV65 relatif aux règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions (CSTB, février 2009) fixe les pressions dynamiques normales et extrêmes (Tableau 38) auxquelles doit résister le système selon la zone dans laquelle se situe le bâtiment (Figure 99).

	Pression dynamique de base normale	Pression dynamique de base extrême
Zone 1	50 daN/m ²	87,5 daN/m ²
Zone 2	60 daN/m ²	105,0 daN/m ²
Zone 3	75 daN/m ²	131,0 daN/m ²
Zone 4	90 daN/m ²	157,5 daN/m ²
Zone 5	120 daN/m ²	210,0 daN/m ²

Tableau 38 : Valeurs normales et extrêmes des pressions dynamiques dues au vent selon la zone concernée (CSTB, février 2009)

Comme montré sur la Figure 99, la zone 5 n'existe pas en France métropolitaine, et la zone 4 n'est présente qu'en Corse. Par conséquent, un respect des conditions fixées pour une utilisation en zone 3 sera considéré suffisant dans notre cas. Soit une pression dynamique de base maximale de 131 daN/m².

Lorsque les bâtiments dépassent 10 mètres de haut, la règle NV65 définit la pression dynamique q_H à la hauteur H en fonction de la pression dynamique de base q_{10} donnée par le Tableau 38 :

$$\frac{q_H}{q_{10}} = 2,5 \frac{H + 18}{H + 60} \quad (4.1)$$

Par exemple, pour un immeuble de 50 mètres, le système devra résister à une pression maximale de 202 daN/m².

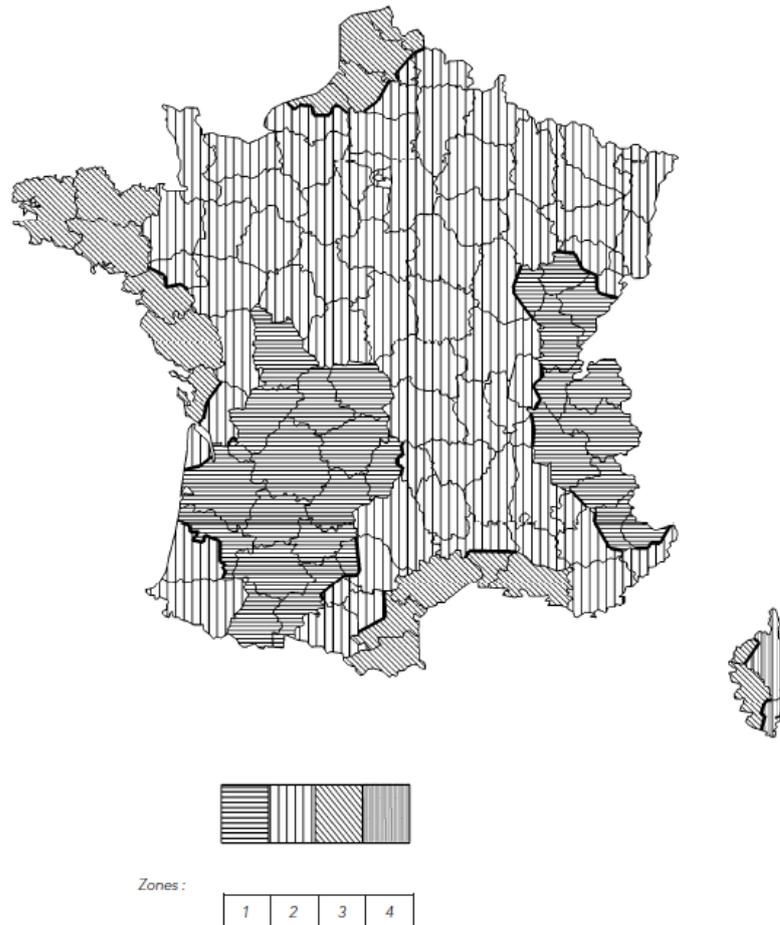


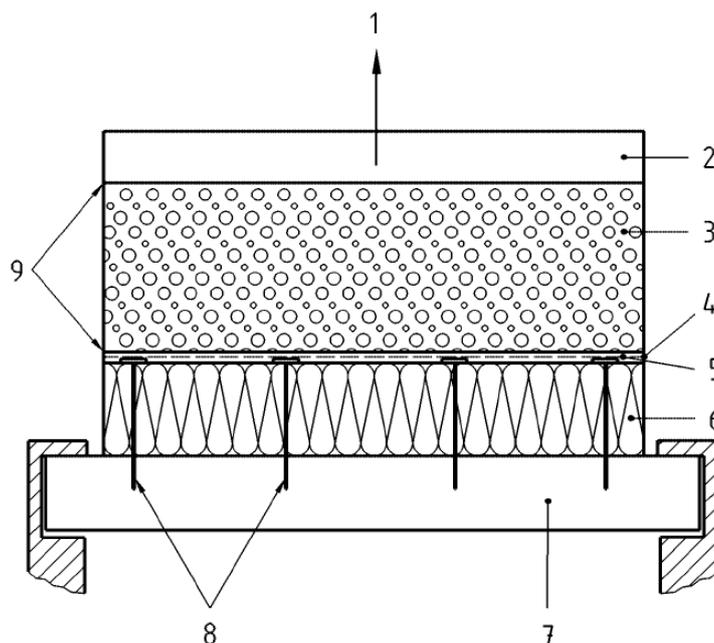
Figure 99 : Carte des zones des vents en France métropolitaine (CSTB, février 2009)

La Norme NF EN 13495 (AFNOR, Février 2003) permet de déterminer la résistance à l'arrachement d'un système composite d'isolation. Cet essai nous permet de tester la résistance de nos fixations. Cette résistance pourra être comparée à la pression de base maximale auquel pourrait être soumis le système.

On soumet au dispositif une ou plusieurs éprouvettes afin d'être le plus proche possible de la réalité à un dispositif de traction.

Le dispositif est décrit Figure 100. Il comporte :

- Une dalle de béton aux dimensions au moins égales à celles de l'éprouvette. Son épaisseur minimale est de 100mm. La classe de résistance minimale de la dalle doit être C20/25.
- Un bloc de mousse (par exemple une mousse de polyéther). Ses dimensions sont comprises entre 200mmx200mm et 333mmx333mm. L'épaisseur du bloc doit être comprise entre 300 et 500mm. Sa résistance à la traction doit être comprise entre 80kPa et 150kPa et sa contrainte de rupture dépasse 160%.
- Un panneau de bois de même dimension que l'éprouvette.
- Une machine d'essai de traction fonctionnant à vitesse transversale constante de 10 ± 1 mm/min et mesurant l'effort de traction avec une précision de 1%.



Légende

- | | | | |
|---|--------------------------|---|---------------------------|
| 1 | Force de traction F | 6 | Produit isolant thermique |
| 2 | Panneau de contre-plaqué | 7 | Dalle de béton armé |
| 3 | Bloc de mousse | 8 | Ancrages |
| 4 | Couche de base | 9 | Adhésif |
| 5 | Armature | | |

Figure 100 : Dispositif pour la mesure de la résistance à l'arrachement d'un système d'isolation tel que définit dans la norme NF EN 13495.

L'ITE est fixé sur la dalle béton à l'aide du mode de fixation à tester. Le bloc de mousse est ensuite collé sur toute la surface de l'éprouvette, puis le panneau de bois est collé sur le bloc de mousse à l'aide de la même colle.

L'essai doit être effectué à $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

La force maximale avant rupture est mesurée tout au long de l'essai. Cette force pourra être ensuite comparée aux exigences de la règle NV65 (CSTB, février 2009).

La recherche du système de fixation optimal ayant nécessité de nombreux développements, la solution finale est seulement en passe d'être trouvée en fin de thèse. Pour cette raison, les essais d'arrachement n'ont pas encore été réalisés. En revanche, comme précisé dans la suite du mémoire, différentes techniques de fixation ont été testées in situ et ont fait leurs preuves « par la pratique ».

L'essai d'arrachement reste néanmoins nécessaire et sera effectué dès que la technique finale de fixation sera validée.

4.3 Résistance au feu

4.3.1 Réglementation

Le système devra tenir même en cas d'incendie. Il est en effet impensable qu'une partie de l'enveloppe tombe alors que des personnes risquent de sortir du bâtiment.

Il faut donc déterminer la résistance au feu de du nouveau système. La résistance au feu est définie dans l'Eurocode 1 (juillet 2003) par « aptitude d'une structure, d'une partie de structure ou d'un élément de structure à remplir les fonctions exigées (fonction porteuse ou séparative) pour un niveau de chargement, une exposition au feu et une durée donnés »

L'Instruction Technique 249 (IT 249) (2010) relative aux façades est la référence réglementaire pour ce qui concerne la sécurité incendie relative aux façades dans les établissements recevant du public. La réglementation concernant les bâtiments de logement étant moins contraignante et l'IT 249 étant amenée à être appliquée également pour les logements, c'est cette instruction technique que nous considérerons.

C'est plus particulièrement le paragraphe 5.3 « Autres solutions d'isolation sur béton ou maçonnerie » de ce document qui concerne le système Isolpac. Ce paragraphe stipule que ces solutions peuvent être mises en œuvre si elles disposent d'un avis favorable du CECMI (Comité d'Etudes et de Classification des Matériaux et éléments de construction par rapport au danger d'Incendie) sur leur comportement au feu. Cet avis peut-être obtenu après le passage d'une série d'essai dont les résultats sont suffisamment bons pour convaincre le CECMI de la performance de la bonne réaction au feu du système.

Parmi ces essais, celui qui est quasi incontournable est le LEPİR 2 (local expérimental pour incendie réel à deux niveaux), qui est défini dans l'Arrêté du 10 septembre 1970 relatif à la classification des façades vitrées par rapport au danger d'incendie. Cet essai consiste à reproduire un incendie sur un bâtiment à deux étages. Un bâtiment de deux étages est monté et habillé du revêtement à tester (Figure 101). Au premier niveau, 600kg de bois sont enflammés pendant une heure pour simuler un incendie. Des thermocouples sont placés en avant de la façade et dans le local du deuxième niveau. L'ensemble des incidents sont consignés durant l'essai (destructions, inflammations, projections...). L'élément ne peut être jugé valide s'il y a inflammation du deuxième niveau ou s'il y a un passage de flammes et de gaz brulants entre le plancher et les façades.

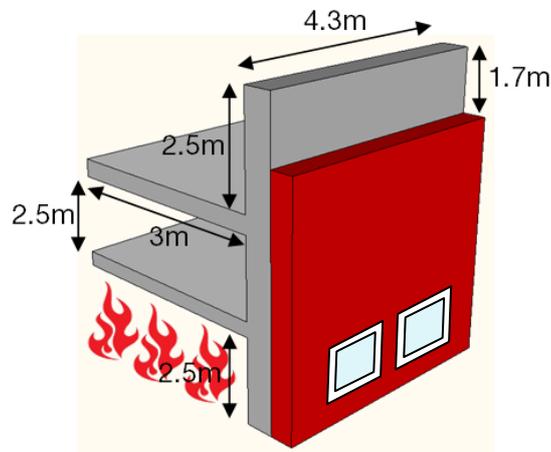


Figure 101 : Schéma du dispositif d'essai au feu LEPİR 2

4.3.2 Perspectives

Comme expliqué précédemment, le système de fixation est seulement en phase de finalisation à la fin de la thèse. L'essai LEPIR 2 était très contraignant et très coûteux, il est indispensable d'avoir une version finalisée à la fois des matériaux et du système de fixation avant de la passer.

Par conséquent, l'essai LEPIR 2 n'a pas encore pu être réalisé sur le système Isolpac. Un essai est prévu pour le mois d'octobre 2014 dans le laboratoire Efectis.

4.4 Essais de pose in situ et à l'échelle 1

Les essais de pose in situ permettent de juger de plusieurs éléments : Premièrement, il est possible de juger de la facilité ou au contraire des difficultés qu'ont les compagnons à poser les panneaux. Ensuite, il est possible de juger de la qualité de la pose ainsi que de l'esthétique. Enfin, la tenue des panneaux dans le temps a été observée ce qui a permis de déterminer si oui ou non les techniques semblaient mécaniquement viables.

4.4.1 Choix du prototypage et méthode de pose in situ

Des prototypes ont été fabriqués pour réaliser les essais de pose in situ. Les panneaux n'ayant pas de dimensions standards puisqu'ils doivent être réalisés sur-mesure pour le bâtiment, nous avons réalisé des prototypes de différentes dimensions : 1x2m², 2x1m², 3x1m², 3x2m² et 2x2m². Par ailleurs, les premiers essais de pose ayant été effectués assez tôt durant la thèse, les prototypes ne sont pas tous composés des mêmes toiles. Certains sont réalisés intégralement avec la toile 0, d'autres intégralement avec la toile 1, d'autre avec la toile 1 à l'arrière et la toile 0 à l'avant, et enfin les derniers avec la toile 3 à l'arrière et la toile 11 à l'avant ou encore avec la toile 12 à l'avant. Cette toile 12 est une toile 0 sur laquelle a été contrecollé une membrane en Polyuréthane. Cette toile n'a pas été caractérisée précédemment car très tôt, des essais de vieillissement tels que décrits au 2.2.3.2 l'ont éliminée.

Le Tableau 39 récapitule les différents panneaux posés.

Les modes de poses utilisés sont parmi ceux ayant été décrits précédemment. Le panneau 5 est un peu spécial : Ce panneau se fixe par velcro directement sur les panneaux voisins. Il est ainsi « suspendu » entre deux panneaux.

Les panneaux sont posés par groupes. Au sein d'un même groupe les panneaux sont assemblés entre eux, tandis que les groupes sont indépendants. La Figure 102 donne la disposition des différents panneaux et permet de voir quels panneaux sont assemblés entre eux.

N°	Taille	Toile extérieure	Toile intérieure	Mode de fixation	Mode d'assemblage
1	3x1m ²	Toile 1	Toile 1	Vissage de débords	Velcro
2	3x2m ²	Toile 0	Toile 0	Vissage de débords	Velcro
3	1x2m ²	Toile 0	Toile 1	Vissage de débords	Velcro
4	2x1m ²	Toile 0	Toile 1	Vissage de débords	Velcro
5	2x0.5m ²	Toile 1	Toile 1	Velcro « suspendu »	Velcro
6	2x2m ²	Toile 0	Toile 0	Vissage de débords	Velcro
7	2x1m ²	Toile 1	Toile 1	Rails et joncs	Velcro
8	2x1m ²	Toile 0	Toile 0	Rails et joncs	Velcro
9	2x1m ²	Toile 0	Toile 1	Velcro type 1	Velcro
10	2x1m ²	Toile 0	Toile 1	Velcro type 2	Velcro
11	2x1m ²	Toile 11	Toile 3	Vissage de débords	Rail PVC + joncs
12	2x1m ²	Toile 11	Toile 3	Vissage de débords	Rail PVC + joncs
13	2x1m ²	Toile 11	Toile 3	Vissage de débords	Rail PVC + joncs
14	2x1m ²	Toile 11	Toile 3	Vissage de débords	Rail PVC + joncs
15	2x1m ²	Toile 12	Toile 3	Vissage de débords	Rail PVC + joncs
16	2x1m ²	Toile 11	Toile 3	Vissage de débords	Rail PVC + joncs

Tableau 39 : Description des différents prototypes produits et posés in situ

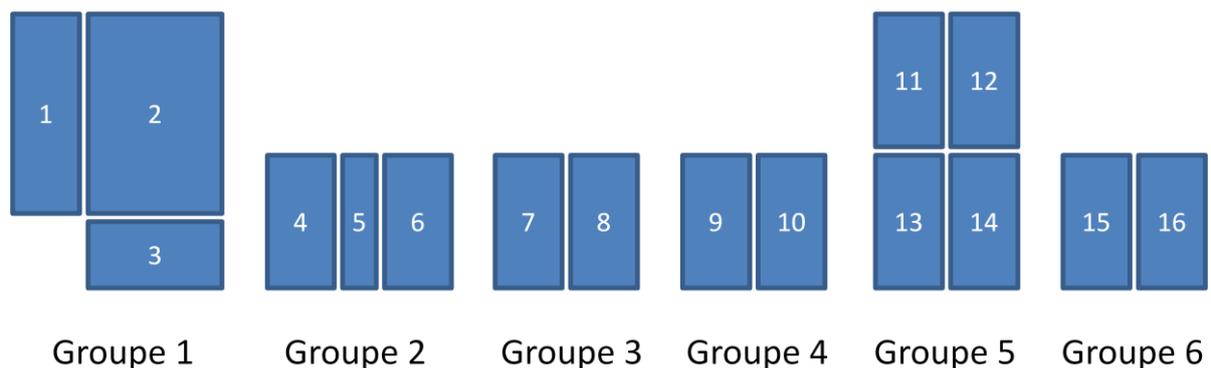


Figure 102 : Disposition des panneaux posés in situ

Les prototypes ont été posés sur une façade de l'usine de notre partenaire Dickson. Cette façade est exposée plein sud. Ils y sont restés entre 1 an et 6 mois.

La pose des panneaux s'est effectuée par trois compagnons. Une nacelle a été utilisée pour poser les panneaux en hauteur.

4.4.2 Analyse de la pose après essais in situ

Les premières remarques des compagnons sur le nouveau système sont positives : ils apprécient sa légèreté et le fait que le panneau n'est pas irritant contrairement à la plupart des isolants à base de laines minérales qu'ils ont l'habitude de poser.

4.4.2.1 Essais in situ de la technique de fixation par vissage de débords de toile

Pour poser le premier groupe de panneaux, les compagnons ont d'abord commencé à fixer les panneaux du bas. Ils ont vissé le débord supérieur du panneau, puis le débord latéral. La pose du premier panneau s'est faite facilement avec seulement deux compagnons. La Figure 103 montre le résultat obtenu.



Figure 103 : photos du panneau 1 posé : à gauche le panneau posé, à droite un zoom sur la fixation d'angle.

La pose du deuxième panneau est plus laborieuse de part sa grande dimension. Comme le montre la photo de gauche sur la Figure 104, deux compagnons sont contraints de monter dans la nacelle tandis qu'un troisième tient le panneau en partie basse. Le résultat final est néanmoins satisfaisant puisque les trois panneaux se sont posés très rapidement.

Pour le deuxième groupe de panneaux, le principe de pose est le même mis à part pour le panneau 5 qui est maintenu uniquement par des bandes auto-agrippantes sur les panneaux 4 et 6. Ainsi les panneaux 4 et 6 ont tout d'abord été fixés de la même façon que les panneaux précédents, puis le panneau 5 a été fixé comme le montre la Figure 105.



Figure 104 : Photos de la pose du second et du troisième panneau : à gauche la pose du deuxième panneau, à droite les trois premiers panneaux posés



Figure 105 : Photos du deuxième groupe de panneaux posés in situ. A gauche la pose du panneau 5, à droite le résultat final.

4.4.2.2 Essais in situ de la technique de pose par rails métalliques

Le troisième groupe de panneaux se pose différemment. Des rails sont utilisés. Les rails sont posés verticalement pour le panneau 7 et horizontalement pour le panneau 8. Un rail est visible Figure 106. Il s'agit d'un profil « en C » dans lequel un jonc peut se glisser. Le profil est percé régulièrement pour pouvoir être fixé. Sur cette même figure, il est montré que les rails sont d'abord fixés au mur, puis les panneaux sont glissés dans les rails.

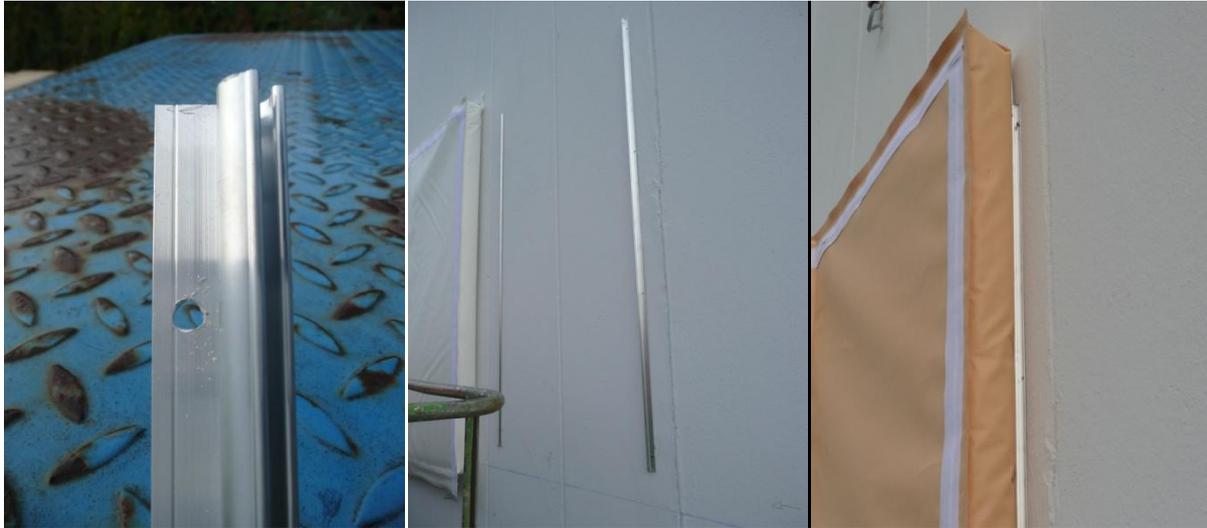


Figure 106 : Photos de la pose in situ des panneaux avec la technique rails et joncs. A gauche un rail, au centre les deux rails fixés verticalement, à droite le panneau fixé par rail.

Cette technique n'a pas été très convaincante. En effet, le glissement des panneaux dans les rails est assez fastidieux. Les panneaux étant souples, ils ont tendance à se tordre et à rendre le glissement difficile sur une si grande longueur. Par ailleurs, avec cette solution, le panneau est écarté du mur d'environ 1cm, ce qui n'est pas acceptable thermiquement car si de l'air circule dans cet espace et est échangé avec l'extérieur, l'effet du panneau isolant sera annulé, car de l'air froid viendra remplacer l'air qui est normalement maintenu chaud grâce à l'action de l'isolant.

4.4.2.3 Essais in situ de fixation des panneaux par bandes auto-agrippantes

Le quatrième groupe de panneaux est posé par bandes auto-agrippantes. Pour cela, deux bandes auto-agrippantes mâles sont vissées au mur comme le montre la Figure 107. Les panneaux qui comportent des bandes auto-agrippantes femelles soudées sur une de leur face sont ensuite simplement appliqués contre les bandes mâles.

Cette technique est très satisfaisante en termes de temps de pose. Par ailleurs, les bandes auto-agrippantes sont capables de porter le poids propre du panneau et de le maintenir même en cas de vents importants. Il est par ailleurs impossible de retirer ces panneaux à la force des bras. Le panneau est ainsi difficile à mettre à niveau, et une fois en place, il est compliqué de le repositionner. C'est pour cette raison que cette technique ne sera pas retenue.



Figure 107 : Photos de la pose in situ des panneaux fixés par bandes auto-agrippantes. A gauche la bande auto-agrippante vissé au mur, à droite les deux panneaux posés.

4.4.2.4 Essais in situ de fixation des panneaux par vissage de débords de toile et assemblage par rails

Les deux derniers groupes de panneaux sont fixés et assemblés avec la même technique. En effet, les panneaux sont fixés au mur par l'intermédiaire de débords vissés au mur (comme dans le cas des groupes 1 et 2). Et l'assemblage des panneaux entre eux est réalisé verticalement par l'intermédiaire de joncs et du rail PVC spécifiquement développé. C'est cet assemblage qui différencie ces deux groupes de panneaux des autres groupes. Horizontalement, l'assemblage est réalisé de la même façon que pour les autres groupes : par l'intermédiaire d'une bande auto-agrippante fixée sur un rabat. Les deux techniques d'assemblage sont visibles sur la Figure 108.



Figure 108 : Photos de la pose in situ des panneaux, avec la méthode d'assemblage mixte rails+joncs et velcro. A gauche l'assemblage horizontal en velcro, à droite l'assemblage vertical par rail PVC.

La pose in situ de ces deux groupes a permis de valider l'idée d'utiliser un rail pour assembler deux panneaux. Une certaine simplicité de pose est observée. En revanche, cette pose a montré que le rail PVC n'était pas une bonne solution. En effet, les joncs se déclipent trop

facilement et ne permettent pas un maintien mécanique assuré. Par ailleurs, nous avons constaté une certaine disparité entre les différents rails, due à des jeux de fabrication trop importants. La deuxième production de rail utilisée pour le groupe 6 était bien plus « lâche » et les joncs n'étaient que très peu maintenus comparés à la première production de rails.



Figure 109 : Photos de la pose in situ des prototypes. À gauche le groupe 5 posé, à droite le groupe 6 posé.

La Figure 109 montre le résultat final obtenu.

4.4.3 Conclusion des essais de pose in situ

Les essais de pose in situ ont permis de montrer la faisabilité du concept Isolpac. En effet, l'ensemble du concept ne fonctionne que si la pose est très rapide et simple, comparée aux techniques traditionnelles. Dans les essais de pose, même si les compagnons n'étaient pas formés à ces nouvelles techniques, ils les ont très vite comprises et appliquées. Les panneaux ont été posés à raison de 5 à 10 minutes pour chaque panneau. Ce qui permet de couvrir une très grande surface rapidement.

Par ailleurs, le retour des compagnons a été très positif en termes d'ergonomie : les panneaux sont légers, non irritants et non salissants, comparés à la majorité des techniques traditionnelles.

Ces essais de pose ont permis de valider la technique de fixation par vissage de débords. Le résultat avec cette technique est tout à fait satisfaisant. À l'inverse, la fixation au mur par rails et la fixation au mur par bandes auto-agrippantes ont été éliminées.

Concernant l'assemblage des panneaux entre eux, la solution par bandes auto-agrippantes est efficace à la pose. Néanmoins, il est difficile d'assurer l'étanchéité pour la fixation verticale. En effet, si le vent est opposé au sens du rabat, il y a un risque d'infiltration. En revanche, les rabats horizontaux ne présentent pas de risques.

Pour ces raisons, c'est la dernière technique de fixation, celle utilisée pour les groupes 5 et 6 qui sera retenue. En revanche, la pose a permis de s'apercevoir que le rail PVC n'est pas une solution viable. Par ailleurs, le résultat esthétique montre qu'il faut ajouter au rail un système permettant la mise en tension des toiles afin de supprimer les nombreux plis visibles. Les recherches vont donc se poursuivre pour concevoir un rail plus adapté à nos problématiques. La partie suivante décrit ce rail, qui est toujours en cours de développement à la fin de la thèse.

4.5 Technique finale d'accroche et d'assemblage retenue

Suite aux essais in situ, la technique optimale a pu être imaginée : la fixation se fera par vissage de débords de la toile intérieure, tandis que l'assemblage se fera avec une combinaison entre des rails verticaux et des bandes auto-agrippantes horizontales. Nous avons pu voir qu'utiliser du PVC pour le rail n'était pas acceptable. A ce stade, des prototypes de rails en aluminium sont donc en cours de conception. Cette partie va décrire d'une part le panneau final, d'autre part le rail. Enfin la technique de pose sera détaillée.

4.5.1 Description détaillée du panneau final

Le panneau doit comporter plusieurs éléments servant à sa fixation d'une part et à son assemblage avec les panneaux voisins d'autre part.

La Figure 110 montre le panneau dans sa version finale. Plusieurs éléments sont distinguables. En premier lieu, les deux toiles sont visibles: la toile extérieure (en rouge), qui compose la face avant du panneau ainsi que les cotés de celui-ci, et la toile intérieure (en gris), qui compose la face arrière ainsi que deux débords latéraux consécutifs. Entre ces deux toiles se trouve l'isolant (non visible sur le schéma). Sur la toile extérieure, plusieurs éléments sont soudés : deux rails verticaux parallèles de chaque côté du panneau, une bande auto-agrippante femelle horizontale en partie haute du panneau, et un rabat derrière lequel est soudé une bande auto-agrippante mâle en partie basse du panneau.

Le résultat final est un panneau semi-rigide, léger (de l'ordre de 2kg/m^2).

Les panneaux sont réalisés sur mesure selon les trames du bâtiment. La taille moyenne sera de l'ordre de $2 \times 1\text{m}^2$, mais le panneau pourra faire jusqu'à 3m de long.

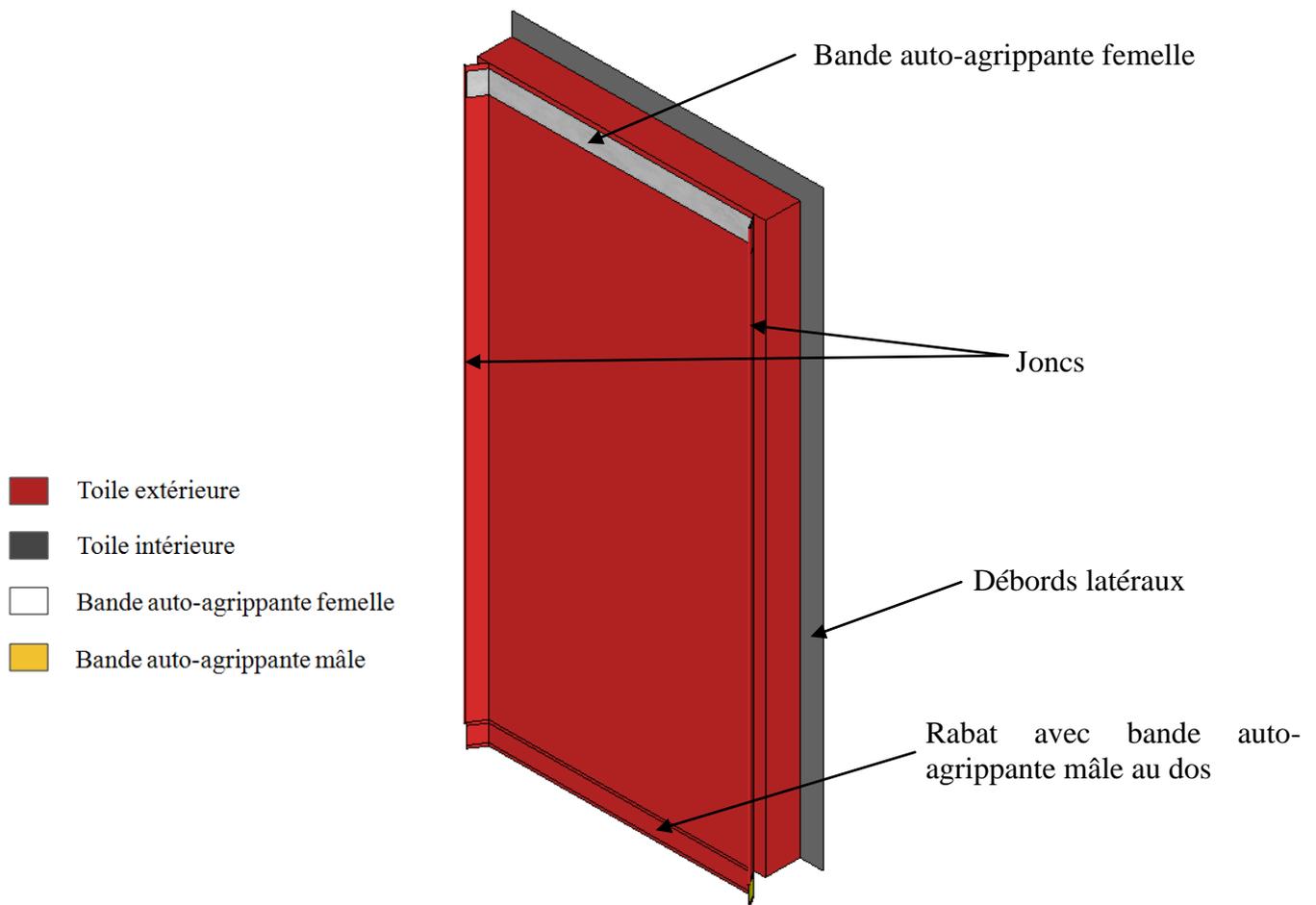


Figure 110 : Schéma du panneau Isolpac

4.5.2 Le rail de fixation : description et perspectives

La dernière version du rail de fixation est représentée Figure 111. Il se fixe sur une équerre métallique classique déjà distribuée sur le marché (en vert clair). Cette équerre est elle-même fixée sur le mur, avec une cale plastique (en bleu) qui sert à limiter le pont thermique lié à l'équerre. Le rail est fixé sur les équerres d'abord en se glissant dans des encoches dédiées, puis est immobilisé à l'aide de vis.

Le rail est composé de deux parties principales : Une partie fixe, et une partie amovible. Ces deux parties sont reliées par l'intermédiaires de vis et d'écrous rivkle®. La particularité de ces écrous est de permettre l'étanchéité entre le vis est l'écrou, et entre l'écrou et le rail. Les deux parties sont à l'état initial suffisamment écartées pour que l'on puisse venir glisser les joncs entre les deux. Ensuite, en vissant, les deux parties vont se rapprocher et les joncs vont être maintenus dans le rail. En vissant davantage, la toile extérieure pourra être tendue. Un élément supplémentaire en « U » permet de faire le raccordement entre deux rails, afin d'assurer la continuité de la structure.

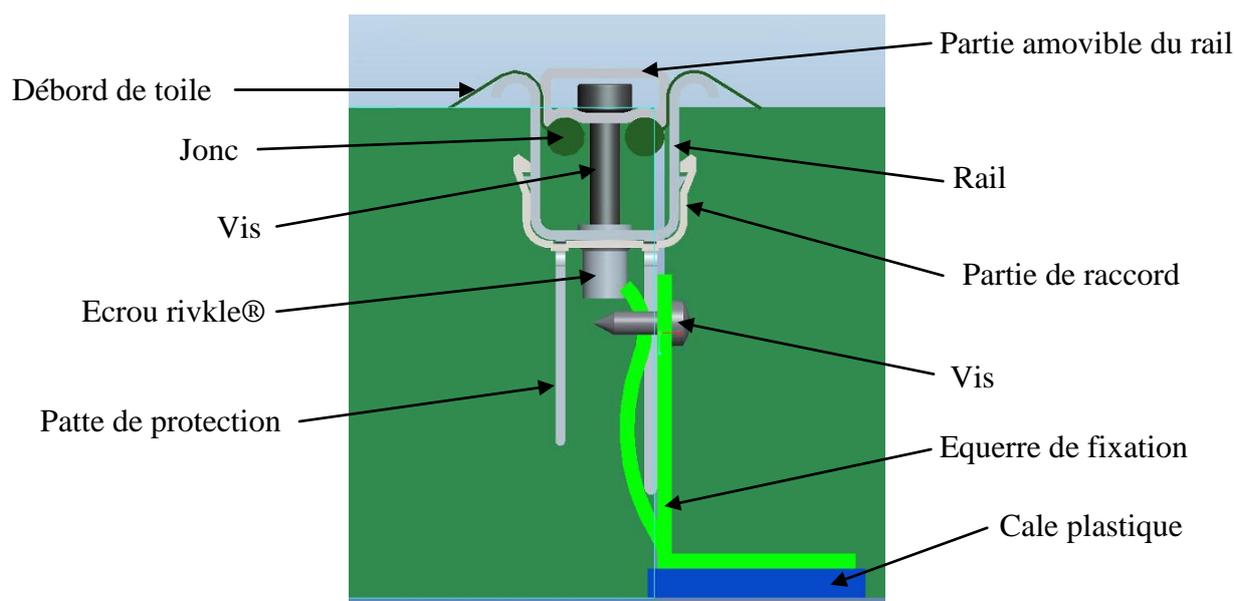


Figure 111 : Schéma en coupe représentant le rail de fixation dans sa dernière version

4.5.3 Le mode opératoire de pose

La pose se fait en plusieurs étapes. Ces étapes sont illustrées Figure 112. Tout d'abord un premier panneau est vissé le long de ses débords (étape 1). Ensuite, des équerres de fixation sont fixées contre le panneau, sur le débord vertical (étape 2). Le rail est fixé sur ces équerres, puis le deuxième panneau est fixé de la même manière que le premier, en vissant ses débords. Le second panneau est posé contre le premier. Il recouvre donc le débord vertical du premier panneau. Les deux panneaux sont assemblés en venant fixer les joncs dans le rail (étape 3). Enfin, le panneau du dessus est fixé en venant se coller contre le premier panneau (au dessus de son débord horizontal). Les débords du troisième panneau sont vissés au mur comme pour les deux panneaux précédents. Pour finir, le rabat velcro du panneau 3 est rabattu sur le premier panneau (étape 4). Ces étapes sont répétées pour poser l'ensemble des panneaux.

Ce mode opératoire est très original et permet une pose rapide. Par ailleurs, les panneaux isolants ne sont pas percés ce qui limite les ponts thermiques. Seules les équerres de fixation créent des ponts thermiques mais ces ponts sont déjà présents sur les systèmes d'isolation par l'extérieur sous bardages classiques.

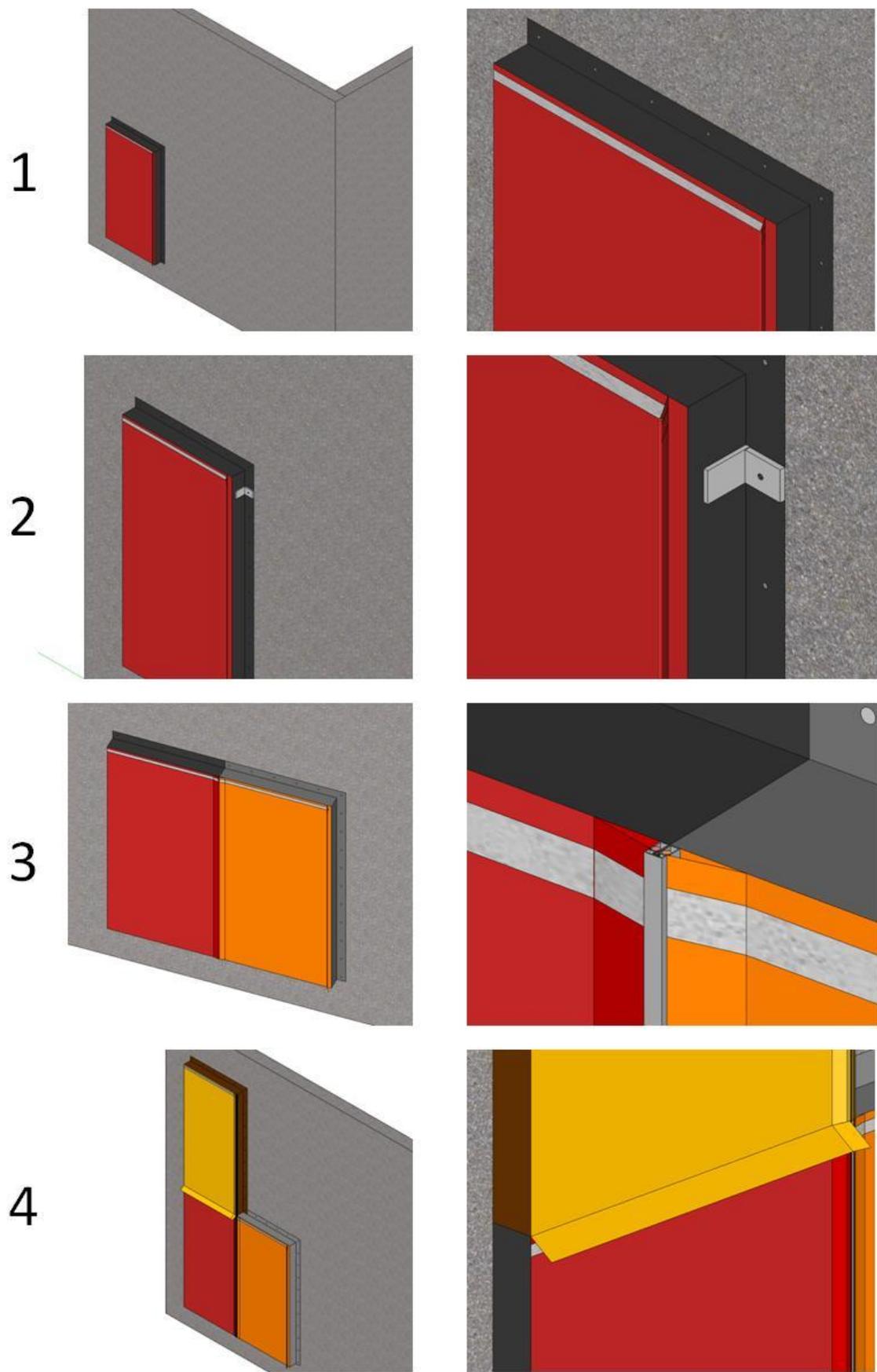


Figure 112 : Les étapes successives de la pose du système Isolpac

4.6 Validation de l'ensemble par un essai in situ à grande échelle : projet de façade démonstratrice

4.6.1 Nécessité de l'essai à grande échelle : avis technique et avis techniques expérimentaux

4.6.1.1 La procédure d'avis technique du CSTB

Le système Isolpac étant innovant, il est non-traditionnel et difficilement comparable aux systèmes classiques. Par conséquent, il n'existe pas de DTU applicable dans notre cas pour justifier de la conformité du produit et de sa pose avec les réglementations et le respect des normes de sécurité.

Il existe en France une procédure spécifique aux nouveaux matériaux ou systèmes de construction : la procédure d'Avis Technique (Atec). Cette procédure est gérée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

L'Avis Technique est une évaluation formulée par un groupe d'experts composé d'un panel de personnes issues des professions liées au produit ou au système considéré. Ce groupe d'experts est appelé Groupe Spécialisé (GS). Ce GS va se prononcer sur l'aptitude à l'usage des ouvrages réalisés avec des procédés innovants. Ces GS sont placés sous l'autorité de la Commission Chargée de Formuler les Avis Techniques (CCFAT).

L'avis va en particulier spécifier le domaine d'emploi du produit ou système évalué, permettant ainsi aux différents bureaux de contrôles et assureurs de se positionner quant à la possibilité d'utiliser le produit ou système sur un projet de construction.

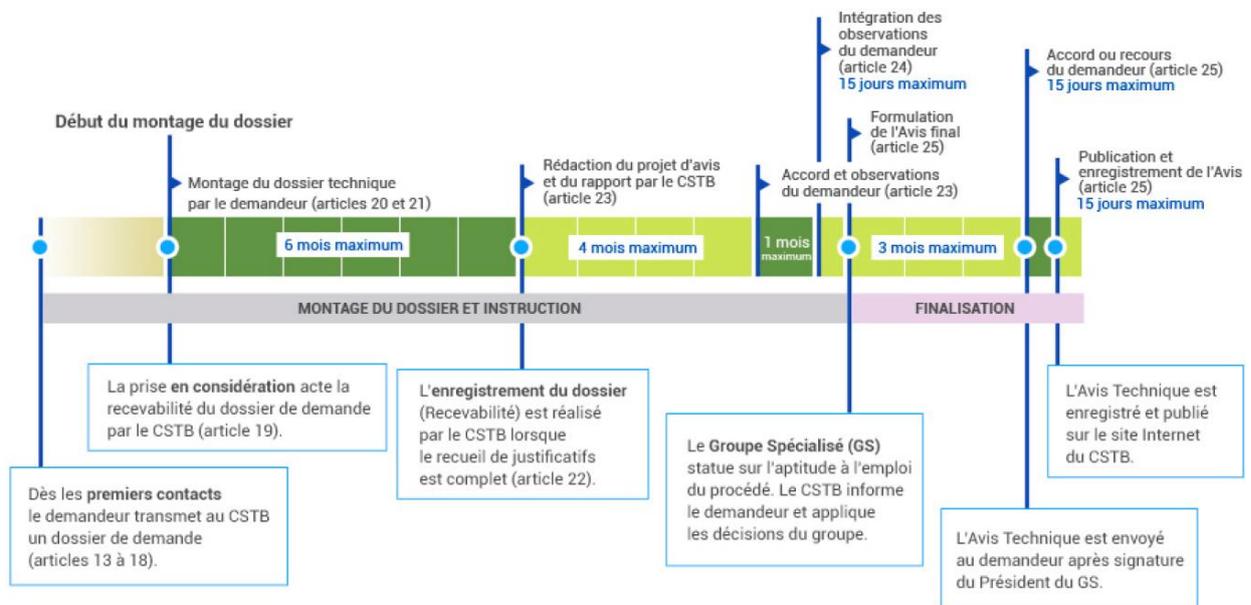


Figure 113 : Phasage et principaux délais de la procédure d'Avis Technique (CSTB)

Les procédures d'avis techniques sont longues. La Figure 113 donne le phasage de la procédure d'avis technique tel que le décrit le CSTB. La durée indiquée est ici de quinze

mois, ce qui à l'échelle d'un développement de produit est très long. D'autant plus que cette phase ne peut pas vraiment s'anticiper puisque le produit doit être finalisé, et l'usine de production déjà fonctionnelle avant que la démarche ne soit lancée.

Un Avis Technique est ensuite valable entre 2 et 7 ans selon le retour d'expérience existant sur ce produit. Dans le cas d'un produit totalement nouveau, la durée de validité est le plus souvent de 2 ans.

4.6.1.2 Une première étape, les avis techniques expérimentaux

Afin de pouvoir tout de même tester un produit sur quelques bâtiments sans attendre un délai de quinze mois, et de pouvoir bénéficier de premiers retours d'expérience avant de demander un Avis Technique, il existe une procédure moins longue mais plus restrictive appelée Avis Technique Expérimental (Atex).

L'Atex est un avis donné par un groupe d'expert sur l'utilisation du produit ou système pour un bâtiment ou un type de bâtiment en particulier. La demande se fait lorsqu'un chantier en particulier est identifié. Le groupe d'expert va alors se prononcer sur la possibilité d'utiliser le produit ou système sur le chantier considéré.

Trois types d'Atex existent :

- Les Atex de type « a » : ce sont des Atex valables pour le chantier considéré et pour tout autre bâtiment du même type. Ils ont tout de même une durée de validité limitée.
- Les Atex de type « b » : ils ne sont valables que pour le chantier considéré
- Les Atex de type « c » : Ce sont des Atex délivrés pour des produits ou systèmes ayant déjà obtenus un Atex de type « b »

L'Atex permet de bénéficier de quelques références avec un produit semi-industrialisé, avant de s'engager dans une industrialisation du produit plus poussée et dans une démarche d'Avis Technique.

Dans le cas d'Isolpac, c'est un Atex de type « a » qui sera visé, avant d'engager une démarche d'Avis Technique.

4.6.2 La façade démonstratrice : description et problématiques

4.6.2.1 Description du projet de façade démonstratrice

Pour l'obtention du premier Avis Technique Expérimental, nous avons fait le choix d'isoler une façade appartenant au groupe Bouygues, afin de s'affranchir de la validation d'un maître d'ouvrage et d'une maîtrise d'œuvre, et de gagner du temps sur les démarches commerciales et administratives.

La Figure 114 montre une photo de la façade qui sera isolée. Seront isolés la façade vue sur la photo ainsi que le pignon à gauche afin d'avoir un exemple d'angle fermé à isoler. La façade fait environ 13 mètres de large pour 7 mètres de haut, et le pignon fait environ 3.4 mètres de large sur 6 mètres de haut. Elle dispose d'un angle rentrant, de plusieurs fenêtres et d'un acrotère.



Figure 114 : Photo de la façade qui servira de façade démonstratrice une fois isolée avec le système Isolpac

Dans un premier temps la façade a été mesurée. L'ensemble des distances telles que les écartements entre menuiseries, la largeur des ouvertures, la taille de la façade, etc ont été mesurées. Ceci a permis de réaliser un calepinage précis de la façade, afin de prévoir les panneaux à la bonne dimension. Ce calepinage est représenté en 3D Figure 115. La façade a été découpée en rectangles en tenant compte des ouvertures. Chaque rectangle est un panneau Isolpac qui sera fait sur-mesure. Dans cet exemple de façade, tous les panneaux sont de tailles différentes. Ça ne sera pas le cas sur des bâtiments plus classiques qui ont des trames régulières (même écartement entre deux fenêtres, mêmes hauteur d'étages...). Néanmoins, cet exemple extrême est très bon pour nous permettre de voir s'il est effectivement concevable techniquement de prévoir de réaliser des panneaux sur-mesure.

En plus de nous donner le nombre et les tailles de panneaux à réaliser, ce plan de calepinage permet de prévoir le nombre et la dimension des rails, ainsi que les points spécifiques d'accroche à gérer, appelés points singuliers, qui seront discutés dans la partie suivante.

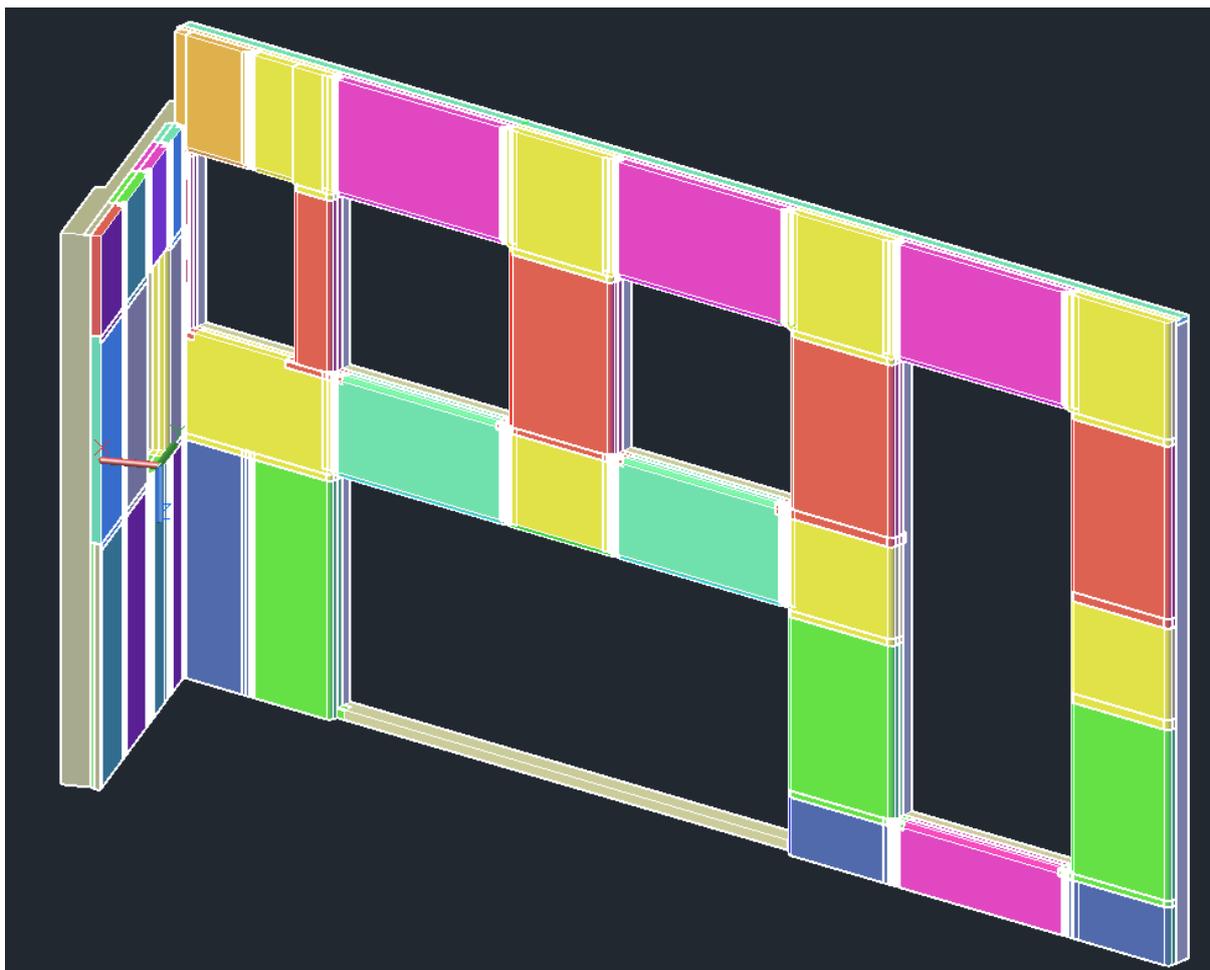


Figure 115 : Représentation 3D du calepinage de la façade démonstratrice

4.6.2.2 Techniques particulières pour les points singuliers de la façade

Nous avons vu précédemment que la façade à isoler comporte un angle rentrant, de multiples menuiseries, ainsi qu'un acrotère. Ces points singuliers nécessitent une attention particulière lors de la conception de la façade. Il convient en effet de trouver une configuration spécifique adaptée à chacun de ces points de détail.

Ces techniques particulières n'ont à ce jour pas encore été conçues, mais elles ont déjà été pensées dans le principe. Elles seront des adaptations des techniques standards. Il s'agit en effet de réadapter le rail standard décrit au 4.5.2 à la situation particulière.

Cas particulier des menuiseries

Pour la fixation verticale, le rail décrit au 4.5.2 pourra être intégré directement à la menuiserie. Il s'agira plus particulièrement d'un demi-rail (un seul jonc a besoin d'être retenu). Ainsi, le jonc peut être fixé directement sur la menuiserie, permettant ainsi l'assemblage entre le panneau et la menuiserie.

Horizontalement, de la même façon, la bande auto-agrippante sera intégrée directement à la menuiserie, permettant là aussi le raccord entre le panneau et la menuiserie.

Cas particulier des acrotères

Au niveau des acrotères, la finition sera très similaire aux techniques d'isolation classiques. Comme représenté sur la Figure 116, le panneau sur la façade est d'abord fixé à l'acrotère en vissant un débord de toile sur la face supérieure de l'acrotère. Un deuxième panneau isolant est fixé par bande auto-agrippante et par débord vissé sur l'acrotère. Enfin, une couvertine sera fixée via une vis étanche traversante. Si le calcul thermique le permet, il est également possible de ne pas isoler la face supérieure de l'acrotère, et de fixer directement la couvertine sur l'élément porteur.

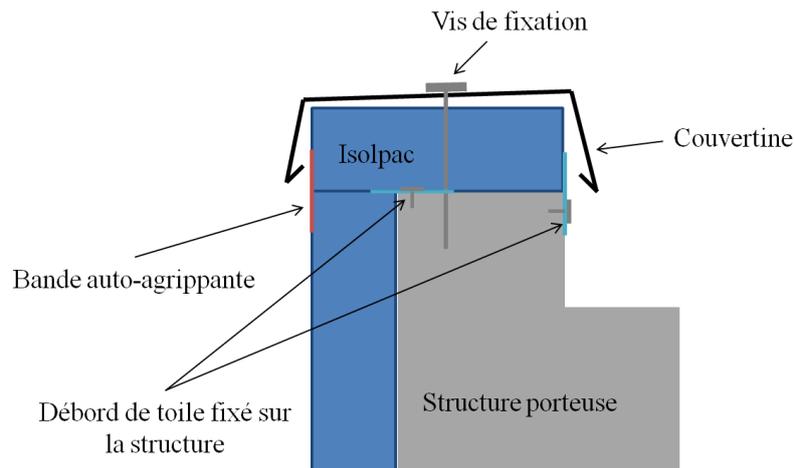


Figure 116 : Schéma des acrotères avec isolation avec le système Isolpac

Cas particulier de l'angle

Dans l'angle, la fixation va se faire de manière très similaire au cas courant : Un rail vertical sera positionné dans l'angle. Au besoin les débords de fixation verticaux seront rallongés afin de pouvoir les visser.

4.6.3 Perspectives

4.6.3.1 Finalisation du nouveau système

Pour s'engager dans la démarche d'avis technique expérimental ainsi que dans l'élaboration de cette façade démonstratrice, il reste encore un certain nombre d'éléments à valider. Ces éléments ont été abordés dans les différents chapitres de cette thèse. Nous allons ici en rappeler un certain nombre.

En premier lieu, c'est la réaction et la résistance au feu qui devront être testées en amont. Comme nous l'avons vu au 3.3 et au 4.3, les contraintes sont fortes et aucune dérogation n'est possible. Le système n'a pas encore à ce jour obtenu les résultats nécessaires pour respecter la réglementation.

En parallèle, il convient de terminer la conception du rail, puis de tester la fixation du système à l'arrachement, afin de s'assurer que l'ensemble du système tient bien mécaniquement et résistera aux charges imposées par le vent, la pluie, la neige...

Par ailleurs, les essais de vieillissement accélérés sur les toiles sont toujours en cours, et devraient permettre de valider la bonne tenue dans le temps des matériaux.

Enfin, les points de détails devront être étudiés et testés un à un, même si une fois le rail complètement élaboré, cette tâche ne sera qu'une réadaptation de la solution courante.

4.6.3.2 Réalisation de la façade démonstratrice

Une fois ces points précédemment cités validés, la construction de la façade démonstratrice pourra être engagée. Cette construction permettra de mettre en pratique la pose du système, et de tester à plus grande échelle la faisabilité, la simplicité et la rapidité de la pose imaginée dans ce projet de recherche. Une équipe de compagnon sera dédiée et l'ensemble des actions de pose seront chronométrées. La chrono-analyse qui résultera de la pose permettra de démontrer si oui ou non la technique de fixation et d'assemblage est pertinente, ainsi que d'estimer un premier coût lié à la pose du système Isolpac.

Un premier retour d'expérience d'application du nouveau système sur un bâtiment pourra être effectué, et servira de base à d'éventuelles corrections du système de pose.

4.6.3.3 Obtention d'un avis technique expérimental

La démarche d'Avis Technique Expérimental sera lancée en parallèle de la pose. L'obtention de cet Atex permettra par la suite de réaliser d'autres démonstrateurs, potentiellement avec des premiers clients, et de valider les choix techniques.

Suite à ces autres démonstrateurs, une demande d'Avis Technique sera lancée, et l'Atex permettra de poursuivre la commercialisation du nouveau système pendant la phase d'instruction de l'Avis Technique. A terme l'Avis Technique devra être obtenu.

4.7 Conclusion du dernier chapitre

L'objectif du dernier chapitre est de présenter les travaux de recherche effectués afin de concevoir une technique de fixation et d'assemblage pour le nouveau système Isolpac, ainsi que les essais in situ réalisés ou à réaliser en vue de l'obtention d'un avis technique du CSTB. Les différentes techniques imaginées et testées in situ à l'échelle 1 pour fixer et assembler le système Isolpac sur un bâtiment ont été présentées. Parmi ces techniques, des fixations par bandes auto-agrippantes, par rails ou encore par vissage de débords de toile ont été expérimentées.

Les essais de pose in situ ont permis de montrer la faisabilité du concept Isolpac et ont permis de valider la technique de fixation par vissage de débords. Le résultat avec cette technique est tout à fait satisfaisant et la pose est rapide. Par ailleurs, les essais in situ ont permis de montrer que la technique d'assemblage des panneaux par bandes auto-agrippantes est efficace. Néanmoins, il est difficile d'assurer verticalement l'étanchéité entre les panneaux. Pour cette

raison, un rail qui fera le lien vertical entre les panneaux et qui permettra la mise en tension des toiles est en cours de développement, et viendra compléter la solution par bandes auto-agrippantes.

Une technique efficace, rapide et pérenne de fixation et d'assemblage a donc été conçue à la fin de cette thèse. Il reste à valider celle-ci par de nouveaux essais in situ, et notamment sur un essai à plus grande échelle par le biais d'une façade démonstratrice. Cette façade permettra d'obtenir un premier avis technique expérimental pour le système Isolpac. Cet avis technique expérimental sera une première étape dans l'obtention d'un avis technique du CSTB, qui autorisera la pose du nouveau système sur un spectre plus large de bâtiments.

Un travail de préparation de ce démonstrateur a été effectué dans le cadre de cette thèse. Pour cela, les points singuliers ont été pensés : fixations sur les menuiseries, sur les acrotères... Et un plan de calepinage a été réalisé.

Enfin, en perspective de ce travail de recherche, une instrumentation de la façade sera réalisée afin de comparer la théorie issue des travaux de caractérisation et de modélisation de cette thèse, et la pratique d'une façade réalisée.

L'aboutissement de ces derniers travaux permettra de finaliser les recherches sur le nouveau système Isolpac.

Conclusion Générale

La prise de conscience des enjeux environnementaux et énergétiques, les nouvelles réglementations en faveur d'un développement plus durable et le positionnement des collectivités conduisent les chercheurs à trouver de nouvelles solutions afin de réduire les consommations et les émissions de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment est l'une des cibles prioritaires pour économiser l'énergie. Il y a en effet un gros potentiel d'économies puisque les réglementations thermiques sont relativement récentes (la première étant apparue en 1975) et donc de nombreuses améliorations peuvent être effectuées dans les bâtiments anciens. De plus, l'arrivée de la RT2012 qui fait du bâtiment basse consommation la norme, va imposer aux nouveaux bâtiments davantage économes en énergie.

Afin de réhabiliter un bâtiment « passoire énergétique » ou de construire un bâtiment basse consommation, l'une des premières actions à réaliser est de bien isoler le bâti. Un bâtiment bien isolé voit en effet ses consommations diminuer fortement, est plus confortable pour l'occupant, et permet d'utiliser des systèmes de production de chaleur plus économes en énergie. Parmi les solutions pour isoler un bâtiment, la plus performante d'un point de vue thermique est l'isolation par l'extérieur. Cependant, cette technique est encore peu répandue en France, et est encore trop coûteuse principalement à cause du coût de pose du système, souvent long et complexe à mettre en œuvre.

C'est pourquoi l'entreprise Norpac, filiale de Bouygues Construction, a imaginé un système d'isolation basé sur l'idée d'un manteau pour le bâtiment. Associé à trois industriels du textile, PEG, Dickson Constant et BHD, à l'Ecole Centrale de Lille et au réseau CLUBTEX, Norpac a lancé un programme de recherche afin de développer le système.

C'est dans ce cadre que ma thèse a été initiée. Elle vise à développer un nouveau système d'isolation par l'extérieur à base de matériaux textiles. Le système comporte un panneau sandwich composé de deux toiles textiles et d'un isolant en ouate de polyester ainsi qu'une nouvelle technique de fixation et d'assemblage des panneaux sur le bâtiment.

Mon rôle a été de coordonner l'ensemble des recherches des différents intervenants pour s'assurer de la cohérence de celles-ci. Par ailleurs, j'ai réalisé une partie des essais et analysé et interprété l'ensemble des résultats, accompagnée des chercheurs de l'Ecole Centrale de Lille, afin de guider les équipes de recherche. Quand cela était nécessaire, j'ai mis en place de nouveaux protocoles d'essai adaptés aux matériaux considérés.

Les axes de recherche sont nombreux et pluridisciplinaires. Les sujets sont tout d'abord thermiques, puisqu'il convient d'améliorer les performances d'isolation thermique du système. Ils sont également hygrothermiques, puisqu'il convient de montrer que le complexe respecte l'équilibre hygrothermique du bâtiment. En effet, des flux de vapeur d'eau circulent dans les parois. Si ce flux se retrouve bloqué dans l'isolant, un phénomène de condensation peut se produire. Celui-ci est impérativement à éviter car la condensation diminuerait fortement le pouvoir isolant du complexe. Enfin, les sujets sont également mécaniques et chimiques car il faut s'assurer que le système résiste aux conditions extérieures, c'est-à-dire à la pluie, au vent, à la neige, au gel, aux UV... Pour cela, des essais mécaniques, d'agressions chimiques et des essais de vieillissement accéléré ont été réalisés sur des panneaux.

Un premier travail a été d'étudier et de développer les matériaux pouvant être utilisés pour composer le panneau Isolpac, et de les caractériser. Ces matériaux sont de deux types : d'une part un isolant, et d'autre part deux toiles différentes.

L'isolant développé pour le système Isolpac est un isolant en ouate de polyester, issu à plus de 50% du recyclage de bouteilles d'eau. L'isolant est assemblé mécaniquement et thermiquement, sans liant chimique spécifique.

Une caractérisation hygrothermique de l'isolant ainsi que d'autres isolants du marché a été effectuée. Elle a mis en évidence le bon comportement de l'isolant vis-à-vis de l'humidité ainsi que ses performances thermiques. Cette caractérisation complète nous a permis par la suite d'utiliser les propriétés déterminées dans des simulations hygrothermiques dynamiques afin de prédire le comportement de l'isolant au sein d'une paroi isolée avec le système Isolpac.

11 toiles ont également été caractérisées afin de définir si parmi celles-ci il pouvait être trouvée une toile extérieure ainsi qu'une toile intérieure pour le nouveau système. La caractérisation a porté sur le comportement mécanique des toiles, mais également sur leur capacité à être étanche à l'eau, et à la vapeur d'eau à l'aide d'outils spécifiquement dédiés à la thèse.

Parmi ces 11 toiles, aucune n'a pu être sélectionnée pour servir de toile extérieure dans le système Isolpac. Une 12^{ème} toile a donc été spécifiquement développée dans le cadre de cette thèse. Cette nouvelle toile, permet de répondre aux besoins mécaniques, d'étanchéité à l'eau liquide et de perméabilité à la vapeur d'eau que demande la toile extérieure.

En revanche, la toile intérieure a pu être sélectionnée parmi ces 11 toiles du marché, puisque la caractérisation a mis en valeur plusieurs toiles à la fois résistantes mécaniquement, mais aussi étanche aussi bien à l'eau qu'à la vapeur d'eau.

Par ailleurs, des essais de vieillissement accélérés ont été effectués afin de pouvoir prédire le vieillissement des toiles dans le temps. Deux essais ont été effectués : un essai normé d'une part, et un essai au laboratoire réalisé avec un protocole que nous avons spécifiquement élaboré durant la thèse. Ces essais, s'ils ne sont pas terminés, nous permettent de comprendre le vieillissement de ces matériaux et d'envisager un bon comportement sur à minima une dizaine d'années.

L'ensemble des matériaux composants le panneau ont ainsi été sélectionnés et caractérisés. Ce travail important était nécessaire au projet de recherche et a constitué un préalable au travail à effectuer sur le système Isolpac dans son ensemble. Il a permis de connaître et de sélectionner des matériaux qui répondent indépendamment les uns des autres à leur cahier des charges. Nous avons ensuite travaillé sur l'assemblage de ces matériaux et à la caractérisation du panneau dans son ensemble afin de prouver son bon comportement.

Un travail important, non décrit dans cette thèse pour raisons de confidentialité a été effectué pour assembler les différents matériaux qui composent le panneau. Il est assemblé par soudures Hautes Fréquences, ce qui lui garantit un assemblage sain, pérenne et résistant.

Il a été montré que des risques importants de condensation des flux de vapeur d'eau dans les parois du bâtiment existent, et que cette condensation est néfaste pour la pérennité du bâti et pour la performance thermique des isolants. Il a par conséquent été jugé nécessaire de pouvoir prédire le comportement et l'influence du panneau Isolpac sur le fonctionnement hygrothermique d'une paroi de bâtiment. Ainsi, j'ai été formée à l'utilisation du logiciel Wufi afin de pouvoir réaliser une simulation hygrothermique dynamique à partir des données disponibles sur les matériaux suite à la caractérisation effectuée au chapitre 2. Cette modélisation a montré que, dans une configuration classique plutôt défavorable, le panneau se comportait bien : il n'y avait pas de condensation dans la paroi, l'isolant n'était jamais surchargé en eau, et le béton frais parvenait à sécher rapidement.

Par ailleurs, des essais de réaction au feu ont été effectués sur le panneau. Ces essais ont montré le comportement atypique des matériaux composant le panneau qui fondent face à une flamme. Les essais n'ont pas donné de résultats suffisants pour que la pose du nouveau

système soit autorisée sur la plupart des bâtiments, mais des perspectives d'améliorations ont été données. Ces pistes seront explorées après la thèse.

Des essais mécaniques complémentaires tels que des essais de résistance à la pénétration et aux chocs ont été identifiés. Ils restent à être effectués sur le panneau. Un travail d'adaptation de ces essais devra avoir lieu au préalable.

Enfin, nous avons présenté les travaux de recherche effectués afin de concevoir une technique de fixation et d'assemblage pour le nouveau système Isolpac, ainsi que les essais in situ réalisés ou à réaliser en vue de l'obtention d'un avis technique du CSTB.

Les différentes techniques imaginées et testées in situ à l'échelle 1 pour fixer et assembler le système Isolpac sur un bâtiment ont été présentées. Parmi ces techniques, des fixations par bandes auto-agrippantes, par rails ou encore par vissage de débords de toile ont été expérimentées.

Les essais de pose in situ ont permis de montrer la faisabilité du concept Isolpac et ont permis de valider la technique de fixation par vissage de débords. Le résultat avec cette technique est tout à fait satisfaisant et la pose est rapide. Par ailleurs, les essais in situ ont permis de montrer que la technique d'assemblage des panneaux par bandes auto-agrippantes est efficace. Néanmoins, il est difficile d'assurer verticalement l'étanchéité entre les panneaux. Pour cette raison, un rail qui fera le lien vertical entre les panneaux et qui permettra la mise en tension des toiles est en cours de développement, et viendra compléter la solution par bandes auto-agrippantes.

Une technique efficace, rapide et pérenne de fixation et d'assemblage a donc été conçue à la fin de cette thèse. Il reste à valider celle-ci par de nouveaux essais in situ, et notamment sur un essai à plus grande échelle par le biais d'une façade démonstratrice. Cette façade permettra d'obtenir un premier avis technique expérimental pour le système Isolpac. Cet avis technique expérimental sera une première étape dans l'obtention d'un avis technique du CSTB, qui autorisera la pose du nouveau système sur un spectre plus large de bâtiments.

Un travail de préparation de ce démonstrateur a été effectué dans le cadre de cette thèse. Pour cela, les points singuliers ont été pensés : fixations sur les menuiseries, sur les acrotères... Et un plan de calepinage a été réalisé.

Enfin, en perspective de ce travail de recherche, une instrumentation de la façade sera réalisée afin de comparer la théorie issue des travaux de caractérisation et de modélisation de cette thèse, et la pratique d'une façade réalisée.

L'aboutissement de ces derniers travaux permettra de finaliser les recherches sur le nouveau système Isolpac.

Références bibliographiques

- Abdou A., Budaiwi I. 2013.** The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 43, 533-544.
- Achchaq F., Djellab K., Beji H. 2009.** Hydric, morphological and thermo-physical characterization of glass wools : From macroscopic to microscopic approach. s.l. : Construction and Building Materials, 2009. Vol. 23. 3214-3219.
- AFNOR. Septembre 2007.** Classement au feu des produits et éléments de construction. Partie 1 : Classement à partir des données d'essais de réaction au feu. Septembre 2007. NF EN 13501-1.
- **Novembre 2002.** Essais de réaction au feu des produits de construction. Détermination de la chaleur de combustion. Novembre 2002. NF EN ISO 1716. P 92-521.
- **Avril 2002.** Essais de réaction au feu des produits de construction. Essai d'incombustibilité. Avril 2002. NF EN ISO 1182. P 92-520.
- **Décembre 2002.** Essais de réaction au feu des produits de construction. Produits de construction à l'exclusion des revêtements de sol exposés à une sollicitation thermique provoquée par un objet isolé en feu. Décembre 2002. NF EN 13823. P 92-527.
- **Novembre 2002.** Essais de réaction au feu. Allumabilité des produits de bâtiment soumis à l'incidence directe de la flamme. Partie 2 : Essai à l'aide d'une source à flamme unique. Novembre 2002. NF EN ISO 11925-2. P 92-522.
- **janvier 2005.** Feuilles d'étanchéité de toiture bitumineuses, plastiques et élastomères Méthode de vieillissement artificiel par exposition combinée de longue durée aux rayonnements UV, à la température élevée et à l'eau. janvier 2005. NF EN 1297. P 84-106.
- **Décembre 1999.** Feuilles souples d'étanchéité Partie 1 : Feuilles d'étanchéité de toiture bitumineuses - Détermination de la résistance à la déchirure (au clou). Décembre 1999. NF EN 12310-1. P 84-123-1.
- **Avril 2001.** Feuilles souples d'étanchéité. Feuilles d'étanchéité de toiture bitumineuses, plastiques et élastomères - Méthode de vieillissement artificiel par exposition de longue durée à température élevée. Avril 2001. NF EN 1296. P 84-105.
- **Juillet 2000.** Feuilles souples d'étanchéité. Feuilles d'étanchéité de toiture bitumineuses, plastiques et élastomères. Détermination de l'étanchéité à l'eau. Juillet 2000. NF EN 1928. P 84-118.
- **Aout 1991.** isolation thermique - détermination de la résistance thermique et des propriétés connexes en régime stationnaire - méthode de la plaque chaude gardée. Aout 1991. NF EN ISO 8302.
- **Décembre 1999.** NF EN 12311-1, Feuilles souples d'étanchéité Partie 1 : Feuilles d'étanchéité de toiture bitumineuses - Détermination des propriétés en traction. Décembre 1999. P 84-124-1.
- **Avril 2008.** Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments. Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique. Avril 2008. NF EN 15026. P 50-778.
- **Octobre 2000.** Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique. Octobre 2000. NF EN ISO 12571.
- **Octobre 2003.** Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle. Octobre 2003. NF EN ISO 15148.
- **Octobre 2001.** Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment. détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. Octobre 2001. NF EN ISO 12572. P 50-763.

- . **Mai 2006.** Plastiques, Méthodes d'exposition à des sources lumineuses de laboratoire - Partie 2 : Lampes à arc au xénon. Mai 2006. NF EN ISO 4892-2. T 51-195-2.
- . **Juillet 1997.** Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment - Détermination de la masse volumique apparente. Juillet 1997. NF EN 1602.
- . **Novembre 1997.** Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment – Détermination de l'absorption d'eau à long terme - Essai par immersion. Novembre 1997. NF EN 12087.
- . **Novembre 1997.** Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. Novembre 1997. NF EN 12086.
- . **Février 2003.** Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment. Détermination de la résistance à la pénétration des systèmes composites d'isolation thermique par l'extérieur (systèmes I.T.E.). Février 2003. NF EN 13498.
- . **Février 2003.** Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment. Détermination de la résistance à l'arrachement des systèmes composites d'isolation thermique par l'extérieur (systèmes I.T.E) (essai au bloc de mousse). Février 2003. NF EN 13495.
- . **Février 2003.** Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment. Détermination de la résistance au choc des systèmes composites d'isolation thermique par l'extérieur (systèmes I.T.E). Février 2003. NF EN 13497.
- . **Août 2002.** Produits isolants thermiques pour le bâtiment - Produits manufacturés en laine minérale (MW) – Spécification. Août 2002. NF EN 13162.
- . **Août 2002.** Produits isolants thermiques pour le bâtiment - Produits manufacturés en polystyrène expansé (EPS) – Spécification. Août 2002. NF EN 13163.
- . **Décembre 1995.** Sécurité contre l'incendie. Bâtiment - Essais de réaction au feu des matériaux. Essai au brûleur électrique applicable aux matériaux souples. Décembre 1995. NF P 92-503.
- . **Février 2004.** Sécurité contre l'incendie. Bâtiment - Matériaux d'aménagement. Classement selon leur réaction au feu. Février 2004. NF P 92-507.
- Apparu B., Borloo J-L. 2010.** *Les avancées du Plan Bâtiment du Grenelle de L'Environnement.* 2010.
- 1989.** Arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation - version consolidée du 05 janvier 1989. 1989.
- Association Internationale de Recherche et d'Essai dans le domaine de l'écologie des textiles. 2011.** Oeko-Tex Standard 100. Conditions générales et spéciales. Zürich : s.n., 2011.
- B.B.S Slam - service technique. 31 janvier 2011.** La méthode Glaser : Calcul de la condensation dans les parois. s.l. : CW2005 - Les catalogues thermiques, 31 janvier 2011.
- Bartolomeo P. mars-avril 2003.** Vers une prévision de la durée de vie des polymères géosynthétiques Principes de base – État de l'art. *Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées* 243. mars-avril 2003. Vol. RÉF. 4456. 47-69.
- Belan F., Bellenger V., Mortaigne B., Verdu J., Yang Y.S. 1996.** Hydrolytic stability of unsaturated polyester prepolymers. *Composite Science and Technology.* 1996. 56. 733-737.
- Biger, Ferrari, Krimm, Chaffotec, Queffelec, Quost, Seguin. 2007.** Recommandations pour la conception des ouvrages permanents de couverture textile Partie I. 2007.
- Briga-Sá A., Nascimento D., Teixeira N., Pinto J., Caldeira F., Varum H., Paiva A. 2013.** Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. *Construction and Building Materials.* 2013. 155-160.
- Burge H.A. 2009.** Moisture, Organisms, and Health Effects. s.l. : ASTM, 2009. MNL18-EB.
- Cammalleri V., Lagus P.L. Octobre 2009.** Measurement Techniques and Instrumentation. s.l. : ASTM, Octobre 2009. MNL 18-EB.

- Caramaro L. 2006.** Textiles à usage technique. s.l. : Techniques de l'Ingénieur, 2006. Vol. AM 5 119.
- Carlac'h D., Hémerly Y. 8 mars 2006.** *Etude sur les textiles techniques, rapport de synthèse.* s.l. : DGE, 8 mars 2006.
- Chami N. 19 octobre 2009.** Thèse. Evaluation de l'impact des isolants minces réfléchissants dans le bâtiment. 19 octobre 2009.
- Cheng X., Fan J. 2004.** Simulation of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation. *International Journal of Thermal Science.* 2004. Vol. 43, 665-676.
- Chessa M. 2009.** Prix d'architecture pour deux Zénith. *L'actualité du BTP et de la construction - Lemoniteur.fr.* [En ligne] 26 mai 2009. [Citation : 03 mai 2014.] <http://www.lemoniteur.fr/159-culture/article/actualite/618596-prix-d-architecture-pour-deux-zenith>.
- Choquart M. décembre 2009.** Etude de marché bardage et isolation par l'extérieur. s.l. : Document interne à l'entreprise Norpac, décembre 2009.
- Collet F., Achchaq F., Djellab K., Marmoret L., Beji H. 2011.** Water vapor properties of two hemp wools manufactured with different treatments. *Construction and Building Materials.* 2011. Vol. 25. 1079-1085.
- Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement. 3-14 juin 1992.** Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement. 3-14 juin 1992.
- Conseil de l'Union Européenne. 8-9 mars 2007.** Conseil Européen de Bruxelles. 8-9 mars 2007.
- Contamine R., Si Larbi A., Hamelin P. January 2013.** Identifying the contributing mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) in the case of shear repairing damaged and reinforced concrete beams. *Engineering Structures.* January 2013. Vol. 46. 447-458.
- Coste G. 2004.** Les non-tissés. *CERIG.* [En ligne] 25 juin 2004. [Citation : 18 juillet 2011.] <http://cerig.efpg.inpg.fr/tutoriel/non-tisse/sommaire.htm>.
- . 2004. Les non-tissés : cours, tutoriel. [En ligne] 2004. [Citation : 3 mai 2014.] <http://cerig.efpg.inpg.fr/tutoriel/non-tisse/sommaire.htm>.
- CSTB. Avis Technique - CSTB évaluation. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment : Site institutionnel.** [En ligne] [Citation : 26 mars 2014.] <http://evaluation.cstb.fr/avis-technique/>.
- . février 2009. Règles NV 65. Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes. février 2009.
- CSTC. 2006.** Performance thermiques initiales de produits minces réfléchissants. 2006. Rapport CSTC n° 9.
- D., Wyart. 2008.** Polystyrène expansé ou PSE. *Techniques de l'ingénieur.* 2008. AM3341.
- Dahan P. 2009.** Pathologie de l'humidité – Parois revêtues en bâtiment – Etude d'un cas concret. *Techniques de l'Ingénieur.* 2009. C 7 146.
- Datye K.V., Palan B.H. 1989.** Effect of alkali on filaments of poly(ethylene terephthalate) and its copolyesters. *Journal of Applied Polymer Science.* 1989. Vol. 38, 8. 1447-1468.
- Deglise X., Donnot A. 2004.** Bois énergie. *Techniques de l'ingénieur.* 2004. BE 8535.
- Doll W.W., Goodrum R., Sprague C.J. 1995.** Alkaline Hydrolysis Testing of polyester To-Date. *Geosynthetics '95.* 1995. 975-988.
- Dominguez-Munoz F., Anderson B., Cedujo-Lopez J.M., Carrillo-Andrés A. 2010.** Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. s.l. : Energy and Buildings, 2010. Vol. 42. 2159-2168.
- Domínguez-Munoz F., Anderson B., Cejudo-López J., Carrillo-Andrés A.** Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. *Energy and Buildings.* Vol. 42, 2149-2158.

- Elias V., Salman A., Goulias D. 1998.** The Effect of pH, Resin Properties, and Manufacturing Process on Laboratory Degradation of Polyester Geosynthetics. *Geosynthetics International*. 1998. Vol. 5, 5. 459-490.
- juillet 2003.** Eurocode 1 : Actions sur les structures. Partie 1-2 : Actions générales — Actions sur les structures exposées au feu. juillet 2003. NF EN 1991-1-2. P 06-112-1.
- Fan J., Cheng X. Chen Y.S. 2003.** An experimental investigation of moisture absorption and condensation in fibrous insulations under low temperature. s.l. : Experimental Thermal and Fluid Science, 2003. Vol. 27, 723-729.
- Fan J., Cheng X., Wen X., Sun W. 2004.** An improved model of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation and comparison with experimental results. s.l. : International Journal of Heat and Mass Transfert, 2004. Vol. 47, 2343-2352.
- Fan J., Wen X. 2002.** Modeling heat and moisture transfer through fibrous insulation with phase change and mobile condensates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002. Vol. 45. 4045-4055.
- Octobre 2000.** Feuilles souples d'étanchéité. Feuilles d'étanchéité de toiture bitumineuses, plastiques et élastomères. Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. Octobre 2000. NF EN 1931. P 84-119.
- Gegidanni J-F., Chessa M., Miguet L., Bourguet V. 14 décembre 2007.** Construction Textile, l'architecture tisse sa toile. *Le moniteur*. 14 décembre 2007.
- Gijsman P., Meijers G., Vitarelli G. 1999.** Comparison of the UV-degradation chemistry of polypropylene, polyethylene, polyamide 6 and polybutylene terephthalate. *Polymer Degradation and Stability*. 1999. Vol. 65. 433-441.
- Grancaric A.M., Kallay N. 1993.** Kinetics of Polyester Fiber Alkaline Hydrolysis : Effect of Temperature and Cationic Surfactants. *Journal of Applied Polymer Science*. 1993. Vol. 49, 1. 175-181.
- Grenelle 1. 2009.** LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1). 2009.
- Grenelle 2. 2010.** LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (1). 2010.
- Haghighat Kish M., Nouri M. 1999.** Effects of sodium hydroxide and calcium hydroxide on polyester fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*. 1999. Vol. 72, 5. 631-637.
- Halse Y., Koerner R.M., Lord A.E. Jr. 1999.** Effect of High Alkalinity Levels on Geotextiles - Part II NaOH Solutions. *Geotextiles and Geomembranes*. 1999. Vol. 6, 4. 295-305.
- 2010.** Instruction Technique 249 relative aux façades. *Documentation Batiss - Instruction 249*. 2010.
- Jelle B.P. 2011.** Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, 2549–2563.
- Jerman M., Cerny R. 2012.** Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 53. 39–46.
- Jerman M., Keppert M., Vyborny J., Cerny R. 2011.** Moisture and heat transport and storage characteristics of two commercial autoclaved aerated concretes, Cement, Wapno, Beton. 2011. Vol. 16/78. 18–29.
- Johannesson B., Janz M. 2009.** A two-phase moisture transport model accounting for sorption hysteresis in layered porous building constructions. *Building and Environment*. 2009. Vol. 44, 1285-1294.

- Karamanos A., Hاديarakou S., Papadopoulos A.M. 2008.** The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool. s.l. : Energy and Buildings, 2008. Vol. 40. 1402-1411.
- Kossecka E., Kosny J. 2002.** Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building. s.l. : Energy and Building, 2002. Vol. 34, 321-331.
- Krus M. 10-11 September 1998.** Hygrothermal Calculations applied to water-repellent surfaces – Validation and Application. *Second International Conference on Surface Technology with Water Repellent Agents*. ETH Zürich : s.n., 10-11 September 1998. S. 169-176.
- , **1996.** Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods. *Fraunhofer IRB Verlag*. 1996.
- Kumaran M.K. 2009.** Fundamentals of Transport and Storage of Moisture in Building Materials and Components. s.l. : ASTM, 2009. MNL18-EB.
- Künzel H.M. 2005.** Adapted vapour control for durable building enclosure. *10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*. 2005.
- , **September 2000.** Moisture risk assessments of roof construction by computer simulation in comparison to the standard Glaser-method. *International Building Physics Conference*. Eindhoven : s.n., September 2000.
- , **1995.** Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. - One- and two-dimensional calculation using simple parameters. *IRB Verlag*. 1995.
- La Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne. 19 mai 2010.** Directive 2010/31/UE du parlement européen et du conseil sur la performance énergétique des bâtiments. 19 mai 19 mai 2010.
- Langlais C., Klarsfeld S. 2004.** Isolation thermique à température ambiante. Applications. s.l. : Techniques de l'Ingénieur, 2004. BE 9 861.
- , **2004.** Isolation thermique à température ambiante. Isolants. s.l. : Techniques de l'Ingénieur, 2004. Vol. BE 9 858.
- , **2004.** Isolation thermique à température ambiante. Propriétés. s.l. : Techniques de l'Ingénieur, 2004. Vol. BE 9 860.
- , **2004.** Isolation thermique à température ambiante. Transferts de chaleur. s.l. : Techniques de l'Ingénieur, 2004. Vol. BE 9 859.
- Langlais C., Klarsfeld S., 2004.** Isolation thermique à température ambiante. Transferts de chaleur. *Techniques de l'Ingénieur*. 2004. Vol. BE 9 859.
- Le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne. 16 décembre 2002.** Directive 2002/91/CE du Parlement Européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments. 16 décembre 2002.
- LE RELAIS France. Métisse, l'isolation durable.** [En ligne] [Citation : 3 mai 2014.] <http://www.isolantmetisse.com/>.
- LOI N°78-12. 1978.** Loi n°78-12 du 4 janvier 1978 relative à la responsabilité et à l'assurance dans le domaine de la construction. 1978.
- Lstiburek J. 2009.** Moisture Control for New Residential Buildings. *ASTM*. 2009. MNL18-EB.
- Mathur A., Netravali A.N., O'Rourke T.D. 1994.** Chemical aging effects on the physio-mechanical properties of polyester and polypropylene geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*. 1994. Vol. 13, 9. 591-626.
- Mathur A., Netravali A.N., O'Rourke T.D.** Chemical aging effects on the physio-mechanical properties of polyester and polypropylene geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*.
- Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer. 27 octobre 2010.** Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de

performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments. 27 octobre 2010. DEVU1026270A.

Miquel G. 2002-2003. Rapport 'la qualité de l'eau et de l'assainissement en France' de l'OPECST. 2002-2003. 215.

Oliva J-P., Courgey S. 2010. L'isolation thermique écologique. s.l. : Terre vivante, 2010. ISBN 978-2-914717-88-5.

Papadopoulos A.M, Giama E. 2007. Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building. s.l. : Building and Environment, 2007. Vol. 42. 2178-2187.

Papadopoulos A.M. 2005. State of the art in thermal insulation materials and aims for future development. *Energy and Buildings*. 2005. Vol. 37. 77-86.

Pavlik Z., Cerny R. 2008. Experimental assessment of hygrothermal performance of an interior thermal insulation system using a laboratory technique simulating on-site conditions. *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40, 673-678.

—. **2009.** Hygrothermal performance study of an innovative interior thermal insulation system. *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29, 1941-1946.

Pavlík Z., Fiala L., Vejmelková E., Cerny R. 2012. Application of effective media theory for determination of thermal properties of hollow bricks as a function of moisture content. *International Journal of Thermophysics*. 2012. Vol. 34. 894-908.

Penot F., Chami N. , Farkh S. 2007. Résistance thermique des parois intégrant des produits minces réfléchissants. 2007.

Pérez J.M., Vilas J.L., Laza J.M., Arnaiz S., Mijangos F., Bilbao E., Rodriguez M., Leon L.M. 2010. Effect of reprocessing and accelerated ageing on thermal and mechanical polycarbonate properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. 727-733.

Qin M., Walton G., Belarbi R., Allard F. 2011. Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. 1470-1478.

Quentin J-P. 2004. PET ou polyéthylènetéréphtalate. *Techniques de l'ingénieur*. 2004. Doc J 6 488.

Rahman M. 2012. Degradation of Polyesters in Medical Applications. 2012. 5. 100-32.

Rahman M., Alfaro M. 2004. Degradation of polyester geotextiles in alkaline solutions under applied loading. *57TH Canadian geotechnical conference, 5TH Joint CGS/IAH-CNC Conference*. 2004. 34-39.

Rawal A., Shah T., Anand S. 2010. Geotextiles: production, properties and performance. *Textile Progress*. 2010. Vol. 42:3. 181-226.

Rhônealénergie Environnement, ADEME. avril 2010. Maîtrise des transferts d'humidité dans les parois. *Guide à l'attention des maîtres d'ouvrage*. avril 2010.

Saleh A. 2006. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 26, 2184-2191.

Sandberg I. 2009. Effect of Moisture on the Thermal Performance of Insulation materials. *ASTM*. 2009. MNL18-EB.

Santos D., Costa M.R., Santos M.T. 2007. Performance of polyester and modified polyester coil coatings exposed in different environments with high UV radiation. *Progress in Organic Coating*. 2007. Vol. 58, 296-302.

Shen L., Worrell E., Patel M.K. 2010. Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 2010. Vol. 55, 34-52.

Stazi F., Di Perna C., Munafò P. juillet 2009. Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations. *Energy and Buildings*. juillet 2009. Vol. 41, 721-731.

- Toman J., Vimmrova A., Cerny R. 2009.** Long-term on-site assessment of hygrothermal performance of interior thermal insulation system without water vapour barrier. *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. 51-55.
- Vejmelková E., Keppert M., Kersner Z., Rovnaníková P., Cerny R. 2012.** Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 31. 22-28.
- Vincent-Fourrier M. 2006.** Construire Sain et Naturel. Rennes : Edition Ouest-France, 2006.
- Vouyovitch Van Schoors L. 2007.** Vieillissement hydrolytique des géotextiles polyester (polyéthylène téréphtalate) - État de l'art. *BLPC n°270-271*. 2007. 133-54.
- Vouyovitch Van Schoors L., Lavaud S., Duragrin D., Barberis N. 2009.** Durabilité des géotextiles polyester en milieu modérément alcalin. *Rencontres géosynthétiques*. 2009. 201-07.
- Vouyovitch Van Schoors L., Lavaud S., Duragrin D., Barberis N., Benneton J-P.** Etude multi-échelles du vieillissement de polymères utilisés en génie civil : Les géotextiles polyester. *MATERIAUX 2006 13-17 Novembre 2006 – Dijon, France*.
- Vrana T., Bjork F. 2009.** Frost formation and condensation in stone-wool insulations. *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. 1775-1787.
- Vrana T., Gudmundsson K. 2010.** Comparison of fibrous insulations – Cellulose and stone wool in terms of moisture properties resulting from condensation and ice formation. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. 1151-1157.
- Wallner G.M., Lang R.W. 2005.** Aging of polymeric films for transparent insulation wall applications. *Solar Energy*. 2005. Vol. 79, 603-611.
- Wignacourt A. novembre 2006.** Isolation, principes et grandes lignes directrices. s.l. : Cd2e, novembre 2006.
- Wirbel L., Lafhaj Z., Garcin A. 2012.** Designing of a New External Building Insulation System Regarding its Hygrothermal Behavior. *2nd International High Performance Buildings Conference, Purdue, USA, July 16th-19th*. 2012.
- World Comission on Environment and Development. 4 août 1987.** Our Common Future. 4 août 1987.
- Wyart D. 2008.** Polystyrène expansé ou PSE. *Techniques de l'ingénieur*. 2008. AM3341.
- Wyrwal J., Marynowicz A. 2002.** Vapour condensation and moisture accumulation in porous building wall. *Building and Environment*. 2002. Vol. 37. 313-318.
- Zirkelbach D., Holm A., Künzel H.M. 2005.** Influence of Temperature and relative humidity on the durability of mineral wool in ETICS. *10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*. 2005.

RESUME

« Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment »

En France, Le secteur du bâtiment représente 40% de la consommation énergétique et 25% des émissions de CO₂. Afin de réduire ces impacts, une nouvelle Réglementation Thermique 2012, est rentrée en application. Dans ce contexte, l'Ecole Centrale de Lille et l'entreprise Norpac ont choisi d'engager une thèse CIFRE dans le but de développer un nouveau système d'isolation thermique par l'extérieur pour le bâtiment. Le choix s'est porté sur l'utilisation de matériaux textiles pour composer ce système appelé « Isolpac », en partenariat avec les entreprises Dickson, PEG, et l'association CLUBTEX.

Les travaux de recherche ont d'abord été consacrés à la caractérisation hygrothermique, mécanique et chimique des différents matériaux qui composent le nouveau panneau d'isolation afin de définir leur propriétés intrinsèques, de les comparer avec des matériaux classiques, et de pouvoir valider leur choix pour le nouveau système. Deux méthodes d'essais de vieillissement accéléré ont été appliquées aux toiles.

Ensuite, un intérêt particulier a été porté sur l'équilibre hygrothermique du panneau, à travers une simulation dynamique sur le logiciel Wufi® réalisée suite à la caractérisation préalable. En outre, la réaction au feu des panneaux et des perspectives d'essais pour garantir les performances mécaniques ont été étudiées.

Enfin, la recherche de techniques de fixation et d'assemblage des panneaux est présentée. Des essais de pose in situ à l'échelle 1 ont été réalisés. Les perspectives d'essais liés à la résistance mécaniques et au feu du système sont présentées. Un projet de façade démonstratrice est décrit afin d'être le support d'une demande d'avis technique expérimental du CSTB.

Mots clefs : Isolation, Hygrothermie, Textiles Techniques, Isolation par l'extérieur, Bâtiment, Diffusion, Durabilité, Réaction au feu

ABSTRACT

“Designing of a new external insulation system for buildings”

In France, the building industry represents 40% of the total energy consumption and 25% of the total carbon dioxide emissions. In the objective of decreasing those impacts, a new thermal regulation called “Réglementation Thermique 2012” (RT2012), has been applied. In that context, the Ecole Centrale de Lille and the company Norpac, have chosen to engage a CIFRE thesis in order to develop a new external thermal insulation system for buildings. It was chosen to use textile materials to compose that system called “Isolpac”, in partnership with Dickson, PEG and the CLUBTEX association.

At first, the research work was devoted to the hygrothermal, mechanical and chemical characterisation of the different materials composing the new insulation panel, to define the intrinsic properties of different materials, to compare them with conventional materials, in order to validate the choice of materials for the new insulation system. Two accelerated ageing methods were applied on the fabrics.

Then, a particular interest is focused on the hygrothermal equilibrium of the panel by using a dynamic simulation on the software Wufi® following the previous characterization. Moreover, a work on the fire reaction of the panel and on the perspectives of other tests needed to guarantee the mechanical strength was carried out.

Finally, the search of fixation and assembling techniques for the panels is presented. Installation in situ at scale one were made. The perspectives of tests for qualifying the mechanical strength and the fire resistance are described. A project of a demonstrating façade is presented to be the support for a demand of an Experimental Technical Agreement of the CSTB.

Keywords : Insulation, Hygrothermal, Technical Textiles, External Thermal Insulation, Building, Diffusion, Durability, Fire reaction