



HAL
open science

Optimisation fiabiliste des performances énergétiques des bâtiments

Amina Aïssani

► **To cite this version:**

Amina Aïssani. Optimisation fiabiliste des performances énergétiques des bâtiments. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français. NNT : 2016CLF22677 . tel-01344610

HAL Id: tel-01344610

<https://theses.hal.science/tel-01344610>

Submitted on 12 Jul 2016

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 : D.U. 2677

EDSPIC : 746

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL - CLERMONT FERRAND II

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

Thèse

Présentée par

Amina AÏSSANI

Ingénieur de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

SPÉCIALITÉ : Matériaux, Structures, Fiabilité

OPTIMISATION FIABILISTE DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES BATIMENTS

soutenue publiquement le **14 Mars 2016** devant le jury :

Président :	Pr. Jean-Jacques ROUX	INSA de Lyon
Rapporteurs :	Pr. Franck SCHOEFS	Université de Nantes
	Pr. Monika WOLOSZYN	Université de Savoie
Directeur de thèse :	Pr. Alaa CHATEAUNEUF	Université Blaise Pascal
Co-Directeurs de thèse :	Pr. Jean-Pierre FONTAINE	Université Blaise Pascal
	MC. Philippe AUDEBERT	Université Blaise Pascal -IUT Montluçon.

The revolutionary idea that defines the boundary between modern times and the past is the mystery of risk : the notion that the future is more than a whim of the gods and that men and women are not passive before nature. Until human beings discovered a way across that boundary, the future was a mirror of the past or the murky domain of oracles and soothsayers who held a monopoly over knowledge of anticipated events.

PETER L. BERNSTEIN, *Against the Gods* : The remarkable story of risk.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je tiens à remercier Monsieur Alaa CHATEAUNEUF, Professeur à l'Université Blaise Pascal, pour m'avoir fait le grand honneur de diriger ce travail. Durant toutes ces années, j'ai pu bénéficier de sa très haute compétence et rigueur scientifique, qui fut pour moi une source intarissable de savoir et d'enrichissement. Pour ses encouragements, sa disponibilité, sa patience et la confiance qu'il m'a toujours accordée, qu'il soit assuré de ma sincère reconnaissance.

Je tiens également à remercier vivement Monsieur Jean-Pierre FONTAINE, Professeur à l'Université Blaise Pascal, pour m'avoir fait également le grand honneur de co-diriger ce travail de thèse. Pour son sens du détail, ses conseils pertinents, ses encouragements et la confiance qu'il m'a toujours témoignée, qu'il soit également assuré de ma profonde reconnaissance.

Merci à Monsieur Philippe AUDEBERT, Maître de conférences à l'IUT d'Allier-Montluçon, qui a dirigé la partie expérimentale de ce travail, me faisant profiter de sa rigueur expérimentale et de ses connaissances techniques, qu'il soit assuré de ma sincère reconnaissance.

Je remercie également :

- Monsieur F. SCHÆFS, Professeur à l'Université de Nantes, pour avoir pris le temps de suivre l'évolution de cette thèse et de rapporter mon mémoire.
- Madame M. WOŁOSZYN, Professeur à l'Université de Savoie, pour l'intérêt qu'elle a manifesté à l'égard de cette thèse en acceptant de rapporter mon mémoire.

Enfin, au cours de ces quelques années, j'ai eu le plaisir de bénéficier d'un environnement chaleureux, grâce au soutien moral et amical de mes collègues de laboratoire, mes amis doctorants (Polytech/IFMA/LASMEA), techniciens, chercheurs et enseignants.

Amina AÏSSANI

- A ma mère,

Ma source de motivation,

Au delà de ses encouragements et de ses conseils pertinents, elle a su me donner la force de faire face à cette thèse mais surtout à la vie, le monde et ses remous. Je ne pourrais dire avec certitude si c'est dans son regard, son sourire, l'écho de sa voix ou tout simplement tout à la fois, que je puise toute mon énergie.

- A mon père,

Mon modèle de sagesse, de patience et de persévérance,

Son soutien indéfectible, ses encouragements et ses conseils ont été pour moi infiniment précieux. Quatre sources d'incertitudes et un chat...et encore la force de penser à tous les bruits blancs qui l'entourent. "On mesure l'intelligence d'un individu à la quantité d'incertitudes qu'il est capable de supporter. *Emanuel Kant*".

- A mes petites sœurs,

La prunelle de mes yeux, pour leur chaleureuse présence et leurs petits gestes précieux et ce malgré la distance.

- A mon tonton Mohamed, pour ces 900 réveils matinaux et pour m'avoir toujours donné la force de continuer quand j'étais sur le point d'abandonner.
- A mon tonton Amar et à toute ma famille.

Seuls le sang, la famille, l'histoire, le temps, identifient un être humain.
Jean-Marie Adiaffi, La carte d'identité-1980

- A Idris, mon frère de cœur. Je n'aurai cessé de le remercier pour sa présence, son aide et ses encouragements sans jamais se lasser malgré la distance et les années.
- A une personne incroyablement patiente. Je ne pourrai jamais assez lui exprimer ma profonde gratitude, pour son écoute, ses conseils, sa présence et son soutien moral inconditionnel.
- A tous mes amis d'ici et d'ailleurs, si nombreux que je ne peux tous les citer de peur d'en oublier certains.

Un ami : Rien n'est plus commun que le nom... Rien n'est plus rare que la chose.
Jean de la Fontaine, Parole de socrate-Fable N17

RÉSUMÉ

Dans un contexte de forte compétitivité économique et de respect de l'environnement, de nombreuses actions sont entreprises chaque année dans le but d'améliorer la performance énergétique des bâtiments. En phase de conception, le recours à la simulation permet d'évaluer les différentes alternatives au regard de la performance énergétique et du confort des occupants et constitue ainsi un outil d'aide à la décision incontournable. Toutefois, il est courant d'observer des écarts entre les performances énergétiques réelles et celles prévues lors de la conception.

Cette thèse porte sur l'amélioration du processus de conception de l'isolation dans le but de limiter les déviations des consommations réelles par rapport à celles prévues lors des simulations. Dans un premier temps, nous situons le contexte énergétique actuel puis nous présentons les différentes sources d'incertitudes qui affectent les résultats des simulations. Dans ce travail, nous nous intéressons particulièrement à la variabilité des propriétés thermo-physiques des isolants, au caractère variable de la mise en œuvre et à l'impact du changement climatique.

Des études expérimentales ont permis de quantifier l'incertitude associée à la performance des matériaux sains d'une part, et celle associée à des isolants défectueux d'autre part. Un couplage entre des techniques de thermographie infrarouge et des modèles éléments finis ont permis de proposer des modèles paramétriques permettant d'évaluer la performance effective d'un isolant défectueux, en fonction du type et de la taille du défaut dans l'isolant.

Pour une bonne estimation à long terme de la performance de l'isolation, il est nécessaire d'intégrer les prévisions météorologiques. Ces dernières sont généralement estimées sur la base des données historiques de la région. Toutefois, il est encore difficile de prévoir avec exactitude l'évolution climatique car elle dépend de nombreux facteurs socio-économiques, démographiques et environnementaux. Dans ce travail, nous proposons de considérer les différents scénarios climatiques proposés par les climatologues et de prendre en compte leur variabilité de manière à vérifier la fiabilité de l'isolation.

Enfin, nous proposons d'utiliser des approches probabilistes pour intégrer ces différents types d'incertitudes dans le processus de simulation. Pour optimiser le dimensionnement de l'isolation, nous proposons une méthodologie de conception basée sur la fiabilité. Un nouveau modèle de coût est également proposé dans le but d'améliorer l'aide à la décision, en considérant les pertes indirectes, jusqu'à présent négligées dans la conception.

MOTS-CLÉS

Fiabilité, Conception optimale, Propagation d'incertitudes, Performances énergétiques, Isolation, Variabilité climatique, Défauts de mise en œuvre.

ABSTRACT

In the context of growing world energy demand and environmental degradation, many actions are undertaken each year to improve the energy performance of buildings. During the design stage, the use of building energy simulations remains a valuable tool as it evaluates the possible options in terms of energy performance and comfort. However, as precision requirements increase, it becomes essential to assess the uncertainties associated with input data in simulation.

This thesis focuses on the insulation design process under uncertainty, in order to limit gaps between real and predicted performance for better control of energy consumptions. This work firstly presents the current alarming energy context. We consider the main uncertainties that affect the insulation, mainly the variability of the thermo-physical properties, the uncertainty on climate and the uncertainties due to workmanship defects.

Experimental studies were carried out to evaluate the uncertainty associated to the intrinsic performance of healthy insulation materials on one hand, and those associated to defects in insulations on the other hand. A coupling between thermography techniques and finite element models was used to provide analytical models that assess the effective thermal performance of a defective insulation, according to the type and size of the defect.

As the performance of insulation also depends on climate, it is necessary to integrate future weather data to evaluate the energy consumption. These weather data are generally estimated based on the historical climatic data of the region. However, it is still difficult to predict climate change as it depends on many uncontrollable factors. In this work, we consider the different climate scenarios proposed by climate expert groups, and the uncertainty associated to each scenario to evaluate the reliability of the insulation and to improve the decision making process.

Finally, we propose a probabilistic approach to integrate uncertainties in simulation and an optimization methodology based on reliability. A new cost formulation is also proposed to improve the decision-making, through indirect losses related to comfort, pollution and living space losses.

KEYWORDS

Reliability, Insulation design, Propagation of uncertainties, Energy performance, Climate variabilities, Workmanship defects.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES	5
1.1 Introduction	5
1.2 Contexte énergétique	5
1.3 Consommation énergétique liée au secteur du bâtiment	7
1.3.1 Rappels théoriques : physique du bâtiment	8
1.3.2 Simulation de la performance énergétique	16
1.3.3 Amélioration des performances énergétiques	16
1.4 Position du problème	19
1.4.1 Comment Garantir les performances énergétiques?	19
1.4.2 Identification des sources d'incertitude dans les modèles	20
1.4.3 Variabilité des propriétés thermo-physiques	22
1.4.4 Variabilité climatique	23
1.4.5 Variabilité du comportement des occupants	24
1.5 Fiabilité des performances énergétiques	26
1.5.1 Analyse de fiabilité	26
1.5.2 Durée de vie et fiabilité - Fiabilité dépendant du temps	28
1.5.3 Estimation de la probabilité de défaillance	29
1.5.4 Intérêt de l'analyse de fiabilité	30
1.6 Synthèse	31
2 MATÉRIAUX D'ISOLATION	33
2.1 Introduction	33
2.2 Performance des matériaux d'isolation	33
2.2.1 Caractérisation des matériaux d'isolation	35
2.2.2 Influence de la température et de l'humidité	36
2.2.3 Dégradation et durée de vie	42
2.3 Garantie de la performance thermique des matériaux d'isolation	45
2.4 Quantification de l'incertitude associée aux matériaux d'isolation	51
2.4.1 Description de la campagne expérimentale	51
2.4.2 Dispositif expérimental	51
2.4.3 Variabilités du coefficient de conduction	57
2.5 Etude de la fiabilité de l'isolation d'un mur	69
2.5.1 Isolation thermique des façades	69
2.6 Conclusion	78
3 DÉFAUTS DE MISE EN ŒUVRE	79
3.1 Introduction	79
3.2 Continuité de l'enveloppe du bâtiment	79
3.2.1 Ponts thermiques	79
3.2.2 Défauts de mise en œuvre	82
3.3 Impact des défauts de mise en œuvre sur la performance de l'isolation	83
3.3.1 Concept d'isolation équivalente	83
3.3.2 Défauts étudiés	85
3.3.3 Etude expérimentale	87

3.3.4	Etude numérique	94
3.3.5	Evaluation de la conductivité effective	96
3.3.6	Modèles d'évaluation de la conductivité effective en présence de défauts	98
3.3.7	Quantification de l'incertitude sur la conductivité effective	101
3.4	Application : fiabilité de l'isolation en présence de défauts de mise en œuvre	105
3.5	Conclusion	109
4	VARIABILITÉ CLIMATIQUE	111
4.1	Introduction	111
4.2	Performances énergétiques et sollicitations climatiques	111
4.2.1	Impact du climat sur le secteur du bâtiment	112
4.2.2	Prévision du changement climatique	113
4.2.3	Variabilité climatique	116
4.3	Modélisation de la variabilité climatique	118
4.3.1	Variabilité linéairement croissante	119
4.3.2	Variabilité générée par des processus stochastiques	120
4.4	Impact de la variabilité climatique sur la demande énergétique	123
4.4.1	Impact des différentes sources d'incertitude sur la fiabilité d'une isolation	127
4.5	Conclusion	128
5	OPTIMISATION DE LA CONCEPTION	131
5.1	Introduction	131
5.2	Épaisseur économique	131
5.3	Optimisation de l'épaisseur d'isolation	133
5.3.1	Formulation du problème d'optimisation	134
5.3.2	Modèles de coût total	134
5.4	Intégration des coûts indirects	136
5.4.1	Impact Environnemental	137
5.4.2	Confort thermique	137
5.4.3	Perte en surface d'habitation	139
5.4.4	Formulation de la nouvelle fonction objectif	140
5.5	Conception basée sur la fiabilité	141
5.6	Etude paramétrique	143
5.6.1	Impact des incertitudes	143
5.6.2	Impact des coûts indirects	146
5.6.3	Impact de l'exigence de fiabilité P_{f0}	148
5.7	Isolation des façades : Épaisseur économique sous contrainte de fiabilité	149
5.7.1	Impact du type de matériau utilisé	150
5.7.2	Impact des défauts de mise en œuvre	154
5.7.3	Impact du scénario climatique	156
5.7.4	Prise en compte de toutes les incertitudes	157
5.8	Conclusion	159
	CONCLUSION GÉNÉRALE	161
	BIBLIOGRAPHIE	165
	Annexes	175
A	ANNEXE A	177
A.1	Conductivité thermique	177

A.1.1	Boîtes chaudes (Hot Box measurements) :	177
A.1.2	Méthode de la plaque chaude gardée	177
A.1.3	Méthode du fil chaud	178
A.1.4	Méthode de la tige chaude	179
A.1.5	Méthode de l'anneau chaud	179
A.1.6	Méthode du ruban chaud	179
A.1.7	Méthode Flash	180
A.1.8	Méthode de la tri-couche	180
A.2	Coefficient d'échange	181
B	ANNEXE B	183
B.1	Matériaux Sains	183
B.1.1	Laine de Verre	183
B.1.2	Polystyrène	186
B.1.3	Laine de Roche	189
B.1.4	Polyuréthane	191
B.2	Isolants défectueux	192
B.2.1	Rainures	192
B.2.2	Ouvertures	193
B.2.3	Passage de fils	194
B.2.4	Écrasement	194
C	ANNEXE C	197
c.1	Modélisation probabiliste de l'incertitude	197
c.1.1	Variables aléatoires	198
c.1.2	Processus aléatoires	199
c.2	Méthode d'approximation de la probabilité de défaillance	201
c.3	Cadre méthodologique	202
c.4	Transformation iso-probabiliste	203
c.4.1	Variables indépendantes	203
c.4.2	Variables quelconques indépendantes	203
c.5	Algorithme d'optimisation	204
	PUBLICATIONS	207

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1.1	Consommation énergétique par secteur d'activité en France.	6
FIGURE 1.2	Demande d'énergie primaire par type de combustible.	6
FIGURE 1.3	Répartition de la consommation résidentielle pour l'année 2010.	7
FIGURE 1.4	Part des différents secteurs dans la consommation européenne.	7
FIGURE 1.5	Conception énergétique.	8
FIGURE 1.6	Conductivité thermique.	10
FIGURE 1.7	Schéma thermique en utilisant l'analogie électrique.	10
FIGURE 1.8	Mur multicouches placé entre deux fluides.	13
FIGURE 1.9	Schéma électrique équivalent d'un mur à n couches.	14
FIGURE 1.10	Mur avec différentes couches placées en parallèle.	14
FIGURE 1.11	Schéma électrique équivalent.	14
FIGURE 1.12	Evolution de l'exigence réglementaire.	18
FIGURE 1.13	Sources d'incertitudes affectant le bâtiment.	19
FIGURE 1.14	Modélisation et simulation.	21
FIGURE 1.15	Différentes projections climatiques.	24
FIGURE 1.16	Relation entre les valeurs de PMV et PPD.	25
FIGURE 1.17	Représentation de P_f par courbes d'isodensité de probabilité.	27
FIGURE 1.18	Représentation tridimensionnelle de P_f	27
FIGURE 1.19	Relation $P_f = \Phi(-\beta)$	28
FIGURE 1.20	Processus stochastique et dégradation de la résistance.	29
FIGURE 2.1	Conductivité des matériaux poreux vis-à-vis de la température.	37
FIGURE 2.2	Evolution de la conductivité pour différents isolants.	38
FIGURE 2.3	Diagramme d'humidité dans le cas du polyuréthane et du béton.	39
FIGURE 2.4	Evolution de la conductivité thermique en fonction de l'humidité.	39
FIGURE 2.5	Comportement de l'isolant en fonction de la température.	44
FIGURE 2.6	Déchirement de la membrane de l'isolant dû à un écrasement.	44
FIGURE 2.7	Evolution de la consommation énergétique - <i>Cabeza</i> (2010).	46
FIGURE 2.8	Isolants à structure visuellement hétérogène.	50
FIGURE 2.9	Isolants à structure visuellement homogène.	50
FIGURE 2.10	Dispositif expérimental.	52
FIGURE 2.11	Source de chaleur sur la face amont de l'échantillon.	53
FIGURE 2.12	Présentation des zones de mesure et de garde.	53
FIGURE 2.13	Emplacement des tapis chauffants.	54
FIGURE 2.14	Encadrement en Laine de verre.	54
FIGURE 2.15	Position des thermocouples.	55
FIGURE 2.16	Thermographie infrarouge : Processus du transfert de chaleur.	55
FIGURE 2.17	Cadre en laine de verre pour stabiliser l'écoulement d'air en aval.	56
FIGURE 2.18	Lois de distribution dans le cas de la laine de verre.	65
FIGURE 2.17	Lois de distribution dans le cas du Polystyrène	67
FIGURE 2.18	Lois de distribution dans le cas du Polyuréthane.	67
FIGURE 2.19	Lois de distribution dans le cas de la laine de roche.	68
FIGURE 2.20	Configuration des murs considérés.	70

FIGURE 2.21	Dégradation du polystyrène et de la laine de verre.	74
FIGURE 2.22	Consommation énergétique en utilisant différents isolants.	75
FIGURE 2.23	Probabilité de défaillance annuelle dans le cas de laine de verre.	76
FIGURE 2.24	Evolution de la probabilité de défaillance par régions.	77
FIGURE 3.1	Localisation des ponts thermiques.	80
FIGURE 3.2	Répartitions des déperditions par niveaux de d'isolation	81
FIGURE 3.3	Pertes de chaleur dans un matériau en présence de défaut.	83
FIGURE 3.4	Flux de chaleur pour différentes tailles de rainure	84
FIGURE 3.5	Procédure de détermination de la conductivité effective.	86
FIGURE 3.6	Défauts étudiés.	87
FIGURE 3.7	Evolution de la température intérieure.	89
FIGURE 3.8	Evolution de T_{Ext-IR} après la pose de l'échantillon.	90
FIGURE 3.9	Images thermiques - Défauts de type Rainures	91
FIGURE 3.10	Répartition de T_{Ext} tout le long d'une rainure	91
FIGURE 3.11	Image thermique - Défaut de type Ouverture	92
FIGURE 3.12	Images thermiques - Défauts de type Écrasement	92
FIGURE 3.13	Température extérieur au niveau des points d'écrasement.	93
FIGURE 3.14	Images thermiques - Défauts de type Passage de fils	94
FIGURE 3.15	Modélisation des défauts sur ANSYS.	95
FIGURE 3.16	Flux de chaleur (W) à travers différents isolants avec défauts.	95
FIGURE 3.17	Conductivité effective : Rainure/Ouverture	99
FIGURE 3.18	Conductivité effective : Ecrasement/Passage de fils	102
FIGURE 3.19	Lois de distribution des conductivités effectives par type de défaut.103	
FIGURE 3.18	Lois de distribution des conductivités effectives par type de défaut.104	
FIGURE 3.19	Evolution de λ^* en fonction du type et de la taille du défaut	106
FIGURE 3.20	Evolution de la consommation en fonction du type de défaut.	107
FIGURE 3.21	Probabilité de défaillance en fonction du type de défaut.	107
FIGURE 3.22	Probabilité de défaillance des isolants défectueux.	108
FIGURE 4.1	Zones climatiques françaises.	112
FIGURE 4.2	Evaluation des projections climatiques proposés par le GIEC.	115
FIGURE 4.3	Incertitudes considérées par les scénarios climatiques proposés.	116
FIGURE 4.4	Variation des températures extrêmes.	117
FIGURE 4.5	Evolution linéaire de l'intervalle de confiance	120
FIGURE 4.6	Simulations des processus stochastiques de DJC et DJR	123
FIGURE 4.7	Variabilité de la consommation en fonction du scénario climatique	124
FIGURE 4.8	Evolution de P_f en fonction du scénario climatique	126
FIGURE 4.9	Probabilité de défaillance en fonction du type d'incertitude.	128
FIGURE 5.1	Épaisseur économique du matériau d'isolation.	132
FIGURE 5.2	Evolution de l'épaisseur d'isolation typique des façades en Europe	132
FIGURE 5.3	Vue globale modulaire de l'approche utilisée pour la conception.	142
FIGURE 5.4	Conception optimales avec ou sans contrainte de fiabilité.	143
FIGURE 5.5	Agencement des différents murs ITI et ETI.	143
FIGURE 5.6	Dispersion de la consommation - Etude paramétrique	145
FIGURE 5.7	Décomposition du coût total.	147
FIGURE 5.8	Épaisseur économique en fonction de l'exigence en fiabilité	149
FIGURE 5.9	Structure du mur de façade étudié.	150
FIGURE 5.10	Impact de la variabilité des propriétés isolantes	151
FIGURE 5.11	Dégradation de l'isolation en fonction du type de matériau.	151

FIGURE 5.12	Consommation énergétique en fonction du type de matériau . . .	153
FIGURE 5.13	Impact de la qualité de mise en œuvre	154
FIGURE 5.14	Influence d'un défaut sur l'épaisseur optimale à utiliser.	155
FIGURE 5.15	Impact du scénario climatique	156
FIGURE 5.16	Influence du scénario climatique sur la consommation énergétique.	157
FIGURE 5.17	Evaluation de la performance énergétique.	158
FIGURE 5.18	Evolution de la consommation énergétique par type d'incertitude.	158
FIGURE 5.19	Evolution de la consommation énergétique par types d'incertitude considérée sur une centaine d'années.	159
FIGURE A.1	Principe de la chambre chaude (Hot box).	178
FIGURE A.2	Principe de la méthode de la plaque chaude gardée.	178
FIGURE A.3	Principe de la méthode du fil chaud.	179
FIGURE A.4	Principe de la méthode du Ruban chaud.	180
FIGURE A.5	Principe de la méthode Flash.	180
FIGURE A.6	Dispositif expérimental de la méthode de la Tri-Couches.	181
FIGURE A.7	Types de convection.	182
FIGURE B.1	Identification de la loi de distribution dans le cas de la LDV . . .	185
FIGURE B.0	Identification de la loi de distribution dans le cas du Polystyrène.	188
FIGURE B.1	Identification de la loi de distribution dans le cas de la LDV . . .	190
FIGURE B.2	Identification de la loi de distribution dans le cas du polyuréthane.	191
FIGURE B.3	Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=8cm$ / Rainure $w_d = 3cm \times t_d = 2cm$	192
FIGURE B.4	Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=8cm$ / Rainure $w_d = 5cm \times t_d = 2cm$	192
FIGURE B.5	Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=8cm$ / Rainure $w_d = 2cm \times t_d = 5cm$	192
FIGURE B.6	Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=5cm$ / Ouverture $w_d = 0,5cm$	193
FIGURE B.7	Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=5cm$ / Ouverture $w_d = 1,5cm$	193
FIGURE B.8	Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=5cm$ / Ouverture $w_d = 2,5cm$	193
FIGURE B.9	Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=8cm$ / Passage d'une gaine de $\Phi = 2cm$	194
FIGURE B.10	Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=8cm$ / Écrasement 2 cm.	194
FIGURE B.11	Temperature extérieure en surface extérieure.	195
FIGURE C.1	Trajectoires du processus aléatoire X_t	199
FIGURE C.2	Transformation iso-probabiliste et définition du point MPFP. . . .	202
FIGURE C.3	Illustration de l'algorithme d'optimisation (HLRF).	204

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Analogie électrique-thermique	10
Tableau 1.2	Sources d'incertitudes sur les propriétés thermo-physiques.	23
Tableau 1.3	Valeurs cibles de β	28
Tableau 2.1	Evolution de la conductivité à différents degrés d'humidité.	40
Tableau 2.2	Mécanismes de dégradation liés à l'isolation.	43
Tableau 2.3	Dégradation de la conductivité en fonction de l'humidité.	43
Tableau 2.4	Dispersion de la conductivité en fonction de la classe de matériau.	47
Tableau 2.5	Description de la campagne d'essais.	52
Tableau 2.6	Résultats expérimentaux.	58
Tableau 2.7	Conductivités thermiques expérimentales.	60
Tableau 2.8	Densités obtenues expérimentalement.	60
Tableau 2.9	Coefficients du modèle de μ_λ - BDD Expérimentale	61
Tableau 2.10	Coefficients du modèle de σ_λ - BDD Expérimentale	61
Tableau 2.11	Coefficients du modèle de μ_λ - BDD Fabricants.	62
Tableau 2.12	Coefficients du modèle de σ_λ - BDD Fabricants.	62
Tableau 2.13	Identification des lois de distribution de la conductivité thermique.	64
Tableau 2.14	Caractéristiques des composants du mur.	70
Tableau 2.15	Valeurs de Degrés Jours Unifiés (DJU) pour trois villes françaises.	71
Tableau 2.16	Consommations énergétiques annuelles	73
Tableau 2.17	Evolution de la probabilité de défaillance annuelle.	76
Tableau 3.1	Description de la campagne d'essais sur les matériaux avec défauts.	88
Tableau 3.2	Conductivités effectives : Rainure/Ouverture	96
Tableau 3.3	Conductivités effectives : Ecrasement/Passage de fils	97
Tableau 3.4	Calibration des modèles analytiques	101
Tableau 3.5	Exemples de lois de distribution de la conductivité effective.	103
Tableau 4.1	Valeurs de Cepmax par région climatique.	113
Tableau 4.2	Modèles probabilistes des scénarios climatiques	124
Tableau 4.3	Ordre de grandeur de probabilité cibles en construction	127
Tableau 5.1	Zones de confort ISO7730.	138
Tableau 5.2	Prix de l'immobilier au m ² pour différentes villes de France.	140
Tableau 5.3	Données considérées pour l'étude paramétrique.	144
Tableau 5.4	Impact de l'incertitude thermo-physique sur la consommation.	144
Tableau 5.5	Impact de l'incertitude sur le choix de conception.	145
Tableau 5.6	Données utilisées pour l'évaluation de la fonction objectif.	146
Tableau 5.7	Coûts d'isolation avec différentes formulations de coût	147
Tableau 5.8	Périodes de récupération (années) en fonction des coûts estimés.	147
Tableau 5.9	Influence de la fonction objective.	148
Tableau 5.10	Paramètres nécessaires au calcul de la consommation énergétique.	150
Tableau 5.11	Paramètres nécessaires au calcul économique.	150
Tableau 5.12	Épaisseurs optimales en utilisant la nouvelle formulation de coût.	152

Tableau 5.13	Coût total de l'isolation.	153
Tableau 5.14	Coûts optimaux en fonction du scénario climatique	156
Tableau A.1	Données thermo-physiques pour le calcul de h	182
Tableau C.1	Fonctions de distribution de probabilité	198

ACRONYMES

- ACERMI** Association pour la Certification des Matériaux Isolants
- ADEME** Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
- AFNOR** Association Française de Normalisation
- AGW** Arrêté du gouvernement Wallon (Belgique)
- AIE** Agence Internationale de l'Énergie
- ANR** Agence Nationale de la Recherche
- ASHRAE** American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
- BBC** Bâtiment Basse Consommation
- Bbio** Besoin bioclimatique
- CCV** Coût du Cycle de Vie
- Cep** Consommation d'énergie primaire
- Cepmax** Consommation d'énergie primaire maximum
- COP** Coefficient Of Performance - Coefficient de performance moyen du système de production de chaleur
- CSTB** Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
- CIBSE** Chatered Institution of Building Services Engineers
- DDV** Durée De Vie
- DJC** Degrés Jours de Chauffe
- DJR** Degrés Jours de Réfrigération
- DJU** Degrés Jours Unifiés
- EDF** Électricité de France
- EF** Elements finis
- EPS** Polystyrène expansé
- EPW** Energy Plus Weather
- GES** Gaz à Effets de Serre

GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat
HPE	Haute Performance Énergétique
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
LDR	Laine de Roche
LDV	Laine de Verre
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LNE	Laboratoire Nationale de métrologie et d'Essais
MEF	Méthode des éléments finis
MC	Monte-Carlo
MPFP	Most Probable Failure Point
nZEB	nearly Zero Energy Building
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PT	Pont Thermique
PU	Polyuréthane
SFRIMM	Syndicat des fabricants d'isolants réflecteurs minces multicouches
THPE	Très Haute Performance Énergétique
Tic	Température intérieure de confort
XPS	Polystyrène extrudé

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis plus de deux décennies, les pays de l'Union Européenne se sont engagés à entreprendre des mesures drastiques pour atténuer les effets néfastes engendrés par la mondialisation et l'industrialisation. La mise en œuvre du Grenelle de l'environnement souligne l'engagement de la France pour la lutte contre le changement climatique. Dans cette perspective, l'engagement de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 est alors confirmé [1].

Dans ce contexte, l'amélioration de l'efficacité énergétique constitue aujourd'hui une priorité politique. L'objectif premier est d'amener tous les secteurs économiques, les entreprises comme les particuliers, le privé comme le public, à consommer moins d'énergie en la maîtrisant. Cette dynamique nouvelle doit pouvoir servir différents enjeux, notamment [2] :

- l'enjeu environnemental : enrayer le réchauffement climatique ;
- l'enjeu social : permettre l'égalité d'accès à l'énergie ;
- l'enjeu politique : lever le risque de dépendance énergétique de la France face aux pays producteurs ;
- l'enjeu économique : limiter l'impact du prix de l'énergie sur les coûts de production et d'exploitation des entreprises.

A l'heure actuelle, le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus touchés par les nouvelles mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique. En effet, depuis 1974 de nombreuses réglementations thermiques ont paru, et s'actualisent régulièrement, en vue de maîtriser les consommations énergétiques. Depuis lors, les matériaux et les procédés d'isolation, de chauffage, de climatisation et de ventilation des bâtiments sont en profonde mutation.

Pendant longtemps, les recherches se sont orientées vers l'amélioration et l'optimisation des systèmes énergétiques utilisés. Actuellement, les efforts sont de plus en plus dédiés à l'amélioration de la conception de l'enveloppe du bâtiment en s'intéressant davantage à l'amélioration de la performance interne des matériaux et des techniques d'isolation.

PROBLÉMATIQUE

En phase de conception, la prise de décision quant à la structure de l'enveloppe, se base sur les résultats de simulation. Cette dernière s'appuie sur des modèles physiques simplifiés d'une part, et sur des hypothèses de calcul déterministes, d'autre part. Or, de nombreuses sources d'incertitudes affectent les paramètres de ces modèles. Nous citons notamment le caractère aléatoire du climat extérieur, l'incertitude sur le comportement des habitants, et la variabilité des propriétés isolantes des matériaux, surtout à long terme en raison du vieillissement. Ces aléas peuvent conduire à des écarts de jugement

et à de mauvaises prises de décision, entraînant des déviations de la consommation réelle par rapport à celle prévue lors des simulations.

En pratique, l'incertitude liée à la performance d'un bâtiment est réduite par un sur-dimensionnement de l'isolation et des systèmes de chauffage, climatisation et ventilation. Il en est ressorti une série d'inhérents facteurs de sécurité en considérant les pires scénarios de dimensionnement des systèmes énergétiques. Cependant, l'utilisation de tels facteurs de sécurité a entraîné l'utilisation de systèmes énergétiques deux fois plus importants, nécessitant beaucoup plus d'énergie mais induisant également plus de coûts, une perte en surface habitable, et un surplus d'émissions de gaz à effets de serre[3].

Par conséquent, il est clair que les stratégies durables doivent être intégrées dès la phase de conception. Pour cela, il devient indispensable d'identifier et de quantifier les différents types d'incertitudes affectant les modèles, pour pouvoir estimer à quel degré elles peuvent influencer sur les performances énergétiques d'un bâtiment et à quel niveau se situerait l'écart entre les prévisions et les mesures.

TRAVAUX DE RECHERCHE

Les travaux présentés ont deux objectifs principaux. Le premier vise l'identification et la quantification des incertitudes affectant les paramètres des modèles de simulation. Le second consiste à reformuler le problème de conception permettant d'intégrer les incertitudes et les facteurs socio-économiques en relation avec l'isolation.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres :

CHAPITRE 1 : il s'agit d'introduire le contexte énergétique actuel et d'exposer le problème de garantie des performances énergétiques et les différentes sources d'incertitudes responsables des écarts de performance.

CHAPITRE 2 : ce chapitre est dédié à l'étude des différentes sources d'incertitude pouvant affecter les propriétés intrinsèques des isolants, qu'elles soient dues au vieillissement ou aux défauts de fabrication. Une étude expérimentale a permis de quantifier la variabilité des performances isolantes des matériaux les plus couramment utilisés. Elle a ensuite permis de calibrer des modèles de quantification de l'incertitude associée aux propriétés thermophysiques des isolants.

CHAPITRE 3 : ce chapitre vise l'évaluation de l'impact des différents défauts de mise en œuvre sur la performance effective de l'isolation. Des études expérimentales et numériques ont permis de quantifier la variabilité de la performance. Des modèles analytiques sont également proposés pour l'évaluation de la conductivité thermique effective du matériau présentant des défauts.

CHAPITRE 4 : ce chapitre porte sur la variabilité des données météorologiques utilisées pour la simulation énergétique. Deux approches de modélisation de l'incertitude sont présentées et utilisées pour évaluer l'impact de la variabilité climatique sur la performance énergétique.

CHAPITRE 5 : ce dernier chapitre est dédié à la recherche du dimensionnement optimal de l'isolation en présence d'incertitudes. Différents facteurs socio-économiques

en relation avec l'isolation sont présentés et intégrés à la formulation de la fonction coût.

Pour la recherche du dimensionnement optimal de l'isolation, nous proposons d'utiliser une approche probabiliste pour considérer la propagation des incertitudes dans le modèle de performance énergétique. Ainsi, une optimisation fiable permet de fournir des conceptions à la fois économiques et fiables vis-à-vis des réglementations, et cela en dépit des incertitudes considérées et de leur impact socio-économique.

CHAPITRE I

PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES BÂTIMENTS

1.1 INTRODUCTION

Dans les pays industrialisés, le secteur du bâtiment est l'un des plus gros consommateurs d'énergie dont les besoins ne cessent d'augmenter, en raison de l'évolution démographique et de l'amélioration du niveau de vie.

A l'heure actuelle, une attention croissante est portée à la réduction et à la maîtrise de la consommation énergétique, qui représente une nécessité économique et environnementale. Les efforts européens et notamment français se traduisent par l'apparition de diverses réglementations thermiques et labels de qualité. L'objectif étant de jouer sur les dispositions constructives du bâtiment pour réduire les besoins en énergie.

Ce chapitre rappelle brièvement le contexte énergétique français ainsi que les objectifs de la réglementation thermique, continuellement remise en question, pour répondre aux attentes économiques et environnementales. Le constat actuel montre très souvent que les différentes actions entreprises pour assurer les exigences de cette réglementation restent encore insuffisantes, en raison de la présence de diverses sources d'incertitudes. Des incertitudes qui ne permettent pas de garantir les prévisions énergétiques escomptées. Ce qui remet en question la fiabilité des dispositions constructives adoptées.

1.2 CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE

En Europe, la consommation énergétique augmente en moyenne de 1,5% par an, en raison du développement économique, de l'expansion du secteur de la construction et des services énergétiques utilisés. Avec une consommation supérieure à 40% et plus de 30% d'émissions de CO₂, le secteur du bâtiment se place en première position avant ceux de l'industrie et du transport [4]. De par ce constat et poussée par son adhésion au protocole de Kyoto et par la volonté publique, l'Europe évolue aujourd'hui vers des bâtiments très peu consommateurs d'énergie.

En France, l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) estimait que le bâtiment était également le plus gros consommateur d'énergie en 2010 avec 43% de l'énergie totale consommée et 25% des émissions de Gaz à Effets de Serre (GES) [2]. En 2013, le Service de l'Observation et des statistiques (SOeS) qui fait partie du commissariat général au développement durable attribuait toujours plus de 45% des dépenses énergétiques au secteur du bâtiment (Figure 1.1) et contrairement aux autres secteurs industriels, les émissions dues aux secteurs résidentiel/tertiaire et des transports continuent de croître.

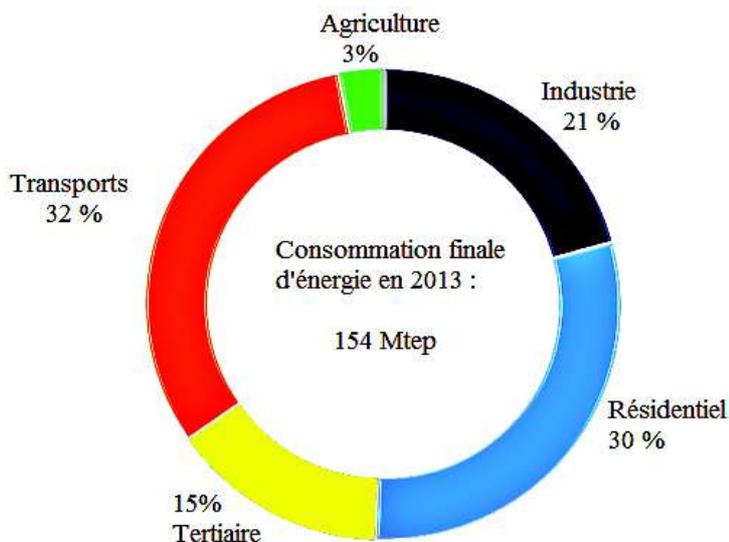


FIGURE 1.1: Repartition de la consommation finale d'énergie par secteur en France, 2013 [5].

Au rythme des consommations actuelles, les ressources en énergie fossile ne permettraient pas de tenir plus que quelques décennies (54 ans pour le pétrole, 63 ans pour le gaz et 112 ans pour le charbon [6]). De plus, l'augmentation du coût de l'énergie est aujourd'hui inéluctable, notamment celui des matières premières fossiles, ce qui a un impact direct sur le budget des ménages, et donc sur l'importance que chacun porte à l'énergie consommée. La figure 1.2 compare la demande énergétique attendue par type de combustible entre 2010 et 2035. A l'horizon 2035, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) estime que les besoins en pétrole, gaz et charbon restent encore les plus importants devant les énergie renouvelables et nucléaires.

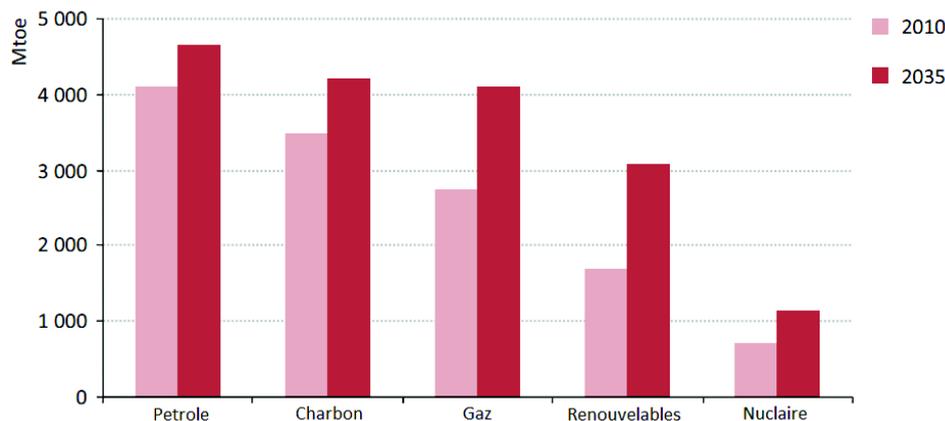


FIGURE 1.2: Demande d'énergie primaire par type de combustible [7].

Par ailleurs, ces consommations sont à l'origine du rejet dans l'atmosphère d'une grande quantité de gaz carbonique, qui contribue à l'accentuation du phénomène d'effet de serre et par conséquent au dérèglement climatique. Alors que les conséquences de ce dérèglement font débat pour en connaître l'ampleur et la rapidité, personne ne conteste aujourd'hui la nécessité de limiter les émissions de GES et donc de réduire les consommations énergétiques [7, 8].

A travers ce constat, il est clair qu'une transition énergétique, vers de plus faibles consommations est la seule solution. Dans ce contexte d'urgence, le bâtiment apparaît comme le premier secteur dans lequel il est possible de progresser rapidement sur le plan de la maîtrise de l'énergie et des émissions de GES.

1.3 CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE LIÉE AU SECTEUR DU BÂTIMENT

Dans les pays industrialisés de l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE)¹, les principales sources de consommation sont liées au chauffage et/ou au refroidissement, à l'eau chaude sanitaire, à l'éclairage, au transport (ascenseurs,...), aux appareils électroménagers et aux technologies de communication (Figure 1.3).

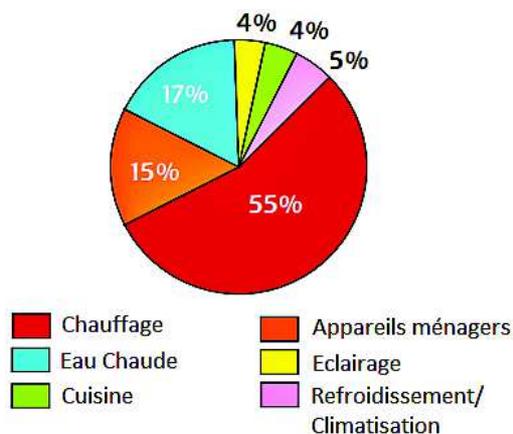


FIGURE 1.3: Répartition de la consommation résidentielle pour 20 pays de l'OCDE (2010) [7].

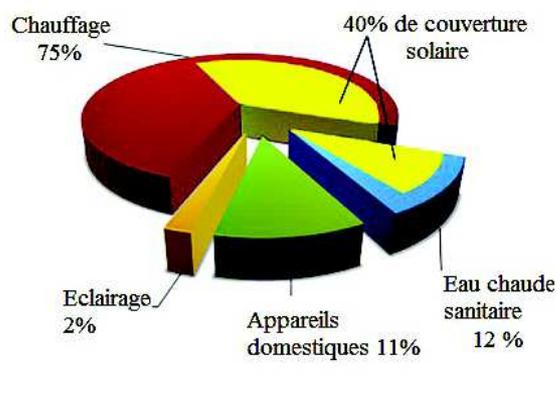


FIGURE 1.4: Part des différents secteurs dans la consommation européenne d'énergie.

Un bâtiment inadapté à son climat consommera automatiquement une plus grande quantité d'énergie. Dans les climats tempérés et froids, la plus grande part d'énergie utilisée sert au chauffage (Figure 1.4), alors que dans les climats plus chauds, il peut être nécessaire de baisser la température intérieure, grâce à la climatisation.

En France, la plus grosse consommation dans un foyer est liée en moyenne au chauffage. Toutefois, avec plus de 8 millions de personnes en situation de précarité énergétique et avec la hausse programmée du prix de l'énergie, de plus en plus de français seraient encore dans l'incapacité de payer leurs factures [9]. Pour limiter ces consommations à des valeurs raisonnables, un bâtiment doit pouvoir faire face à tous les paramètres environnementaux tels que, la température extérieure journalière, la radiation solaire et la direction et vitesse du vent. L'isolation est aujourd'hui reconnue comme la meilleure solution. Lorsque celle-ci est performante et protège efficacement l'enveloppe, étanche à l'air et sans ponts thermiques, elle contribue au confort ressenti.

¹ Le 14 décembre 1960, 20 pays ont signé la Convention relative à l'Organisation de coopération et de développement économiques. Depuis lors, 14 autres pays y ont adhéré. Les représentants de chaque pays se retrouvent pour débattre de leurs idées et examiner les progrès réalisés dans les domaines de l'action des pouvoirs publics (économie, échanges, science, emploi, éducation, marchés financiers, etc).

Dans ce sens, il est important de maximiser la conception du bâtiment et son isolation en parallèle ; notamment vis-à-vis des :

- propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés ;
- facteur de forme ;
- surface transparente ;
- orientation du bâtiment ;
- distance entre les bâtiments.

Pour trouver le jeu optimum de paramètres (Figure 1.5), la simulation est nécessaire. L'avantage de la simulation est qu'elle permet d'identifier les flux d'énergies dans le bâtiment, de déterminer ses faiblesses et d'aider le concepteur lors du processus de décision quant aux améliorations énergétiques possibles.

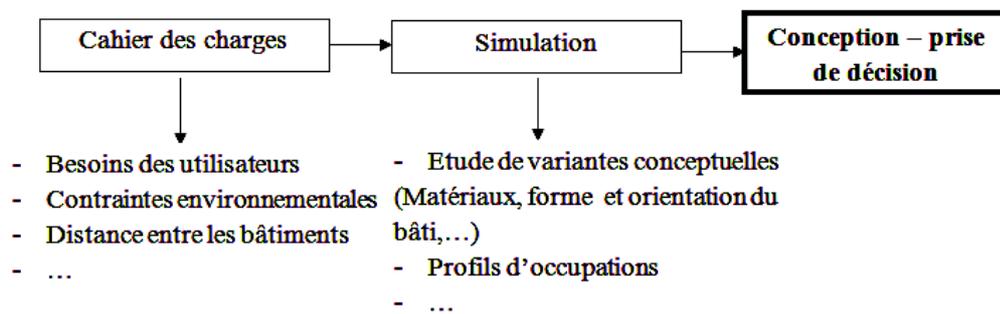


FIGURE 1.5: Conception énergétique.

1.3.1 Rappels théoriques : physique du bâtiment

L'objectif de cette section est de rappeler quelques notions liées aux différents modèles physiques qui décrivent l'écoulement des flux d'énergie au travers du bâtiment. Nous nous sommes volontairement limités à l'étude des régimes permanents², qui supposent que le flux de chaleur se conserve lors de la traversée du mur.

1.3.1.1 Notion de chaleur

La notion de chaleur est liée à deux aspects principaux [10] :

1. Aspect physiologique : il se concrétise par deux types de sensations :
 - le contact de la peau avec un objet ou un milieu, qui détermine la sensation chaud-froid par l'excitation des terminaisons nerveuses cutanées. autant que la température, l'aptitude de l'objet à prélever ou céder de la chaleur à la peau intervient dans la sensation ;

² Les régimes permanents sont utilisés dans la plupart des projets ; les régimes transitoires ne sont généralement évoqués que par leurs conséquences [10].

- la perturbation apportée au système thermorégulateur du corps humain ; c'est de cette manière que se concrétise la notion de confort thermique ressenti dans un local considéré comme trop ou pas assez chaud par l'utilisateur.
2. Aspect physique : il s'agit de la réponse donnée à la recherche de l'origine des phénomènes thermiques physiologiquement ressentis ou observés (échauffement ou refroidissement des objets, conséquences telles que la dilatation, l'ébullition, etc). En schématisant, on peut admettre que l'on trouve dans la matière deux types d'agitation :
- l'agitation moléculaire qui se manifeste dans les fluides par un mouvement désordonné des molécules (mouvement Brownien) et leurs impacts successifs sur les parois créant ainsi les forces de pression. Dans les solides, les molécules ont seulement un mouvement oscillatoire autour de leur position d'équilibre et l'amplitude de ce mouvement est directement liée à la température ;
 - l'agitation électronique, dont l'aspect intéressant est le changement du "niveau d'énergie" des couches d'électrons.

C'est à l'agitation aléatoire des molécules constituant la matière que correspond la notion de chaleur.

1.3.1.2 Transfert de chaleur

Dans une maison, le flux de chaleur se transmet par conduction (les murs), convection (l'aération) et rayonnement (les vitrages). Chaque matériau utilisé affiche des caractéristiques spécifiques vis-à-vis de ces transferts de chaleur. Trois propriétés déterminent la qualité énergétique d'un matériau, elles sont indépendantes les unes des autres, mais se combinent dans un matériau pour lui procurer des propriétés particulières de propagation de chaleur :

- **la masse volumique** (ρ) représente la masse contenue dans une unité de volume de la matière [kg/m^3];
- **la capacité thermique massique ou plus anciennement appelé chaleur spécifique** (C_p) représente l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température d'un degré Kelvin; elle permet de quantifier la possibilité du matériau à absorber ou à restituer l'énergie [$\text{J}/\text{kg.K}$];
- **la conductivité thermique** (λ ou k) caractérise la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction [W/mK] et représente la quantité de chaleur transférée par unité de longueur et par unité de temps sous un gradient de température (Figure 1.6). Ce coefficient est une caractéristique physique du matériau indépendant de sa forme. Il n'est valable que pour les matériaux homogènes et n'a pas de sens pour les matériaux hétérogènes au travers desquels la chaleur se propage en même temps par conduction, convection et rayonnement. Il varie en fonction de la température et de la teneur en eau du matériau.

En thermique classique, on se place à l'échelle macroscopique en utilisant de petits éléments de matière, supposés continus et homogènes ne faisant pas apparaître la struc-

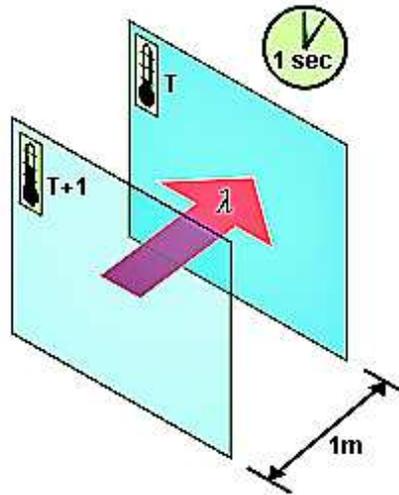


FIGURE 1.6: Conductivité thermique.

ture discontinue de la matière (atomes, molécules,...). Pour décrire les phénomènes, une certaine analogie entre le transfert de chaleur et le transfert d'énergie électrique est généralement utilisée (Tableau 1.1). A partir de cette analogie, il est alors possible de décrire le problème thermique par un schéma thermique équivalent comme illustré sur la figure 1.7.

Transfert de chaleur	Différence de température ΔT	Flux de chaleur Φ	Résistance thermique R
Transfert d'électricité	Différence de potentiel ΔV	Intensité du courant électrique I	Résistance électrique Ω

Tableau 1.1: Analogie électrique-thermique

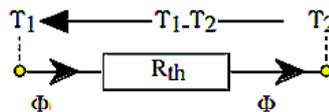


FIGURE 1.7: Schéma thermique en utilisant l'analogie électrique.

On dénombre trois types principaux de transfert de la chaleur :

1. Conduction :

La conduction est la propagation de la chaleur dans les corps par proximité moléculaire. L'agitation se transmet d'une molécule à l'autre, des plus excitées aux plus stables, entre atomes voisins. Ce mode de transfert est généralement rencontré dans les milieux opaques, sans déplacement de matière et s'effectue toujours d'une zone chaude vers une zone froide, selon le second principe de la thermodynamique.

En régime permanent et en milieu homogène, la température se répartit de manière uniforme. La *loi de Fourier* exprime alors la quantité de chaleur dQ qui traverse une surface S d'épaisseur dx durant le temps dt (1D) par :

$$dQ = -\lambda S \frac{dT}{dx} dt \quad (1.1)$$

où dQ est l'énergie incrémentale [J], λ la conductivité thermique du matériau [W/mK], S la section [m^2], dt est le temps incrémental [s] et $\frac{dT}{dx}$ le gradient de température selon x .

Le flux de chaleur Φ [$W = J/s$] à travers une surface S et circulant selon x , est ainsi donné par :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (1.2)$$

et la densité du flux de chaleur ϕ [W/m^2], s'écrit localement :

$$\phi = \frac{\Phi}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.3)$$

En régime stationnaire (i. e. température et flux constants en tout point), la densité du flux traversant une paroi plane homogène d'épaisseur e et de conductivité thermique λ , soumise à une différence de température ΔT se calcule en intégrant l'équation de *Fourier* (1.1) :

$$\phi = -\lambda \frac{\Delta T}{e} \quad (1.4)$$

Par analogie avec la loi d'Ohm, on peut poser :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1.5)$$

où R est la résistance thermique de la couche [$m^2.K/W$]; elle ne peut être définie qu'entre deux surfaces isothermes.

Remarque : le signe négatif des relations précédentes indique que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température $\frac{dT}{dx}$.

2. Rayonnement :

Le rayonnement est caractérisé par l'émission d'ondes électromagnétiques par la matière, au dépend de l'énergie calorifique qu'elle recèle. Ainsi, la matière émet des ondes allant du lointain infrarouge à l'ultraviolet, en passant par la lumière visible, selon la température. Le rayonnement est émis à la surface des solides ou des liquides et dans toute la masse pour les gaz.

Le flux de chaleur Φ échangé suivant x est modélisé par :

$$\Phi = \sigma \varepsilon S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (1.6)$$

où σ est la constante de *Stefan-Boltzmann* ($5.6710^{-8}W/m^2K^4$), ε est le facteur d'émission de la surface (entre 0 et 1, selon de l'état de surface du matériau; 1 dans le cas d'un corps noir), T_p est la température de surface [K], T_∞ est la température moyenne du milieu environnant la surface [K] et S est l'aire de la surface [m^2].

3. Convection :

La convection est la propagation de chaleur dans les fluides. Elle se fait par proximité moléculaire, mais ce phénomène est combiné au mouvement du fluide ; qu'il soit naturellement dû aux différences locales de masse volumique (*convection naturelle*), ou artificiellement créé par un gradient de pression généré par une pompe, un ventilateur ou un agitateur (*convection forcée*).

La convection implique un déplacement au sein d'un fluide. Ainsi, l'air qui monte lorsqu'il est chauffé, est remplacé par de l'air plus froid qui s'échauffe à son tour. Par conséquent, la convection est bien moins active lorsque le fluide est confiné (gaz du double vitrage).

Un flux convectif est modélisé par la *loi de Newton* le long d'une paroi, qui indique que le transfert est proportionnel à la différence de température. La densité du flux de chaleur est obtenue par :

$$\phi = h (T_p - T_\infty) \quad (1.7)$$

Le flux de chaleur transmis par convection est ainsi :

$$\Phi = h S (T_p - T_\infty) \quad (1.8)$$

où Φ est le flux de chaleur transmis par convection [W], h est le coefficient de transfert de chaleur par convection [W/m^2K], T_p est la température du solide (la paroi) [K], T_∞ est la température du fluide au loin de la surface du solide [K] et S la surface de contact solide/fluide [m^2].

Remarques :

- la valeur du coefficient h dépend de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide ;

- l'échange de chaleur entre une surface et son environnement se fait d'une part par rayonnement vers les autres surfaces environnantes et d'autre part par convection-conduction dans l'air. La densité du flux de chaleur entre la surface et son environnement peut donc s'exprimer par :

$$Q = (h_r + h_c) dT \quad (1.9)$$

où h_r et h_c sont les coefficients de transfert de chaleur par rayonnement et par convection respectivement. Nous rappelons que :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.10)$$

La résistance de la couche limite, ou *résistance superficielle* R_s^3 , vaut donc :

$$R_s = \frac{\delta T}{Q} = \frac{1}{h_r + h_c} \quad (1.11)$$

Remarque : un autre mode de transfert dont on parle moins souvent concerne l'évaporation-condensation. Un phénomène qui peut être la source des différents problèmes liés à l'humidité dans les bâtiments notamment les moisissures et le gel. Dans ce cas, la chaleur cédée à un matériau pour l'évaporer est restituée à la surface où la vapeur se condense. Un phénomène qui implique une migration combinée de chaleur et d'eau.

³ La valeur de la résistance de surface dépend de l'inclinaison de la paroi et de la vitesse de l'air du milieu. Sa valeur est généralement fournie dans les documents techniques.

1.3.1.3 Transmission thermique à travers une paroi

Les caractéristiques thermiques d'une enveloppe dépendent du type de construction et des combinaisons des caractéristiques de tous les matériaux composant l'enveloppe. En pratique, une des plus grosses déperditions de chaleur dans un bâtiment (25%) se produit à travers les façades, d'où l'importante attention que l'on porte à l'isolation des murs qui est plus complexe que l'isolation des sols⁴ et des toitures⁵.

La résistance R d'une paroi dépend des coefficients R_i de tous les matériaux qui la composent, isolants ou non, avec deux valeurs supplémentaires pour les échanges entre les surfaces et le milieu ambiant (i. e. résistance superficielle R_s – (1.11)).

Dans le cas des composants plans, formés de couches de matériaux homogènes perpendiculaires au flux de chaleur, la résistance totale est la somme des résistances des différentes couches du composant (Figure 1.8), comme suit :

$$R = R_{s,int} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{s,ext} = \frac{1}{S} \left(\frac{1}{h_{int}} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{ext}} \right) \quad (1.12)$$

où R_i représente la résistance thermique de la couche i , n représente le nombre de couches, λ_i représente la conductivité thermique de la couche i , h_{int} et h_{ext} sont, respectivement, les coefficients d'échange des surfaces intérieure et extérieure avec les milieux ambiants et S est la surface.

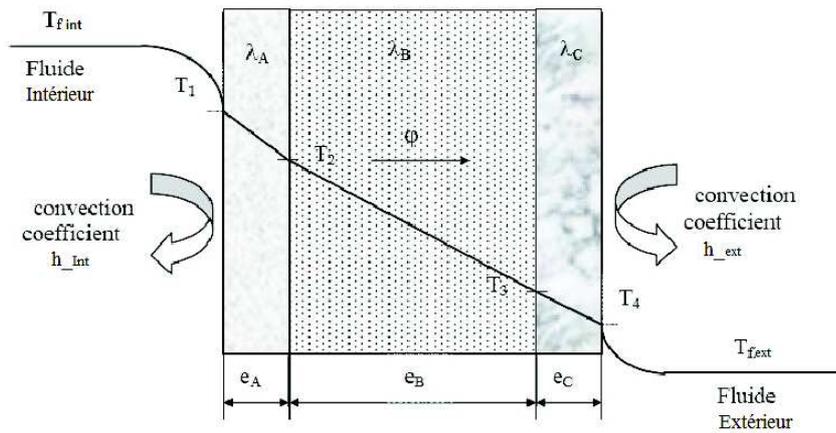


FIGURE 1.8: Mur multicouches placé entre deux fluides.

Dans le cas d'un ensemble de composants placés en parallèle (Figure 1.10), la résistance thermique est donnée par :

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \quad (1.13)$$

⁴ L'isolation des sols est moins poussée que celle des murs car en hiver la température du sol est plus élevée que la température extérieure.

⁵ Au niveau de la toiture, l'isolation est généralement plus importante qu'ailleurs, en raison de la facilité de la mise en œuvre de fortes épaisseurs et des pertes potentielles plus élevées.

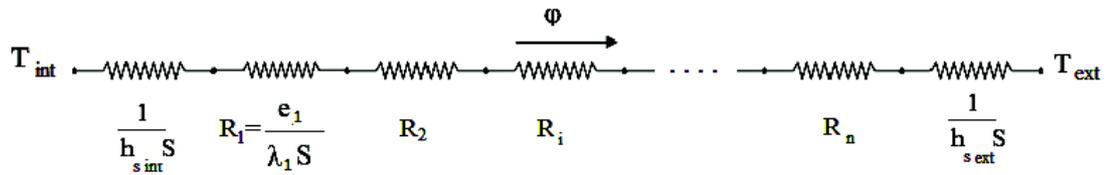


FIGURE 1.9: Schéma électrique équivalent d'un mur à n couches.

Dans le cas de la composition du mur illustré en figure 1.10, dont le schéma électrique équivalent est donné en figure 1.11, la résistance thermique est donnée par :

$$R = R_{s,int} + R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} + R_6 + R_{s,ext} \tag{1.14}$$

où R_2 et R_6 les résistances des composants intérieure et extérieure, respectivement ; R_3 et R_5 la résistance du milieu 2 ; R_4 la résistance du milieu 1 ; enfin, $R_{s,int} = \frac{1}{h_1 S}$ et $R_{s,ext} = \frac{1}{h_2 S}$ représentent les résistances de surface intérieure et extérieure, respectivement. Toutefois, le passage de la figure 1.10 au schéma présenté dans la figure 1.11 implique une simplification du transfert en 1D, alors qu'en réalité le transfert est en 2D ou 3D.

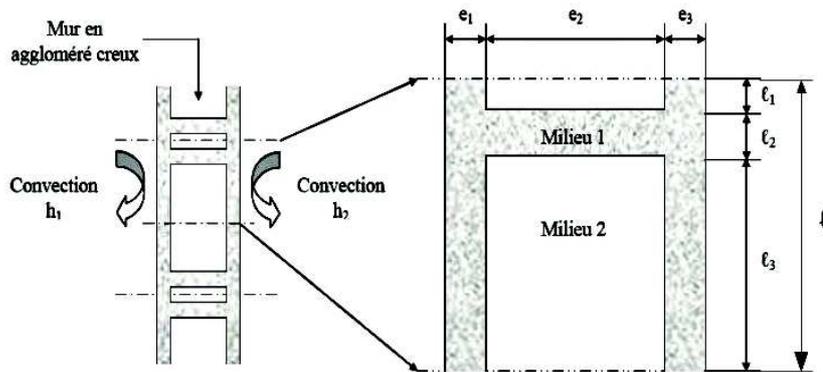


FIGURE 1.10: Mur avec différentes couches placées en parallèle.

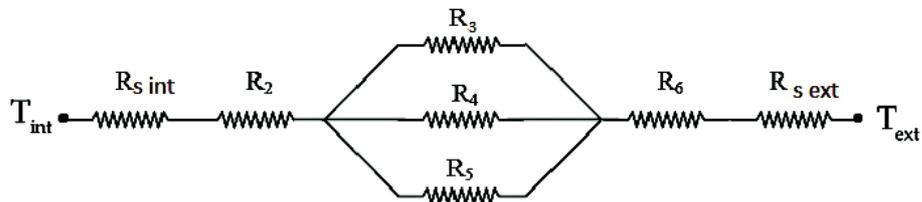


FIGURE 1.11: Schéma électrique équivalent.

Par convention internationale, un coefficient de transmission surfacique U est utilisé [W/m^2K]. Il est défini comme l'inverse de la résistance totale de la paroi R , selon le rapport :

$$U = \frac{1}{R} \tag{1.15}$$

Ainsi, le calcul des pertes de chaleur se fait en utilisant l'équation suivante :

$$Q = U S \Delta T \quad (1.16)$$

où Q représente les pertes totales de chaleur et ΔT est la différence de température entre les environnements extérieure et intérieure.

1.3.1.4 Inertie thermique

L'inertie thermique d'un logement peut être définie comme sa capacité à maintenir stable sa température intérieure malgré les variations des températures extérieures ou de l'ensoleillement. L'inertie thermique d'un bâtiment dépend donc de celle des matériaux utilisés. Les propriétés qui leur confèrent cette inertie sont caractérisées par deux grandeurs :

- **Diffusivité thermique** qui exprime la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température. La diffusivité thermique est notée a et s'obtient comme suit :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad [m^2/s] \quad (1.17)$$

- **Effusivité thermique** qui représente la capacité du matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. En d'autres termes, l'effusivité exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou restituer) une puissance thermique, elle est notée E et s'obtient comme suit :

$$E = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad [J/K.m^2.s^{\frac{1}{2}}] \quad (1.18)$$

En régime dynamique, il y a lieu de distinguer entre deux inerties thermiques :

- L'inertie de transmission** qui s'oppose aux variations du flux de chaleur qui traverse les parois, sous l'effet des conditions climatiques extérieures. Cette inertie fait plutôt appel aux matériaux légers tels que les isolants. Pour augmenter l'inertie de transmission, il faut diminuer la diffusivité du matériau (i. e. diminuer la conductivité thermique λ et augmenter l'épaisseur de mise en oeuvre du matériau.)
- L'inertie par absorption** qui s'oppose aux variations internes de température en absorbant (ou restituant) la chaleur créée à l'intérieur. Pour augmenter l'inertie par absorption, il faut augmenter l'effusivité du matériau.

Les produits isolants ont différentes capacités d'absorption et de restitution de la chaleur. Un produit à forte inertie en stocke beaucoup et la restitue lentement, et inversement. Une autre notion liée à l'inertie est le déphasage, qui intervient particulièrement pour les parois homogènes (Figure 1.8) où la chaleur traverse et se diffuse à l'intérieur. Si l'inertie est faible, la chaleur passe d'un côté à l'autre en quelques minutes. Si l'inertie est forte, le transfert prend plusieurs heures. Ainsi, pendant l'été, la chaleur est retenue durant les heures les plus chaudes de la journée et restituée plus tard, idéalement la nuit, lorsqu'il est possible de profiter de la fraîcheur extérieure pour l'évacuer. Cependant, ce déphasage ne dépend pas de la qualité isolante de la paroi.

1.3.2 Simulation de la performance énergétique

Pour étudier l'écoulement des flux de chaleur dans le bâtiment, le recours à la simulation énergétique constitue un outil incontournable d'aide à la décision. Aujourd'hui, de nombreux outils de simulation sont proposés aux acteurs du bâtiment, tels que Trnsys, EnergyPlus, Comfie+Pléiades, etc qui ont montré leurs performances au moyen de validations diverses [11].

Grâce à ces outils, il est possible d'identifier les paramètres influant sur l'investissement en décrivant l'effet des actions internes et externes. Ce qui permet de les considérer en phase de conception. Cette étape est davantage importante depuis l'apparition des nouveaux bâtiments à énergie positive et leurs exigences de plus en plus élevées [12].

A l'heure actuelle, il est important de pouvoir atteindre les performances réglementaires, même si les acteurs du bâtiment sont souvent confrontés à différents problèmes liés à :

- la modélisation environnementale et énergétique, plus ou moins précise, basée sur des hypothèses simplificatrices où les données des modèles sont soit définies par les normes (par exemple SIA381/1), soit données par les fabricants ;
- l'estimation de la variabilité économique, qui est largement aléatoire et qui peut entraîner des baisses ou des hausses brutales des coûts des matériaux et de l'énergie ;
- l'évaluation de l'impact du changement climatique, qui dépend de nombreux facteurs socio-économiques et politiques ;
- la prise en compte des différentes sources d'incertitude affectant les données et les modèles.

Par conséquent, il devient important d'apporter des améliorations à la modélisation énergétique actuelle, en se focalisant sur :

- l'optimisation multi-objective de la conception, en tenant compte des données et des modèles ;
- la caractérisation multi-échelle dynamique et la simulation des systèmes d'énergie multi-périodes ;
- l'identification de l'impact du changement climatique sur la performance énergétique à long terme.

1.3.3 Amélioration des performances énergétiques

Suite à la prise de conscience de la nécessité d'économiser l'énergie, différentes réglementations thermiques ont été éditées pour limiter les consommations énergétiques et leurs impacts économiques et environnementaux.

La première réglementation française fut instaurée en 1974, suite au premier choc pétrolier de 1973. Les pouvoirs publics ont réagi par le renforcement du programme

nucléaire et par différentes mesures d'économie d'énergie. L'objectif de cette réglementation était de réduire de 25% la consommation énergétique globale des bâtiments en n'imposant qu'une fine couche d'isolation ainsi qu'un système de régulation automatique du chauffage. Cependant, cet arrêté ne portait que sur le logement neuf ; rien pour l'industrie, ni le tertiaire, ni les transports, etc.

Suite au second choc pétrolier de 1979, une deuxième réglementation (RT 1982) est apparue pour soutenir l'effort à destination du chauffage électrique. La température de référence est fixée à 18°C. Les logements chauffés à l'électricité doivent être mieux isolés que les autres, rendant ainsi la consommation de l'électricité plus économique. Les apports du rayonnement solaire sont également pris en compte lors des calculs (notamment grâce à l'orientation des bâtiments). L'objectif était de réduire la consommation énergétique de 20% par rapport à la RT 1974. Cette réglementation a été ensuite renforcée en 1988, en l'étendant aux bâtiments tertiaires, avec des exigences de performances minimales de l'enveloppe et des systèmes mis en place.

Après les accords de Kyoto (1997), naît la RT 2000, qui a permis de prendre en compte officiellement les émissions de GES. Le principe de renouveler la réglementation tous les 5 ans est adopté. Trois exigences devaient être simultanément respectées : un plafond de consommation globale d'énergie, des exigences de performances minimales pour chaque critère, et un contrôle du confort d'été [10]. L'objectif dans ce cas est de réduire de 20% la consommation maximale des logements par rapport à la version précédente et de 40% la consommation des bâtiments tertiaires.

En 2005, le protocole de Kyoto est ratifié par 55 pays. L'objectif était de représenter le poids politique de plus de 50% des émissions mondiales de GES et contraindre les pays signataires à une réduction significative. Depuis lors, chaque année les pays membres se réunissent pour statuer sur les actions à mener pour enrayer ou du moins réduire, les changements climatiques. En France, cela donna naissance à la RT 2005 qui augmente les exigences de consommation et des gardes fous (une nouvelle baisse de 15% de la consommation énergétique des bâtiments neufs). L'accent est mis sur l'isolation, l'étanchéité des bâtiments, la prise en compte des énergies renouvelables et la conception bioclimatique.

Par la suite, différentes extensions plus exigeantes ont paru. Notamment, avec la modification des labels Haute Performance Énergétique (HPE) et Très Haute Performance Énergétique (THPE) en 2007 et par la création du tout nouveau label Bâtiment Basse Consommation (BBC) en 2005.

A la suite du Grenelle de l'Environnement, la réglementation thermique en vigueur, la RT 2012 (Figure 1.12) est apparue et se base sur l'ancien label BBC. Elle évolue tous les sept ans pour atteindre l'objectif fixé par la *Directive Européenne sur l'efficacité énergétique des bâtiments d'ici 2050*, à savoir réduire par un facteur quatre les émissions de GES.

Cette réglementation s'appuie sur les trois paramètres suivants :

- la Consommation d'énergie primaire (Cep) qui représente la capacité du bâtiment à limiter ses besoins en énergie. La Cep donne une indication conventionnelle des consommations chauffage, climatisation éventuelle, eau chaude sanitaire, éclairage et auxiliaires ;

- le Besoin bioclimatique (Bbio) qui permet d'optimiser la conception du bâtiment en fonction de la forme, de l'orientation et de l'environnement du bâtiment ;
- la Température intérieure de confort (Tic) qui ne doit pas être dépassée pour garantir le confort d'été.

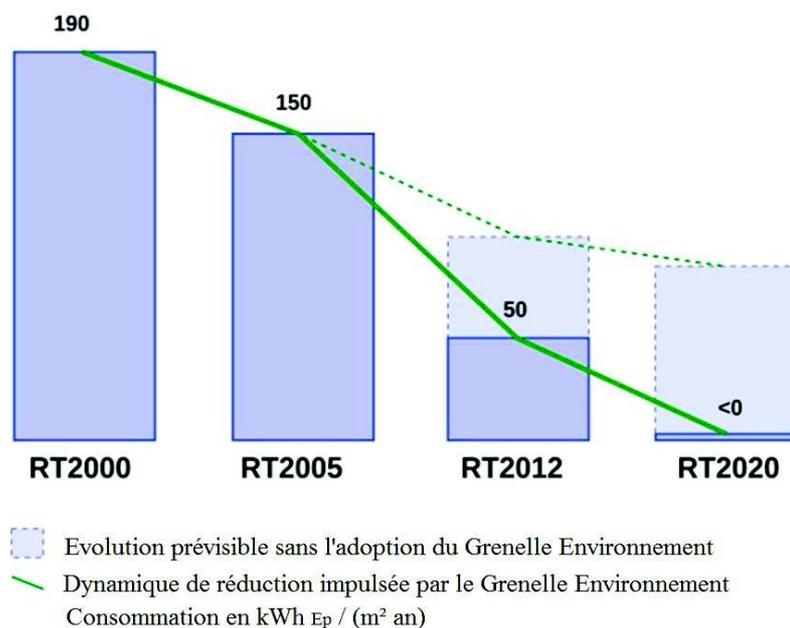


FIGURE 1.12: Evolution de l'exigence réglementaire en matière de consommation énergétique.

L'évolution croissante de ces exigences (Figure 1.12) a pour but d'atteindre des conditions environnementales confortables à moindre consommation d'énergie. Au sein d'un bâtiment, deux types de leviers complémentaires peuvent être activés [2] :

- **l'efficacité énergétique passive** qui vise à éviter les déperditions en renforçant la performance thermique du bâtiment (isolation, parois vitrées) ;
- **l'efficacité énergétique active** qui vise à réduire les consommations d'énergie en optimisant le fonctionnement des équipements et des systèmes.

Pendant plusieurs années, les concepteurs et les scientifiques ont cherché principalement à réduire la consommation énergétique pendant la phase d'exploitation du bâtiment (*efficacité active*), car on estimait que 80 à 85% de la consommation d'énergie totale survenait pendant cette phase [13]. De ce fait, une attention particulière fut portée sur la conception et l'optimisation des systèmes de chauffage et de refroidissement, alors que l'énergie grise (*efficacité passive*) recevait moins d'attention. Néanmoins, on s'est vite rendu compte que pour exploiter pleinement et durablement les gisements d'économie d'énergie, les actions de maîtrise de l'énergie devraient concerner non seulement l'utilisation efficace des systèmes énergétiques, mais aussi la conception/rénovation de l'enveloppe des bâtis. Un constat qui est d'autant plus important lorsqu'on sait que contrairement aux autres secteurs, le taux de renouvellement du parc immobilier existant est très faible (moins de 1% par an) et donc plus de la moitié des bâtiments qui existeront en 2050 sont déjà construits. La rénovation est donc la seule réponse à apporter pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments existants [2].

1.4 POSITION DU PROBLÈME

Pour la simulation de la performance énergétique, les modèles utilisés sont basés sur des paramètres déterministes, c'est-à-dire qu'ils ont des valeurs parfaitement définies. Cette hypothèse est généralement nécessaire par manque d'information et pour faciliter la mise en oeuvre numérique. Cependant, les retours d'expérience ont reporté de nombreux écarts entre les performances réelles des bâtiments et celles estimées. Un écart qui ne peut plus être toléré au vu du degré d'exigence actuel.

1.4.1 Comment Garantir les performances énergétiques ?

La réglementation thermique impose que la consommation énergétique maximum d'un mètre carré ne dépasse pas une valeur annuelle fixe (généralement 50 kWh/m²/an). Toutefois, en pratique, il est difficile de limiter la consommation énergétique à une valeur unique, compte tenu des aléas possibles durant les différentes phases du cycle de vie du bâtiment [11].

En phase de conception, les simulations numériques fournissent des estimations de la consommation énergétique. Toutefois, la consommation réelle dépend de données incertaines principalement liées à (Figure 1.13) :

- **l'efficacité énergétique de l'enveloppe considérée en simulation**, à savoir la performance thermique des matériaux, le taux de discontinuité, etc. ;
- **la sollicitation climatique, qui varie d'une année à une autre**, et qui dépend de différents facteurs difficilement contrôlables, tels que les évolutions démographique, technologique ou économique ;
- **le profil d'occupation, qui dépend du taux d'occupation du logement tout au long de sa durée de vie**, selon qu'une personne soit seule, en couple avec des enfants ou retraitée, le taux d'occupation va varier

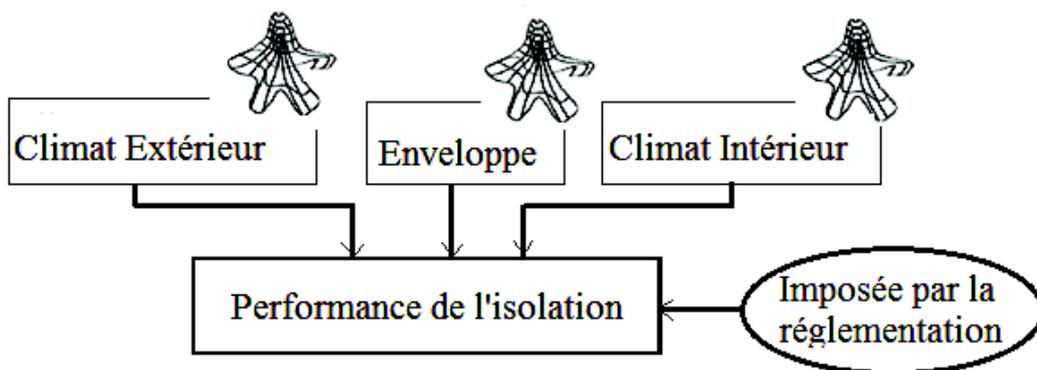


FIGURE 1.13: Incertitudes affectant la performance énergétique d'un bâtiment.

L'efficacité énergétique de l'enveloppe dépend beaucoup de la phase de mise en oeuvre. Parmi les différents facteurs qui peuvent altérer la performance de l'enveloppe, nous retenons :

- l'utilisation de matériaux différents de ceux considérés en phase de conception ;
- la mauvaise mise en œuvre, due au manque de compétence de la main d'œuvre, ou due au manque de rigueur dans les contrôles effectués.

En phase d'exploitation, il est possible d'utiliser des instrumentations permettant de vérifier le bon fonctionnement des systèmes énergétiques utilisés dans le bâtiment. Des opérations de contrôle permettent d'optimiser l'utilisation de ces systèmes et de réduire ainsi la consommation énergétique. Dans ce cas, les seules sources d'incertitude à considérer concernent les erreurs grossières de dimensionnement des systèmes, la détérioration subite de leurs conditions initiales de fonctionnement, le conflit d'informations, voire même le manque de compétence des acteurs qui s'occupent du contrôle et de la gestion des systèmes.

En conséquence, garantir que les consommations énergétiques réelles du bâtiment se justifient par les simulations est quasiment impossible avec l'utilisation des modèles actuels, étant donné que les incertitudes se trouvent à tous les niveaux et sont inévitables. Une identification des paramètres incertains, leur quantification, et leur prise en compte lors des simulations devient indispensable pour une meilleure évaluation de la performance énergétique.

1.4.2 Identification des sources d'incertitude dans les modèles

La simulation énergétique consiste à remplacer un objet technologique (e.g. un mur) par un modèle de comportement théorique, puis mathématique, avant de passer à l'aspect numérique et algorithmique [11]. Dans ce processus, de nombreuses simplifications et approximations sont introduites et peuvent ainsi engendrer des biais dans les modèles (Figure 1.14).

Les biais provenant des modèles mathématiques et numériques sont plus ou moins faciles à corriger, nous parlons alors d'incertitudes "réductibles" par ajout d'informations. Par contre, les simplifications introduites dans les modèles physiques (de comportement) conduisent le plus souvent à des plus gros biais et sont le plus souvent irréductibles. Ces incertitudes sont dues à la négligence de phénomènes, aux lois de transfert trop simplifiées, aux descriptions empiriques, etc. [11].

Lors de la conception, nous pouvons considérer deux types de modélisation :

- la modélisation **descriptive** où les modèles servent à représenter des informations récoltées dans le passé et en contexte actuel ;
- la modélisation **predictive** où les modèles servent à décrire un comportement futur.

Depuis plus d'une décennie, différents travaux de recherche soulignent l'importance d'intégrer les incertitudes des modèles physiques utilisés [15, 16, 17, 18]. En contexte énergétique, les études proposent d'intégrer l'incertitude liée aux modèles de deux manières :

1. par intégration directe de l'incertitude dans les modèles en considérant les paramètres des modèles comme aléatoires. A titre d'exemple, Lu et al. (2013) [16] et

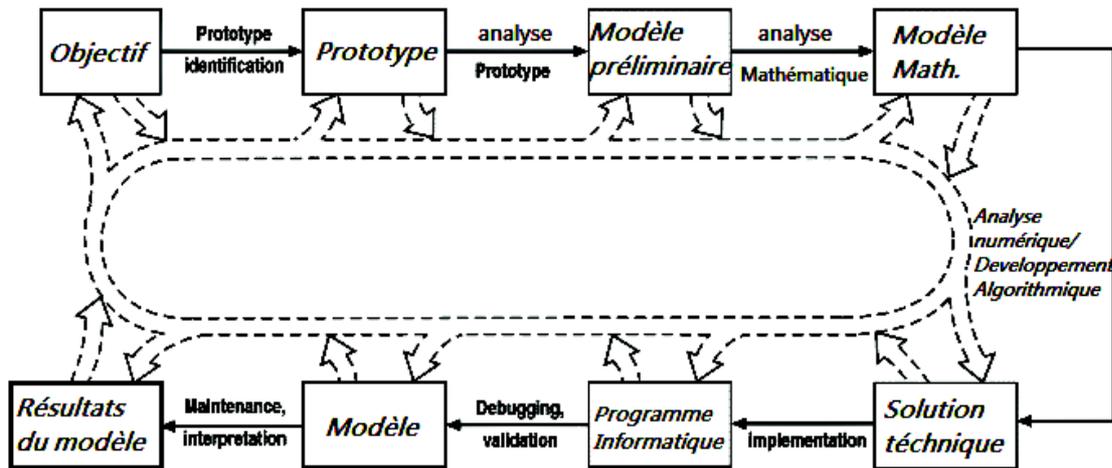


FIGURE 1.14: Modélisation et simulation [14].

Macdonald (2002) [3] s'intéressent à la prédiction de la réponse thermique dynamique sous conditions aléatoires. Ils considèrent alors, non seulement les coefficients de leurs modèles comme étant aléatoires mais également les paramètres d'entrée, en se basant sur l'utilisation des équations différentielles stochastiques.

En France, différents projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) s'intéressent à l'intégration de l'incertitude dans les modèles pour palier aux écarts de performances entre la simulation et la réalité. A titre d'exemple, le projet MEMOIRE (2011) propose d'utiliser la simulation thermique dynamique pour évaluer les gains énergétiques en se focalisant particulièrement sur la maîtriser des données d'entrée des méthodes de calculs thermiques et la propagation de l'incertitude. Un autre projet (FIABILITE-2010) a également été financé pour dégager les principales hypothèses susceptibles d'induire les biais les plus significatifs et de fournir une vue structurée des sources potentielles de biais et d'incertitude dans les modèles de simulation thermique et énergétique, dont l'utilisation est décisive dans le processus de conception de constructions neuves ou en rénovation[19].

2. D'autres auteurs s'intéressent plutôt à la *calibration* des modèles de simulation en fonction de l'application considérée [20, 21, 22]. A titre d'exemple, pour les modèles utilisés en phase de conception, Manfren et al. (2013) [20] utilisent un méta-modèle qui se base sur une approche orientée système, capable d'intégrer efficacement les données et les simulations de son application pour calibrer le processus de modélisation. L'objectif est de garantir que le modèle reproduit correctement le phénomène physique étudié. En contexte de rénovation, Ascione et al. (2011) [21] ont également calibré le modèle utilisé pour la rénovation d'un bâtiment historique, en se basant sur différents résultats de mesures in-situ. En France, grâce à des résultats in-situ obtenus sur la plate-forme expérimentale située à *Bourget-du-Lac*, Spitz (2012) [11] a permis de calibrer les modèles de simulation en conception et en phase d'exploitation. L'auteur a également pu identifier les incertitudes de mesure et celles sur les hypothèses de modélisation grâce à ses mesures in-situ.

Alors que la qualité du modèle numérique utilisé est très importante, la qualité des résultats dépend également de la qualité de l'information injectée au modèle. Dans les

études précédentes, les principales barrières sont liées à la disponibilité et à la compatibilité des données relatives aux propriétés thermo-physiques des matériaux, au climat, aux modèles de confort, aux scénarios d'occupation et aux caractéristiques opérationnelles. Par ailleurs, à la différence des autres secteurs industriels, le secteur du bâtiment ne peut pas spécifier des exigences strictes en termes de précision, notamment avec les dimensions géométriques [23]. Or, avec l'émergence des nouveaux bâtiments dits *nearly Zero Energy Building* (nZEB), l'exigence de précision sur les outils de simulation est de plus en plus importante. Les choix décisionnels qui s'ensuivent doivent permettre d'atteindre un objectif de consommation d'énergie nulle en combinant les stratégies de conception actives et passives [12].

1.4.3 Variabilité des propriétés thermo-physiques

En phase de conception, les valeurs des propriétés des matériaux que nous retrouvons dans les bases de données des logiciels, sont celles attendues par les règlements. Quant aux valeurs données par le fabricant, elles représentent des valeurs homogènes pouvant être atteintes en production et de façon répétitive. Ces valeurs sont validées en collaboration avec différents organismes agréés (en France : Association pour la Certification des Matériaux Isolants (ACERMI), Laboratoire Nationale de métrologie et d'Essais (LNE), Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), etc) et qui sont contrôlés deux fois par an. Néanmoins, au sein de la structure, les matériaux possèdent un comportement qui peut, à une certaine échelle, apparaître comme aléatoire [24], en effet :

1. il est quasiment impossible de décrire exactement le matériau et son environnement notamment en raison de la géométrie approximative, essais imparfaits, histoire passée inconnue, actions futures incertaines, etc. ;
2. les moyens matériels ou financiers disponibles pour acquérir des informations demeurent limités et, de ce fait, l'échantillon de mesures, de petite taille, n'est pas forcément représentatif de la population.

Il faut donc estimer les propriétés d'un milieu qui peut être très hétérogène à partir des mesures recueillies en quelques points. Il en résulte une incertitude que l'on peut qualifier de **naturelle**, liée à la variabilité intrinsèque de l'objet à qualifier, et une incertitude **statistique**, liée au processus d'échantillonnage [24]. Un facteur supplémentaire résulte de la mesure elle-même composée de :

1. L'erreur **systématique** qui est due au processus de mesure. Elle est constante et change de manière régulière (valeur fixe) tout au long de la répétition des mesures. Réduire ces erreurs du processus de simulation reviendrait à améliorer la résolution des modèles utilisés.
2. L'erreur **aléatoire**, qui ne peut être attribuée au processus de mesure et varie d'une manière inconnue. Étant donné que chaque quantité mesurée contient une erreur aléatoire, une approche basée sur la théorie des probabilités pourrait servir à modéliser ces incertitudes.

Le tableau 1.2 indique les sources d'erreurs systématiques et aléatoires pour chaque paramètre thermo-physique.

Erreur	Source d'incertitude	Conductivité thermique	Densité	Chaleur Spécifique
Systématique	Temperature	✓	✓	✓
	Teneur en eau	✓	×	✓
	Age	✓	✓	✓
Aléatoire	Mesure	✓	✓	✓

Tableau 1.2: Sources d'incertitudes des propriétés thermo-physiques [3]

A la précédente analyse, s'ajoute une dimension temporelle, car la performance des matériaux doit être assurée tout au long de la durée de vie. Cette dimension s'avère cruciale, car même si les propriétés isolantes des matériaux peuvent être estimées de façon satisfaisante à court terme, la prédiction à long terme s'avère souvent plus compliquée. L'humidité et la chaleur sont les principales sources de dégradation de ces propriétés, entraînant des déformations du volume et de la forme des matériaux, ainsi que l'apparition de moisissures sur les surfaces internes où se condense l'humidité. Ce type d'endommagement dépend de la variabilité des conditions environnementales extérieures et intérieures tout au long de la durée de vie de la structure. La maîtrise des risques liés à l'utilisation des matériaux implique la connaissance des effets de cette variabilité à long terme.

1.4.4 Variabilité climatique

Le changement climatique correspond à un changement d'état en termes de moyenne et de dispersion, sur la période considérée. Ce changement d'état est généralement associé à une variabilité naturelle qui résulte de l'activité humaine.

La simulation énergétique requiert l'introduction des sollicitations climatiques futures que devra subir le bâti. Ces sollicitations sont généralement estimées à partir des données météorologiques de la station météo la plus proche. Cependant, il est encore difficile de prévoir aujourd'hui avec exactitude la progression du changement climatique. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) [8] et le groupe d'experts anglais UKCP09 (UK Climate Projections) parlent de différentes évolutions possibles. Chaque progression dépend de nombreux facteurs sociaux et politiques, ainsi que de l'évolution démographique, économique, environnementale et technologique (Figure 1.15) [8].

La littérature est très critique vis-à-vis des actuelles prévisions climatiques utilisées pour les simulations. Certains auteurs attribuent le fait qu'il y ait de nombreuses incertitudes liées à la performance future des bâtiments à l'impact climatique. De Wilde and Tian (2012) [18] parlent de "*manque de sens*" des actuelles prévisions climatiques qui dépendent fortement des variables météorologiques considérées mais aussi du fait qu'elles ne considèrent pas les événements reproductibles. En conséquence, il apparaît nécessaire de considérer les incertitudes liées à l'évolution climatique pour obtenir de meilleures prévisions des performances.

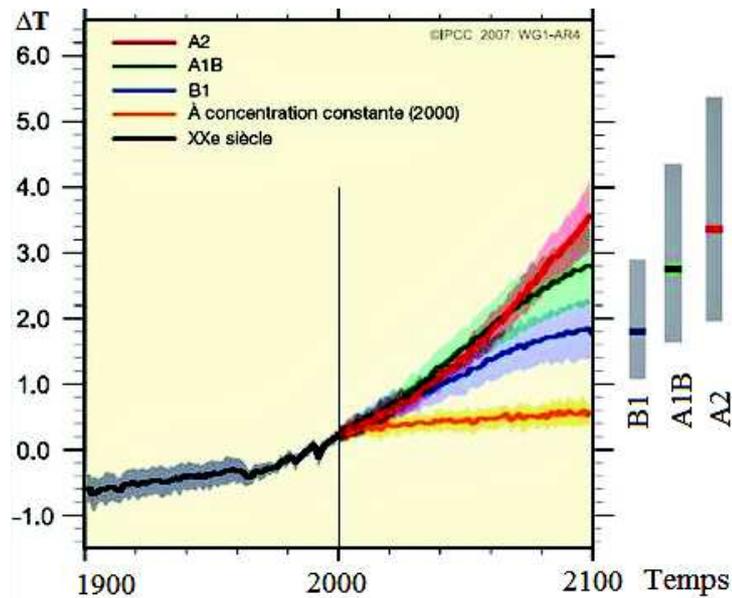


FIGURE 1.15: Différentes projections climatiques [8].

1.4.5 Variabilité du comportement des occupants

Dans le secteur du bâtiment, le confort thermique est défini comme "*un état où l'individu n'a pas à fournir d'effort extérieur pour changer les conditions de l'environnement*" [25]. En d'autres termes, l'occupant est en situation de confort thermique s'il n'éprouve pas le besoin d'avoir recours à une source énergétique extérieure.

Les études réalisées pour réglementer le confort ont pour objectif d'établir des modèles et des indices de confort en se basant sur des études de sociologie. A l'heure actuelle, il existe deux approches qui permettent de définir le confort thermique [25]. La première est l'**approche adaptative**. Cette approche découle des études réalisées sur le terrain. Le but étant d'analyser la réelle acceptabilité de l'environnement thermique, en fonction du contexte, du comportement des occupants et de leurs attentes. La deuxième approche est l'**approche rationnelle** dite du "bilan thermique". Cette approche est basée sur le modèle de *Fanger* [25] et combine les théories de l'équilibre thermique à la physiologie de la thermorégulation. Ce modèle permet de déterminer une gamme de températures de confort. Depuis lors, ce modèle a été étendu et permet aujourd'hui de lier les différentes conditions thermiques à l'échelle de sensation thermique de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE). Ce modèle connu sous le nom de Vote Moyen Prévisible (Predicted Mean Vote (PMV)) a par la suite été utilisé pour déterminer un indice qui permet de connaître le Pourcentage Prévu d'Insatisfaits (Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)) [25].

Le modèle de *Fanger* PMV-PDD (Figure 1.16) est aujourd'hui très utilisé et a servi de base pour la norme internationale ISO 7730 [26]. Trois zones de confort thermiques sont alors définies, en fonction des valeurs de PMV et PPD données comme suit :

$$\begin{cases} \text{PMV} = \alpha \times L = [0.303 \exp(-0.036 M_{cl}) + 0.028] \times L \\ \text{PPD} = 100 - 95 \exp[-0.03353 \text{PMV}^4 + 0.2179 \text{PMV}^2] \end{cases} \quad (1.19)$$

où M_h est la production de taux métabolique [W/m^2], L est la charge thermique sur le corps définie par la différence entre la production de chaleur interne et la chaleur perdue par une personne [W], maintenue à des conditions normales de température de peau, de transpiration et d'évaporation, et α est un coefficient de sensibilité.

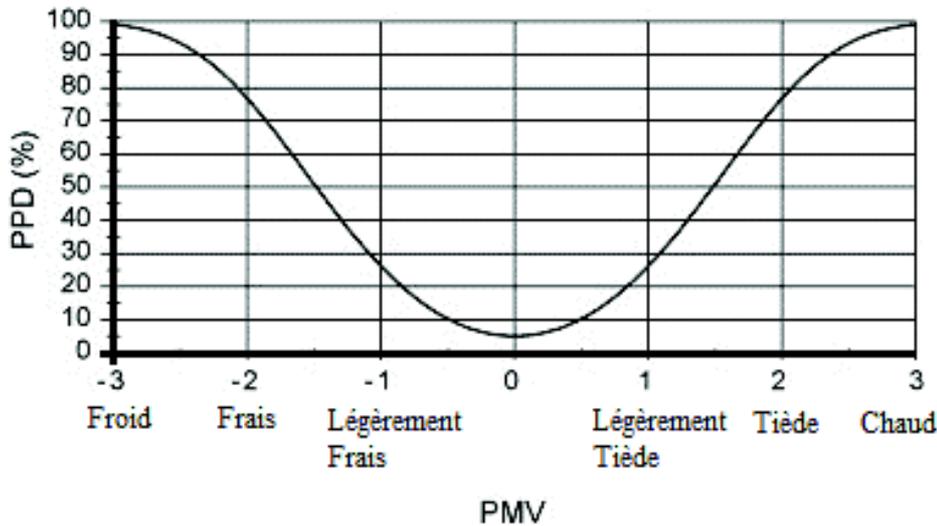


FIGURE 1.16: Relation entre les valeurs de PMV et PPD [25].

La zone de confort thermique est généralement étalée entre la sensation de légère fraîcheur (- 1) et la sensation de légère chaleur (+ 1). Une valeur de PMV nulle exprime la sensation de confort optimale. Une valeur de PMV négative signifie que la température est plus basse que la température idéale. Réciproquement, une valeur positive signale que la température est plus élevée que la température idéale. Dans tous les cas, aucune condition thermique ne peut satisfaire 100% des individus et dans le cas le plus favorable il subsiste 5% de personnes insatisfaites.

Dans ce modèle, une importante part d'incertitude est attribuée à l'effet du métabolisme, qui varie d'une personne à l'autre, en fonction de son âge, sa taille, son sexe et son activité thyroïdienne. Le taux métabolique peut se déterminer soit en mesurant la fréquence cardiaque de l'individu soit en mesurant sa consommation d'oxygène et sa production de dioxyde de carbone. La variabilité liée au comportement de l'individu va donc étroitement dépendre de celle de son métabolisme. Macdonald (2002) [3] indiquent trois sources d'erreurs liées aux données métaboliques :

- les erreurs de mesure liées à l'équipement (*erreurs systématiques/aléatoires*);
- la qualité de réalisation d'une activité qui dépend de la personne (*erreur systématique*);
- la description de l'activité qui est liée à la qualité de la description et qui dépend d'une personne à une autre (*erreur systématique*).

Dans la littérature, quelques études ont été réalisées pour évaluer les consommations énergétiques en considérant la variabilité du comportement des occupants. Une partie de ces travaux s'oriente vers l'étude de l'influence du style de vie des occupants (densité des familles) sur la consommation énergétique, en montrant également les différentes interactions entre les modes d'occupation et les taux d'isolation [27, 28]. D'autres

études s'intéressent à l'évaluation de l'impact des activités des occupants sur la performance énergétique, telles que l'utilisation du système d'éclairage, fenêtres, utilisation des stores, fours et plaques de cuisson, etc. [28, 29].

1.5 FIABILITÉ DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES

Dans un contexte général, la fiabilité est définie par : "*la probabilité d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné*" (AFNOR) [30]. En contexte énergétique, si la réponse d'une isolation dépend du comportement physique des matériaux et du type d'amplitude des actions appliquées, le caractère acceptable ou non de cette réponse est quant à lui fonction de la satisfaction des exigences.

Contrairement aux exigences structurales qui sont souvent exprimées en termes de résistances, les principales exigences dans notre cas sont de nature énergétique et économique. Ces exigences de performance sont réparties en trois catégories :

- la sûreté énergétique, qui garantit la performance thermique du système face aux actions prévues en situation normale ;
- l'aptitude au service, qui permet le maintien de l'exploitation de l'isolation sans risque pour la santé humaine ;
- la durabilité, qui décrit l'aptitude de la structure à demeurer en état d'accomplir ses fonctions de sûreté énergétique et d'aptitude au service dans des conditions données d'utilisation et de maintenance sur une Durée De Vie (DDV) prédéfinie.

Ces exigences qui doivent être satisfaites, sont définies en termes d'états limites. La violation d'un état limite est alors synonyme de non-garantie.

1.5.1 Analyse de fiabilité

La conception d'un système structural implique la vérification d'un certain nombre de règles qui résultent de la connaissance du comportement mécanique ou physique mais aussi de l'expérience des concepteurs et des fabricants. Chaque règle représente un événement élémentaire associé à un certain scénario de défaillance [31]. Dans notre cas, concevoir une isolation implique la vérification d'un certain nombre d'exigences imposées par la réglementation (consommation énergétique, confort d'été, etc) mais aussi les exigences du propriétaire (budget, types de matériaux, etc). L'analyse de fiabilité nécessite une bonne connaissance du système permettant de décrire les scénarios de défaillance [31, 32], séparant les situations de bon fonctionnement des situations de défaillance. La fiabilité étant complémentaire à la défaillance.

$$P_f = 1 - R \quad (1.20)$$

où R est la fiabilité et P_f est la probabilité de défaillance.

L'analyse de fiabilité se résume à l'évaluation de la probabilité de défaillance par rapport à chacun des scénarios de défaillance considérés. Un scénario de défaillance permet de définir une *marge de sûreté* ou un *état limite* qui peut être explicité mathématiquement sous forme d'une fonction appelée "*Fonction d'état limite*" ou "*Fonction de*

performance". Cette fonction fait alors intervenir les différentes variables de conception déterministes "d" ainsi que les variables aléatoires "X".

La fonction de performance notée G définit le domaine de sûreté par $G(d, X) > 0$ et le domaine de défaillance par $G(d, X) \leq 0$. La probabilité de défaillance est alors la probabilité que la fonction de performance $G(d, X)$ soit inférieure ou égale à zéro. En d'autres termes, cette probabilité n'est que l'intégration de la densité conjointe de probabilité sur le domaine de défaillance [31].

$$P_f = \text{Prob}[G(d, X) \leq 0] = \int \dots \int_{G(d, X) \leq 0} f_X(d, X) dx \tag{1.21}$$

L'estimation de cette intégrale n'est cependant pas une tâche facile, car la distribution conjointe de probabilité $f_X(d, X)$ est rarement connue, d'une part, et la fonction de performance G est généralement implicite, résultant d'un modèle numérique, d'autre part. Cependant, il existe différentes méthodes de résolution basées sur une intégration numérique ou sur des approximations ; pour plus de détail se référer aux travaux de Sudret and Der Kiurighian (2000) [33], Lemaire (2005) [32], Aoues (2008) [31].

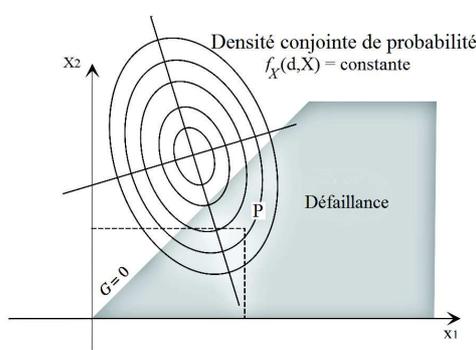


FIGURE 1.17: Représentation de P_f par courbes d'isodensité de probabilité [32].

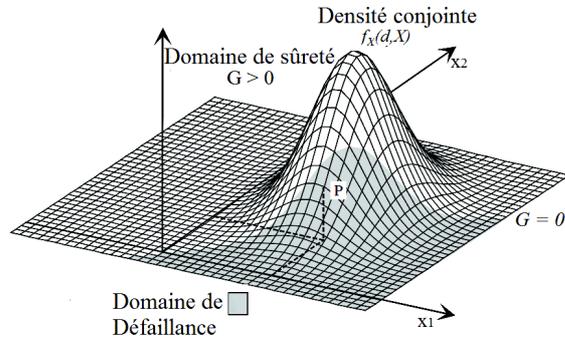


FIGURE 1.18: Représentation tridimensionnelle de P_f pour une loi Gaussienne de 2 variables (x_1, x_2) corrélées [32].

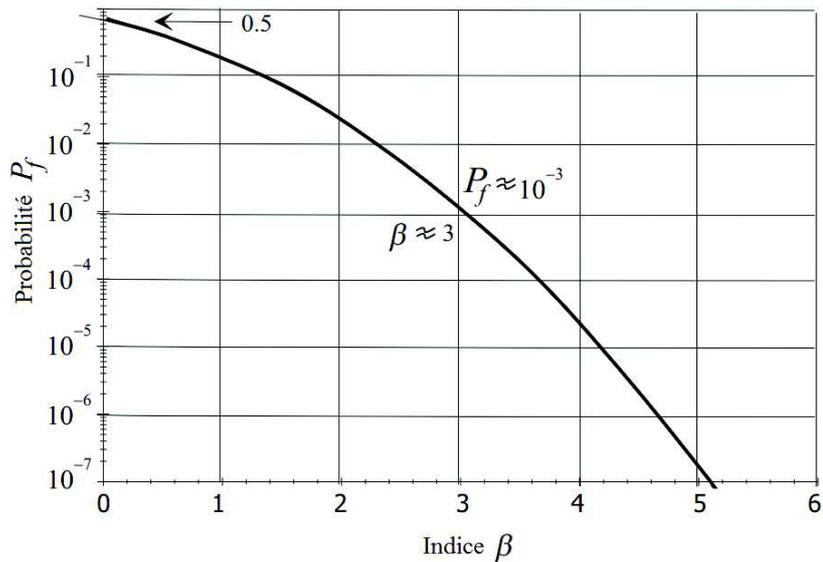
En pratique, l'ordre de grandeur de la probabilité de défaillance est généralement faible. De ce fait, il est possible de traduire sa valeur en terme d'indice de fiabilité β (Figure 1.19), calculé comme suit :

$$\beta = - \Phi^{-1}(P_f) \tag{1.22}$$

où $\Phi(\cdot)$ représente la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

En fiabilité des structures, les normes proposent des valeurs de probabilité de défaillances et/ou d'indice de fiabilité cibles permettant de classer les structures étudiées. Ces valeurs constituent le seuil minimal conventionnel que doit vérifier l'ouvrage selon son importance.

A titre d'exemple, le tableau 1.3 indique les valeurs recommandées de l'indice de fiabilité, en fonction du type de défaillance et de la gravité des conséquences.

FIGURE 1.19: Relation $P_f = \Phi(-\beta)$ [32].

Conséquence de la défaillance	Type de défaillance		
	Ductile avec réserve	Ductile sans réserve	Fragile
Pas grave	3,1	3,7	4,3
Grave	3,7	4,3	4,7
Très grave	4,2	4,7	5,2

Tableau 1.3: Valeurs cibles de β [34].

1.5.2 Durée de vie et fiabilité - Fiabilité dépendant du temps

Si l'on considère la formulation la plus simple de la fonction de performance (1.23), la défaillance du système se produit lorsque la sollicitation appliquée S dépasse la résistance du système d'isolation R .

$$G(d, X, t) = R(d, X, t) - S(d, X, t) \quad (1.23)$$

où G est la fonction d'état limite, d sont les variables de conception et X sont les variables aléatoires.

Comme nous pouvons le constater dans la formulation de l'état limite (1.23), la dimension temporelle apparaît explicitement, car la résistance et la sollicitation sont toutes les deux fonction du temps. En contexte énergétique, la résistance thermique de l'isolation diminue dans le temps sous l'effet du vieillissement et de la dégradation des propriétés internes de la structure. Pareillement, la sollicitation peut varier si l'on considère par exemple, l'action climatique (Figure 1.20). Ces deux types de dépendance temporelle peuvent être présents simultanément ou pas, et sont de nature différente : les phénomènes de dégradation de la résistance ont une cinétique monotone (décroissante au cours du temps) alors que les chargements sont au contraire de nature oscillante [35].

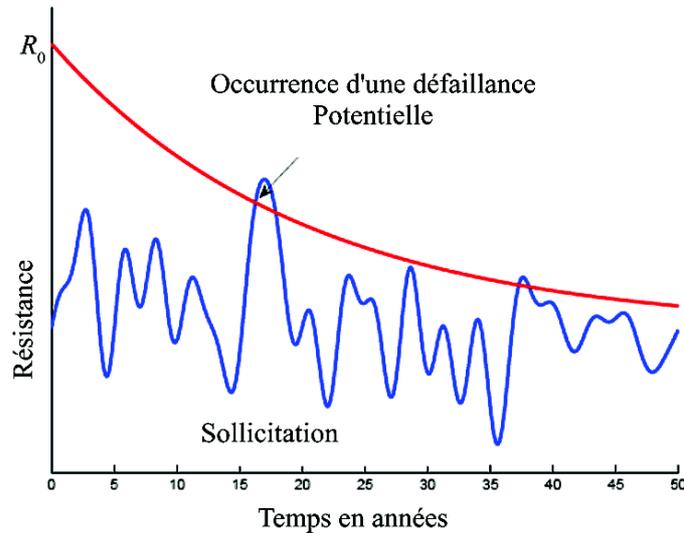


FIGURE 1.20: Processus stochastique et dégradation de la résistance [31].

L'approche de la fiabilité dépendant du temps repose sur une modélisation fine des mécanismes de dégradation et de vieillissement (pour la résistance) et des processus stochastiques (pour la sollicitation). Ainsi, la défaillance d'un système résulte des deux phénomènes combinés. D'une part, la réduction de la résistance et d'autre part, les actions aléatoires extrêmes dont la probabilité d'occurrence augmente avec la durée d'exposition [31]. En d'autres termes, la fiabilité dépendant du temps peut être approximée par une succession de problèmes indépendants du temps, pour différentes valeurs de t . A l'instant où la performance n'est plus assurée, le système d'isolation est supposé défaillant et inapte à remplir sa fonction. La durée de vie est alors définie comme étant le temps entre la mise en service et la survenue de cette défaillance.

En contexte énergétique, le mode de défaillance peut être défini en termes de consommations énergétiques, de températures (liées au confort thermique par exemple), de pollution (GES émis), de pertes de chaleur, etc. A titre d'exemple, dans le cas d'un mode de défaillance en termes de consommations énergétiques, nous devons vérifier que la consommation annuelle E_c , qui dépend de la résistance de l'isolation et l'agressivité climatique, est toujours inférieure à Consommation d'énergie primaire maximum (C_{epmax}) :

$$G(d, X, t) = C_{epmax} - E_c(d, X, t) \quad (1.24)$$

1.5.3 Estimation de la probabilité de défaillance

La probabilité de défaillance peut être évaluée par une des méthodes suivantes :

1. **intégration directe** : ce calcul ne peut être mené que dans des cas particulièrement favorables où les fonctions de densité ont des formes simples [32];
2. **intégration numérique** : l'intégration pourrait *a priori* être effectuée numériquement, cependant, la très faible valeur de la probabilité de défaillance conduit à

des erreurs importantes ; les logiciels de calcul formel ou numérique peuvent être utilisés pour cette intégration [32] ;

3. **simulations de Monte-Carlo** : la méthode de Monte-Carlo (MC) consiste à simuler des réalisations de l'état limite et à compter le nombre d'événements de défaillance observés. La fréquence des événements de défaillance permet d'estimer la probabilité de défaillance. La méthode de MC est très robuste et constitue le moyen le plus sûr pour l'évaluation de la probabilité de défaillance [31, 32].
4. **méthodes d'approximation** : les méthodes les plus utilisées sont les méthodes du premier et du second ordre FORM/SORM (First/Second Order Reliability Methods), qui sont très efficaces pour le calcul de la fiabilité. Ces méthodes sont basées sur la recherche du point de conception, appelé aussi point de défaillance le plus probable [31].

1.5.4 Intérêt de l'analyse de fiabilité

En contexte énergétique, la prise en compte des incertitudes en modélisation de l'énergie est nécessaire pour faire face au défi énergétique actuel (sous-section 1.4.1). En règle générale, l'utilisation de coefficients de sécurité permet d'atténuer le rôle de ces incertitudes et d'introduire ainsi une marge de sécurité afin d'augmenter la sûreté de la conception adoptée. Cependant, ces coefficients ne sont pas liés de manière directe à l'exigence de fiabilité pouvant entraîner des manques de robustesse de la solution adoptée. La conception est alors déséquilibrée par rapport aux paramètres sensibles et finalement, l'investissement économique pourrait ne pas être justifié.

L'analyse de fiabilité permet de prendre en compte un très large spectre d'incertitudes. La probabilité de défaillance donne une mesure du degré de confiance à accorder à l'isolation. En conception, l'intégration d'une contrainte de fiabilité permettrait d'obtenir une conception équilibrée, en vérifiant une exigence de fiabilité minimum tout en réduisant l'espérance du coût total.

Pour vérifier cette exigence minimum, il suffit de fixer une valeur de référence de la probabilité de défaillance que l'on juge acceptable : on appelle cette valeur la *probabilité de défaillance cible* P_{f0} . Pour un mode de défaillance donné, nous devons alors vérifier que :

$$P_f \leq P_{f0} \quad (1.25)$$

La prise en compte des incertitudes dans les outils de simulations actuels permettrait de fournir aux acteurs du bâtiment des outils dont les bénéfices sont :

1. au niveau de l'habitat :
 - maîtriser les dépenses énergétiques ;
 - assurer le confort, la santé humaine et la sécurité énergétique ;
 - atteindre des coûts acceptables.
2. au niveau de la société :
 - maîtriser la demande de l'énergie ;
 - atteindre les exigences du protocole de Kyoto ;

- développer des stratégies de développement durable ;
- limiter les impacts environnementaux.

1.6 SYNTHÈSE

L'amélioration des performances énergétiques des bâtiments est un moyen économique pour combattre le changement climatique et pour améliorer la sûreté énergétique du pays. Les réglementations actuelles spécifient des exigences énergétiques à adopter pour pouvoir maîtriser et garantir la performance des bâtis.

Dans la pratique, il est encore difficile de prévoir la performance réelle des bâtiments à long terme car les paramètres utilisés dans les modèles de simulation actuels ne sont pas totalement maîtrisés. L'utilisation des méthodes probabilistes permet de considérer les incertitudes liées aux paramètres des modèles pour une meilleure prévision des performances. Néanmoins, le passage aux méthodes probabilistes est freiné par le manque d'études statistiques concernant les variables d'entrée et par la complexité des calculs probabilistes. Pour cela, il est nécessaire :

- d'identifier les différentes sources d'incertitude ;
- d'identifier la distribution de probabilité permettant de décrire les paramètres incertains ;
- d'implémenter des méthodes quantitatives pour analyser l'impact sur les résultats de simulation.

Ce modèle permettra :

1. d'assurer la fiabilité des performances énergétiques ;
2. d'évaluer proprement les options de conception et de prendre des décisions basées sur le risque ;
3. d'effectuer des analyses de sensibilité pour identifier les paramètres les plus influant sur la fiabilité de l'isolation.

Dans la suite de ce travail, nous développons trois types de variabilité affectant la performance de l'enveloppe du bâtiment :

- variabilités liées aux matériaux d'isolation : nous constatons de larges variations liées aux caractéristiques des matériaux dues aux erreurs de mesure, aux défauts de fabrication, aux conditions de transport et de stockage aussi qu'aux conditions de vieillissement (chapitre 2) ;
- variabilités liées à la qualité de mise en œuvre, qui dépend de la qualité de la main d'œuvre employée et des défauts engendrés par des besoins pratiques de conception ou de montage (chapitre 3) ;
- variabilités liées à l'environnement extérieur, qui dépend de l'évolution climatique encore très difficile à prévoir à long terme (chapitre 4).

Enfin, la dimension économique sera étudiée et les impacts socio-économiques de l'isolation sont intégrés dans un schéma d'aide à la décision (chapitre 5).

CHAPITRE II

MATÉRIAUX D'ISOLATION

2.1 INTRODUCTION

En phase d'exploitation, le comportement des bâtiments peut ne pas correspondre au comportement prédit lors de la conception. Une des raisons susceptibles d'expliquer cet écart réside dans la variabilité de la performance intrinsèque des matériaux utilisés.

Dans ce chapitre, nous présentons différents types d'isolants utilisés pour les façades et les facteurs susceptibles d'influer sur leur performance thermique tout au long de leur Durée de Vie (DDV). Par manque d'informations sur la variabilité des matériaux d'isolation, une étude de caractérisation est proposée, et l'incertitude associée à chaque type de matériau est quantifiée et décrite grâce à des lois de probabilité. Enfin, un cas d'étude permet d'évaluer l'impact des incertitudes thermo-physiques sur la performance de l'isolation et de mesurer l'évolution à long terme de la fiabilité des performances énergétiques en fonction du type d'isolant choisi et de l'incertitude associée.

2.2 PERFORMANCE DES MATÉRIAUX D'ISOLATION

Au cours des dernières décennies, les bâtiments écologiques sont apparus pour atténuer les effets environnementaux et économiques actuels du secteur du bâtiment [36]. L'objectif est d'améliorer le processus de conception, en concentrant l'effort sur les matériaux et les techniques d'isolation que sur le choix des technologies. A l'heure actuelle, de nombreux isolants sont disponibles sur le marché de la construction, et la recherche permet continuellement d'en améliorer la structure interne. Tatsidjodoung et al. (2013) [37] ont mis en revue les différents matériaux conservateurs de chaleur utilisables dans le bâtiment et les ont classé en fonction de leur capacité de stockage de la chaleur, on distingue :

1. **Matériaux à système de stockage sensible** : ces matériaux utilisent l'inertie du bâtiment pour stocker la chaleur lorsqu'il est trop chauffé, la chaleur est récupérée par la suite lorsque l'on en a besoin grâce à un système de ventilation spécifique, ou par convection naturelle.
2. **Matériaux à système de stockage de chaleur latente** : basé sur la notion de chaleur gagnée ou perdue lorsque le matériau change de phase. Pour les applications résidentielles, ces matériaux sont utilisés pour diminuer l'effet des fluctuations de température. Depuis quelques années, les recherches s'intéressent de plus en plus à l'intégration effective de ces matériaux à changement de phase dans les panneaux muraux, les plafonds et les planchers.

3. **Matériaux à stockage de chaleur thermochimique** : dans ce cas, la chaleur est stockée suivant un processus chimique. On utilise une source d'énergie (électrique, thermique ou électromagnétique) pour activer une réaction chimique réversible. L'énergie emmagasinée est alors récupérée en inversant la réaction.

En pratique, les techniques d'isolation sont moins dépendantes des matériaux isolants eux-mêmes que des grandes familles auxquelles ils appartiennent, selon qu'ils soient proposés sous forme de panneaux, de rouleau ou en vrac. En effet, leur forme détermine souvent le type d'application, au sol, au mur, en toiture, etc. Bien évidemment, chaque matériau présente des caractéristiques qui lui sont spécifiques, à commencer par ses performances d'isolation [10].

Sur le marché de l'isolation, différents types d'isolants existent [38] :

1. **Matériaux fibreux inorganiques** : ce sont des matériaux, tels que la fibre de verre ou la laine de roche, où les fibres sont généralement obtenues par centrifugation d'un liquide vitreux obtenu par diffusion de minéraux. Leur masse volumique peut varier d'un facteur de 10 ce qui permet de nombreuses applications.
2. **Matériaux fibreux organiques** : ces matériaux sont constitués de fibres organiques naturelles telles que le coton, la cellulose, la paille, le chanvre et autres fibres de plantes. Ces derniers peuvent être utilisés comme matériaux isolants mais doivent être auparavant traités pour améliorer leurs performances vis-à-vis de l'humidité et de la résistance au feu.
3. **Mousses organiques** : ce sont les mousses de matière plastique telles que le Polyuréthane, le Polystyrène, l'Uréeformaldéhyde, le PVC, le polyéthylène, etc. Dans le bâtiment, le Polyuréthane ainsi que le Polystyrène sont très employés en plus des matériaux fibreux inorganiques.

Le polystyrène peut être expansé puis découpé, pour faire des plaques d'isolants à usage général, mais peu résistantes à l'eau. Il peut aussi être extrudé directement en plaques possédant alors une pellicule les rendant résistantes à l'eau.

Le polyuréthane extrudé possède une conductivité thermique apparente très basse, du moins lorsqu'il est neuf. Il a aussi une très bonne résistance à la compression. Il est utilisé en toiture, sous des dalles, en isolation industrielle et en injections ou projections in-situ. Il est cependant, sensible aux ultraviolets et ne doit pas être exposé aux intempéries.

4. **Mousses inorganiques** : les mousses les plus répandues sont la mousse de verre et le béton cellulaire. Ce sont des matériaux relativement chers mais présentant de bonnes résistances mécaniques. La mousse de verre est totalement étanche à l'eau, elle est généralement utilisée en toiture plate, pour l'isolation des fondations ou pour les dalles soumises à de fortes charges.
5. **Matériaux ligneux** : les bois légers, la paille agglomérée, les panneaux de fibre de bois peuvent être utilisés comme isolants. Le plus courant est la paille agglomérée au ciment, utilisée directement en fond de coffrage.
6. **Isolants naturels** : quelques isolants naturels existent sur le marché tel que, la laine, la fibre de chanvre ou la cellulose mais le plus répandu est le liège. Ce dernier est un isolant naturel qui a été beaucoup utilisé, notamment en panneaux

de déchets agglomérés au bitume, pour les toitures plates. Son prix fait qu'il est actuellement remplacé par les matériaux synthétiques.

7. **Isolation Mince réfléchissante** : ce sont notamment des matelas isolants comportant des feuilles réfléchissantes permettant de réfléchir le rayonnement infrarouge. Toutefois, les autres modes de transfert de chaleur demeurent, notamment la conduction dans l'air et les matériaux du matelas. De plus, ces matelas nécessitent, pour être efficaces, une lame d'air de chaque côté ce qui fait qu'à encombrement égal ils n'isolent pas mieux qu'un matériau classique de bonne qualité. Ils sont généralement employés dans les applications spatiales car la conduction dans l'air est alors supprimée.
8. **Isolation exceptionnelle** : en y mettant les moyens on peut diminuer fortement la conduction, supprimer la convection et réduire presque à zéro les échanges par rayonnement. On obtient ainsi des isolants thermiques exceptionnellement efficaces.
 - *L'isolation thermique dans l'espace* est particulièrement facile à réaliser. Le vide spatial supprime la convection et la conduction et seul le rayonnement reste. Une feuille réfléchissante assure alors une isolation thermique presque parfaite.
 - *L'isolation sous vide* consiste à évacuer l'air d'un support fibreux ou cellulaire emballé dans une feuille étanche. La convection de l'air interne est ainsi supprimée et le rayonnement ne passe pas au travers de l'enchevêtrement des fibres ou des parois des cellules. Il ne reste plus que la conduction des parois des cellules ou des fibres. Un support est cependant indispensable pour éviter que l'emballage ne s'écrase sur lui-même sous l'effet de la pression atmosphérique.

Dans la littérature, la majorité des travaux s'intéressent aux matériaux usuels utilisés en construction tels que le polystyrène, la laine minérale, les fibres de verre et le polyuréthane [39, 40, 41, 42, 43]. Toutefois, on s'intéresse depuis peu au développement d'autres matériaux à meilleure structure interne tels que les isolants multi-couches à très faibles conductivités thermiques effectives¹ [44, 45].

2.2.1 Caractérisation des matériaux d'isolation

La conductivité thermique est la propriété primaire caractérisant les isolants. Cette caractéristique dépend de plusieurs facteurs à différentes échelles.

Au niveau **microscopique**, la conductivité apparente dépend de :

- la taille des cellules ;
- le diamètre et l'arrangement des fibres et particules ;
- la transparence et le rayonnement thermique ;
- le type et la pression du gaz ;

¹ A titre d'exemple, en France, le CSTB et le Syndicat des fabricants d'isolants réflecteurs minces multi-couches (SFRIMM) en collaboration avec d'autres instituts européens, ont développé deux maisons tests, l'une isolée avec de la fibre minérale et l'autre en utilisant l'isolation multi-couches, pour pouvoir comparer par la suite la performance de ces isolants en terme d'utilisation énergétique.

- les liants utilisés, etc.

Tandis qu'au niveau **macroscopique**, la conductivité dépend de :

- la masse volumique ;
- la teneur en eau ;
- la température ;
- l'âge².

En laboratoire, il existe plusieurs méthodes pour mesurer les propriétés thermiques d'un isolant, elles sont généralement toutes basées sur le même principe qui consiste à appliquer un gradient de température à l'échantillon puis à mesurer la réponse du matériau dans le temps (voir Annexe A). Dans la littérature, les méthodes les plus utilisées sont celles de la plaque chaude gardée et de la chambre chaude (Hot box), car elles donnent les meilleurs résultats, contrairement aux mesures in-situ (sur des maisons tests par exemple), qui sont affectées par de nombreux facteurs extérieurs, à la fois sensibles et incontrôlables [44].

En pratique, la valeur déclarée de la conductivité est généralement fournie par le fabricant et certifiée sur la base d'un agrément technique. L'ingénieur se base le plus souvent sur ces valeurs standards qui sont tabulées par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), l'ASHRAE et le Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). Ces valeurs représentent généralement des valeurs extrêmes ou des valeurs de conception satisfaisantes, obtenues dans des conditions de référence de température et d'humidité (d'après la norme EN – ISO10456) [46].

2.2.2 Influence de la température et de l'humidité

2.2.2.1 Influence de la température

Pour les matériaux homogènes non poreux, on observe en général une évolution quasi-linéaire de la conductivité thermique λ avec la température T . Cependant, pour les matériaux du bâtiment, le problème est différent parce qu'ils sont pour la plupart poreux. Nous distinguons deux cas [47] :

- lorsque les porosités sont petites par rapport aux dimensions des éléments utilisés (épaisseur), on peut considérer une conductivité thermique équivalente qui caractérise globalement le matériau (squelette solide et pores) ;
- lorsque les porosités sont plutôt grandes, le phénomène de convection intervient. Quant au rayonnement mutuel des parois des porosités, il ne semble pas être très influent aux températures usuelles. Les modèles font apparaître un comportement où trois zones sont à distinguer (Figure 2.1) :

- A. Zone I où l'évolution de λ est proportionnelle à \sqrt{T} .
- B. Zone II où l'évolution de λ est quasi-proportionnelle à T .
- C. Zone III où l'évolution de λ est proportionnelle à T^3 .

² Selon l'ISO 10456, les effets de l'humidité, de la température et de l'âge sont indépendants [46].

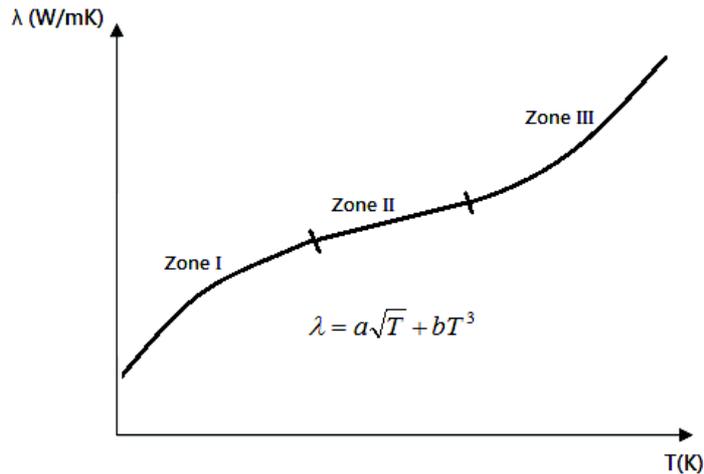


FIGURE 2.1: Conductivité des matériaux poreux vis-à-vis de la température [47].

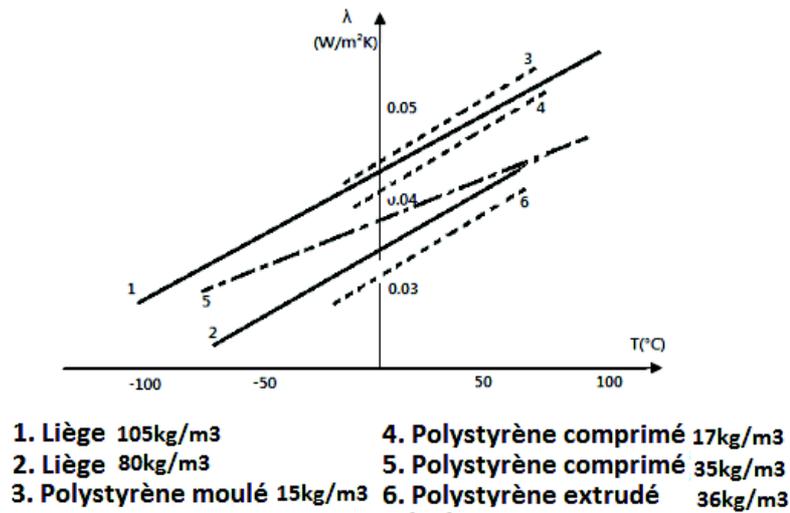
L'expérimentation sur les matériaux fait apparaître que, dans la zone des températures usuelles, on peut effectivement observer des évolutions quasi-linéaires de λ avec la température. On trouve dans les figures 2.2a et 2.2b des résultats relatifs à différents matériaux d'isolation.

Ces figures montrent que le comportement des matériaux est souvent plus complexe que celui obtenu par une modélisation élémentaire (Figure 2.1). Dans le cas du liège et du polystyrène on retrouve l'évolution linéaire de λ tandis qu'avec le polyuréthane (Figure 2.2b), le gaz inclus dans les alvéoles subit des modifications (condensation) ce qui perturbe fortement la conductivité.

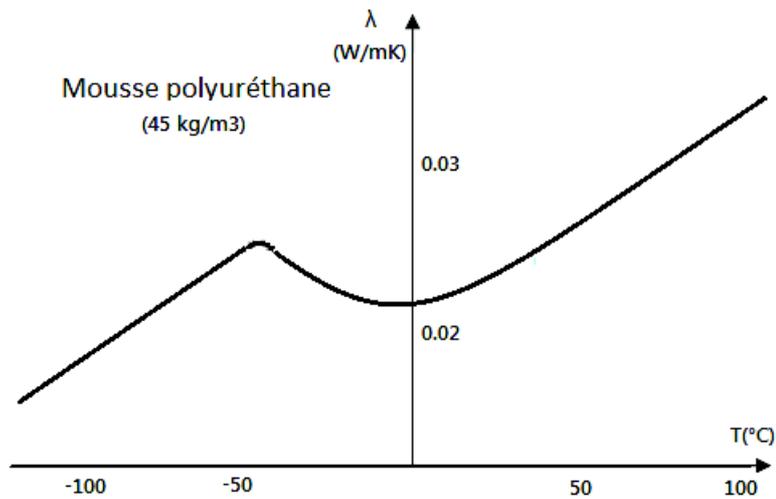
Pour les matériaux ayant un comportement simple, il convient de prendre la valeur moyenne de λ dans l'intervalle de température correspondant au problème étudié (de -15°C à $+25^\circ\text{C}$ environ pour les problèmes classiques d'isolation). Par définition, la valeur moyenne est obtenue par :

$$\lambda = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \lambda_{(T)} dT \quad (2.1)$$

Par exemple, dans le cas particulier de la laine minérale, la valeur à prendre en compte sera nettement différente lorsqu'il s'agit d'un mur de bâtiment ou d'une paroi de four industriel.



(a) Dans le cas du liège et du polystyrène.



(b) Dans le cas du polyuréthane.

FIGURE 2.2: Evolution de la conductivité en fonction de la température pour quelques isolants[47].

2.2.2.2 Influence de l'humidité

En ce qui concerne l'influence de l'humidité, il faut distinguer deux aspects : l'influence de la *vapeur* et l'influence de l'*eau à l'état liquide*.

- A. **Equilibre hygroscopique** : les matériaux poreux placés dans une atmosphère contenant de la vapeur d'eau (air ambiant) se mettent en équilibre hygroscopique avec cette ambiance. La vapeur pénètre dans le matériau et les molécules d'eau se fixent par adsorption sur la surface interne des pores. Il se forme un film monomoléculaire pour les humidités faibles puis polymoléculaire pouvant aller jusqu'à la création de ménisques dans les infractuosités pour les fortes humidités. La rapidité avec laquelle l'équilibre hygroscopique s'établit dépend de la perméabilité à la vapeur du matériau. On peut exprimer cet équilibre par un diagramme, donnant en fonction de l'humidité ambiante, l'humidité du matériau (i.e. sa teneur en eau).

Pour caractériser cette teneur en eau, on utilise soit le rapport de la masse d'eau contenue à la masse du matériau sec, soit le rapport du volume d'eau contenu au volume total.

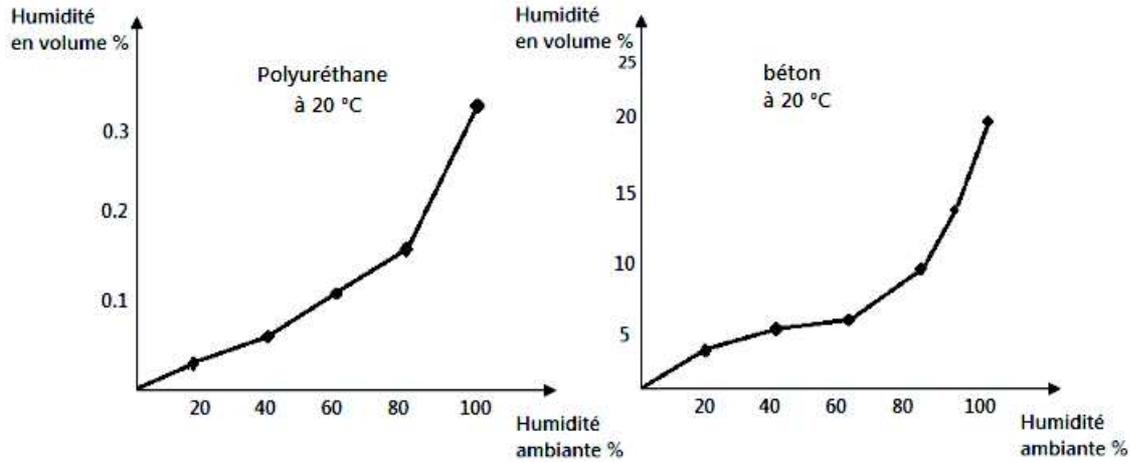


FIGURE 2.3: Diagramme d'humidité dans le cas du polyuréthane et du béton [47].

La figure 2.3 montre deux exemples de ces diagrammes, où l'on constate que le béton fixe beaucoup plus d'eau que le polyuréthane. Ceci s'explique par les pores du béton, très petits mais très nombreux, qui développent une surface d'adsorption plus grande par rapport au cas du polyuréthane à porosité millimétrique.



FIGURE 2.4: Evolution de la conductivité thermique en fonction de l'humidité [47].

La figure 2.4 montre l'influence de la teneur en eau du matériau sur la conductivité thermique, en référence au matériau sec. Dans le domaine du bâtiment, on définit une humidité dite "utile" qui correspond à l'humidité moyenne du matériau en service, dans les conditions normales de son utilisation. Pour la brique, l'humidité utile est de 0,5% en volume et pour le béton elle peut aller de 2 à 5% selon sa composition. Le coefficient λ correspondant à ces humidités est la conductivité utile à prendre en compte dans les calculs thermiques du bâtiment. Le tableau 2.1 donne quelques exemples de matériaux de construction. En ce qui concerne les matériaux isolants, dans le cas présent de l'équilibre hygroscopique, l'influence de l'humidité est plus faible car la fixation d'eau reste limitée par des macro-

porosités. L'humidité utile retenue est celle correspondant à une atmosphère à 20°C et 65%. Ainsi, pour un polyuréthane de $\lambda_{sec} = 0,026 \text{ W/mK}$ la valeur utile est de $\lambda = 0,029 \text{ W/mK}$ soit un écart de 10% [47].

Matériau	Humidité utile	$\lambda \text{ sec (W/m.K)}$	$\lambda \text{ utile (W/m.K)}$	$\frac{\lambda_{sec}}{\lambda_{utile}}$
Brique	0,5%	0,96	1,15	1,20
Béton	3%	1,13	1,75	1,55
Béton	4%	0,41	0,70	1,70
Béton cellulaire	6%	0,11	0,20	1,85

Tableau 2.1: Evolution de la conductivité à différents degrés d'humidité du matériau [47]

- B. Mise en contact direct avec l'eau :** si le matériau est mis en contact avec l'eau, son comportement est différent ; l'eau à l'état liquide pénètre avec plus ou moins de facilité dans les pores. Par exemple, un polystyrène courant absorbera 3 à 5% d'eau en volume après 100 jours sous un mètre d'eau, parce que les cellules sont fermées et cloisonnées par un matériau étanche à l'eau (mais non à la vapeur). A l'opposé, la laine de verre se gorge immédiatement d'une très grande quantité d'eau. On peut ainsi juger de l'aptitude d'un matériau à être exposé aux intempéries sans perdre ses propriétés thermiques.
- C. Mise en contact indirect avec l'eau :** cela peut se produire par capillarité, par exemple. C'est le cas des fondations placées sous le niveau de nappes. Pour un isolant, l'hydrophilie est une caractéristique défavorable qui amplifie l'effet d'un contact local avec l'eau. Un cas classique en isolation est la pénétration de la vapeur d'eau dans les pores (problème hygrométrique) suivie de la condensation de la vapeur à l'intérieur même des pores. Ceux-ci se remplissent d'eau liquide par l'intérieur même des pores, malgré une éventuelle bonne étanchéité à l'eau. La conductivité thermique de l'isolant se rapproche alors de celle de l'eau ($\lambda = 0,5 \text{ W/mK}$).

Dans le cas du polyuréthane, il peut se remplir jusqu'à 40% d'eau en volume multipliant ainsi sa conductivité thermique par vingt. Il est à noter que les deux phénomènes de transfert de chaleur et de vapeur sont couplés par les caractéristiques des matériaux. Dans la pratique, on considère souvent une conductivité constante du matériau, prise égale à la conductivité utile, ce qui découple les deux problèmes de transfert [47].

En général, la modification des propriétés thermiques n'est pas forcément considérée comme une source de dommage physique pour le bâtiment. Cependant, la sensibilité des murs à la teneur en eau doit être évaluée car sa présence affecte l'efficacité énergétique des bâtiments. En effet, puisque la conductivité thermique de l'eau est 25 fois plus importante que la conductivité de l'air, des niveaux de pertes de chaleur très importants pourraient être constatés, notamment avec les matériaux poreux. En général, on estime que 1% de teneur en eau en plus est associée à 3 voire 5% de pertes de chaleur additionnelles [48].

La variation de la conductivité thermique en présence d'humidité est généralement calculée grâce à la relation linéaire suivante [48] :

$$\lambda(w) = \lambda_s + b w \quad (2.2)$$

où λ_s est la conductivité thermique du matériau à l'état sec, w est la teneur en eau du matériau [kg/m^3] et b est le gradient de conductivité thermique par rapport à w . Ce modèle est basé sur des mesures expérimentales et des valeurs de b sont données dans les travaux de Hall and David (2009) [49].

Les études sur le rôle de l'humidité sont poussées par un besoin économique mais surtout social, car la présence d'humidité dans le bâtiment altère la qualité de l'environnement intérieur. Les différents types de détérioration étudiés sont : (1) les dommages dus à l'action directe de l'humidité, (2) les dommages activés par l'humidité, (3) les dommages qui apparaissent dans des environnements humides et enfin (4) la détérioration de l'environnement intérieur [48].

Pour lutter contre ces détériorations, il est important de pouvoir considérer tous les facteurs susceptibles d'engendrer ces dommages, dans les modèles de simulation. De nombreux auteurs, tels que Berger et al. (2015) [48], Abdou and Budaiwi (2013) [50], Teodosiu et al. (2003) [51], Woloszyn-Vallon (1999) [52], s'y sont attelés et se sont basés sur différentes études pratiques, des guides ou des échanges avec des experts pour améliorer les modèles actuels de prédiction et pour introduire des indicateurs de risque.

2.2.2.3 Simulation des transferts couplés de chaleur et d'humidité

A l'heure actuelle, les phénomènes de transferts couplés de chaleur et d'humidité sont largement étudiés. Ils résultent du transport simultané des phases liquide et gazeuse dans les milieux poreux [53]. Ainsi, le transport d'humidité se fait par l'intermédiaire des phases liquide et gazeuse. Tandis que, le flux de chaleur se produit par la variation de l'enthalpie du matériau due :

1. au gradient de densité de flux de chaleur, qui est proportionnelle à la conductivité du matériau et au gradient de température (*loi de Fourier*) d'une part ;
2. au gradient du flux de chaleur transporté par le flux d'humidité d'autre part.

Dans la littérature, nous retrouvons de nombreux modèles de transfert hygrothermique, nous citons notamment les modèles de *Krischer et Kroll*³ [54], de *De Philip et De Veries*⁴ [55] ou de *Luikov* [55]. Pour les milieux poreux, le modèle de *Luikov* met en évidence le phénomène de thermo-diffusion et considère que le gradient de température est le facteur de migration du liquide à l'intérieur du produit.

Pour la modélisation, l'application des lois de conservation aux différentes phases permet d'obtenir les équations de couplage du transfert hygrothermique. *Luikov* suppose que les flux de liquide \vec{J}_l et vapeur \vec{J}_v sont induits par deux facteurs : un gradient de concentration et un gradient thermique. Ce qui donne le système d'équations suivant [55] :

$$\begin{cases} \vec{J}_l = -D_l \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) - D_l \delta_l \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(T) \\ \vec{J}_v = -D_v \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) - D_v \delta_v \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(T) \end{cases} \quad (2.3)$$

³ Krischer et Kroll considèrent que l'humidité peut se déplacer sous forme liquide par capillarité et sous forme vapeur sous l'action d'un gradient de concentration en vapeur.

⁴ De Philip et De Veries décrivent les transferts dans les milieux poreux non saturés, où le transport d'humidité est supposé s'effectuer par capillarité et diffusion ou sous l'action des gradient d'humidité, de température et de gravité.

où D_l et D_v sont, respectivement, les diffusivités liquides et vapeurs [m^2/s], θ est l'humidité relative [kg/kg] et δ_l et δ_v sont les coefficients représentant la thermo-migration de liquide et de vapeur. *Luikov* introduit par la suite le taux de changement de phase ϵ' pour expliciter le terme vaporisation-condensation, qui est un paramètre adimensionnel caractérisant la résistance à la diffusion de vapeur dans le matériau. Le terme de la variation temporelle locale de la quantité de vapeur condensée se définit par :

$$\dot{m} = \epsilon' \rho_s \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad (2.4)$$

Le système d'équations différentielles ci-dessous est alors formulé par l'expression de la conservation de l'enthalpie dans les phases solide, liquide et vapeur tout en considérant le flux de chaleur composé du transfert thermique par conduction et d'un terme source résultant des processus d'évaporation-condensation de l'humidité :

$$\begin{cases} \frac{\delta\theta}{\delta t} = \text{div}[D_w(\overrightarrow{\text{grad}}(\theta) + \delta \overrightarrow{\text{grad}}(T))] \\ C_p \rho_s \frac{\delta T}{\delta t} = \text{div}[\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)] + L_v \epsilon' \rho_s \frac{\delta\theta}{\delta t} \end{cases} \quad (2.5)$$

où $D_w = D_v + D_l$ est la diffusivité massique [m^2/s], ρ_s est la masse volumique du matériau [kg/m^3], L_v est la chaleur latente de vaporisation d'eau ($2,26 \times 10^6$ [J/kg]) et δ est le coefficient de thermo-migration $\delta = \frac{D_v \delta_v + D_l \delta_l}{D_v + D_l}$. La résolution de ces équations peut être effectuée numériquement par la méthode des différences finies.

Les modèles de transfert hygrothermique ont été développés dans le but de prédire les risques de dégradation à long terme, en se basant généralement sur la méthode GLASER (calcul stationnaire de diffusion de vapeur) [56]. Toutefois, on constate que d'autres sources d'humidité comme la pluie battante, les remontés capillaires, l'humidité de construction peuvent aussi affecter l'ensemble du bâti, et ces phénomènes ne peuvent être traités avec les modèles de diffusion, car d'autres mécanismes apparaissent, comme la rétention d'eau et le transport en phase liquide. Enfin, l'interprétation de ces résultats dépend de la qualité de l'information en entrée, qui nécessite encore des expérimentations pratiques à grande échelle.

2.2.3 Dégradation et durée de vie

Une *dégradation* est une modification irréversible de la qualité de l'isolant. Différents facteurs sont à l'origine de la dégradation et peuvent apparaître avant la mise en œuvre en phases de production, de stockage ou de transport par exemple, mais surtout pendant la phase d'exploitation.

Le *vieillessement* est quant à lui, une modification irréversible des propriétés physiques de l'isolant due aux conditions physico-chimiques au cours d'une utilisation normale. Nous distinguons deux types de vieillissement :

1. **vieillessement chimique**, qui est dû à des phénomènes d'oxydation, des ruptures de chaînes de polymères, des réticulations, de la formation de sous-produits, etc ;
2. **vieillessement physique**, qui peut être dû aux différents mécanismes de dégradation présentés précédemment. Dans le temps, les fissurations, les gonflements, la pénétration d'eau et l'apparition d'hétérogénéités par migration de composants apparaissent.

Le CSTB a répertorié des centaines de mécanismes de dégradations liés à des facteurs environnementaux ou à des facteurs inhérents au produit. Le tableau 2.2 en donne quelques-uns liés à l'isolation.

Terme	Type du phénomène	Symptômes
Gel-Dégel	Déformation	Gonflement
Arrachement de fixations	Déformation	Mouvement
Exfoliation	Déformation	Mouvement-Décollement
Perforation	Déformation	Mouvement-Rupture
Flambement	Déformation	Mouvement

Tableau 2.2: Exemples de mécanismes de dégradation liés à l'isolation, reportés par le CSTB [57].

Les mécanismes de dégradation les plus couramment observés sont les suivants [57] :

1. **Humidité excessive/innondation** : une forte teneur en humidité de l'isolant dégrade de manière importante son coefficient de conductivité thermique λ . L'humidité peut provenir soit d'une défaillance de l'étanchéité, soit d'une défaillance du pare-vapeur et peut aller jusqu'à l'engorgement complet de l'isolant. En cas de défaillance, l'ampleur des dégâts dépend du type de paroi : murs creux ou pleins, isolés par l'intérieur ou par l'extérieur, planchers ou toitures (inversées, compactes ou chaudes), matériaux d'isolation accessibles facilement ou pas, etc. Les isolants étant, dans la plupart des cas, difficilement accessibles, il est généralement nécessaire de recourir à un scanner, une thermographie ou à un sondage afin d'évaluer les désordres.

Matériau	Sec	10%	20%	50%
Laine minérale	0,045	0,123	0,161	0,315
Verre Cellulaire	0,055	Impossible	Impossible	Impossible
Perlite expansée (Panneaux)	0,060	0,091		
Polyuréthane	0,035		0,049	0,160
Polystyrène expansé	0,045		0,060	0,140
Polystyrène extrudé	0,040		0,052	
Liège	0,055	0,063	0,087	0,120

Tableau 2.3: Dégradation de la conductivité de quelques isolants en fonction de l'humidité [57].

2. **Déformations** : Les déformations peuvent être dues au vieillissement de l'isolant, aux différences de température, à l'humidité ou à des défauts de mise en œuvre. Ces déformations peuvent créer des vides sous l'isolant et provoquer des ponts thermiques (Figure 2.5). Dans le cas des toitures chaudes, elles peuvent amener des tensions dans la membrane d'étanchéité et provoquer également des zones de stagnation de l'eau de pluie.
3. **Tassement** : dans les murs creux, des isolants mal adaptés ou mal fixés se tassent et génèrent des zones non isolées provoquant ainsi des ponts thermiques. Dans le cas des façades, si les isolants placés ne sont pas adaptés à l'usage (isolant

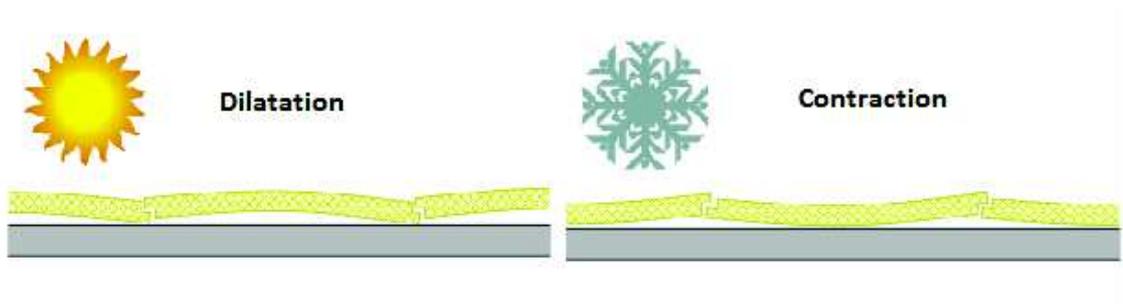


FIGURE 2.5: Comportement de l'isolant en fonction de la température [57].

en rouleau pour toiture inclinée beaucoup trop souple) ou insuffisamment/mal fixés, l'isolant se tasse dans le bas du creux en laissant un vide dans le haut de celui-ci. L'humidité accidentelle de l'isolant peut aussi aggraver le phénomène. L'interruption de l'isolant ainsi provoquée crée l'apparition de ponts thermiques qui sont parfois très importants. Une thermographie infrarouge du mur en hiver permet de diagnostiquer le phénomène.

4. **Ponts thermiques** : les ponts thermiques se créent lorsque l'isolation n'est plus continue, suite par exemple, aux dilatations et retraits successifs de l'isolation (espacement des joints entre panneaux isolants).
5. **Écrasement** : en fonction du type d'isolant, la résistance à l'écrasement dû au poids ou aux charges extérieures varie ; ce qui peut provoquer des affaissements ou des déchirures dans l'isolant. La résistance à l'écrasement varie d'un isolant à l'autre. Lorsqu'une toiture ou un plancher isolé par le haut a été soumis à des charges ponctuelles importantes, l'épaisseur d'un isolant souple peut se réduire, alors que si l'isolant est dur, il peut rompre (Figure 2.6).



FIGURE 2.6: Déchirement de la membrane de l'isolant suite à un écrasement local [57].

6. **Fragilisation par rapport à la délamination et au pelage** : les effets du vent peuvent avoir des conséquences désastreuses sur les toitures. L'effet de succion peut être impressionnant et peut dégrader le matériau par délamination d'où l'intérêt de définir une résistance à la délamination des isolants (par exemple, la résistance à la délamination de la laine de verre est de $0,006 \text{ [N/mm}^2\text{]}$).

Tous les matériaux isolants utilisés en toiture plate résistent suffisamment à la délamination. En service, certains d'entre eux se fragilisent et l'accrochage de la membrane d'étanchéité n'est plus assurée. Des essais d'arrachement permettent de déterminer si la résistance au vent est encore suffisante. Si ce n'est pas le cas,

l'isolant doit être refixé mécaniquement, ou remplacé si ce mode de fixation n'est pas possible en raison de la nature de l'isolant ou du support.

Les risques présentés précédemment apparaissent généralement pendant la mise en œuvre, en cas d'accident ou lorsqu'une intervention directe a lieu, lors de travaux de rénovation par exemple. Toutefois, rares sont ceux qui apparaissent pendant la phase d'exploitation, parce que mis à part quelques applications spécifiques (dont fait partie l'isolation des planchers de combles perdus), le matériau utilisé est toujours placé derrière un revêtement, sans contact direct avec l'ambiance intérieure ou les occupants. Si certains produits peuvent présenter des inconvénients, comme la libération de fibres dans l'air ou l'émission de composés organiques volatils, cette barrière en limite considérablement les effets.

2.3 GARANTIE DE LA PERFORMANCE THERMIQUE DES MATÉRIAUX D'ISOLATION

Le choix des matériaux à utiliser dépend de la performance minimum exigée, de la zone climatique et de l'application. De nombreux auteurs se sont intéressés à la stratégie de choix des matériaux d'isolation [21, 46, 58]. En général, ces stratégies se basent sur l'optimisation multi-objective, la méthode de Rankine, les méthodes basées sur des indices (Index Based Methods) et d'autres méthodes quantitatives telles que l'analyse coûts-bénéfices [36].

Cependant, de nombreux experts pensent qu'il n'existe pas de solutions d'isolation qui garantissent en tout point l'ensemble des exigences réglementaires [59], en raison des incertitudes physiques inévitables. Ces incertitudes réfèrent le plus souvent aux propriétés physiques du matériau tels que sa masse volumique ou sa conductivité thermique mais aussi à sa géométrie approximative, notamment son épaisseur [15, 46].

Dans la littérature, on s'intéresse le plus souvent à la variabilité des propriétés isolantes d'un matériau tout au long de sa DDV. On trouve de nombreuses études expérimentales qui tentent de quantifier la variabilité et la dégradation des propriétés thermophysiques, selon les différents transferts hygrothermiques qui s'opèrent [56, 60, 61, 62]. En général, la variabilité des propriétés est généralement considérée lors de l'évaluation des risques de pertes de performance énergétique à long terme. Cependant, le choix d'une conception ne se base que sur les propriétés initiales des matériaux et ne considère pas cette variabilité à long terme.

Certains auteurs ont tenté de démontrer expérimentalement que le choix de l'isolation devrait être basé sur la variabilité à long terme des propriétés isolantes des matériaux et non pas sur la valeur initiale uniquement [61]. A titre d'exemple, Cabeza et al. (2010) [61] ont comparés l'évolution de la consommation énergétique de trois maisons identiques isolées différemment (Polyuréthane 0,028 W/mK, Polystyrène 0,034 W/mK et Laine minérale 0,035 W/mK) à une maison non isolée. La figure 2.7 présente l'évolution de la consommation énergétique dans le temps, évaluée sur la base de la perte en performance de différents types d'isolant. Les matériaux dont les performances initiales sont les meilleures (tel que le Polyuréthane) s'avèrent les plus adéquats. Toutefois, la courte durée de leur étude (à peine deux ans) fait que l'on ne peut pas juger si la variabilité à long terme des propriétés thermiques contredit l'hypothèse d'un choix basé sur la conductivité thermique initiale.

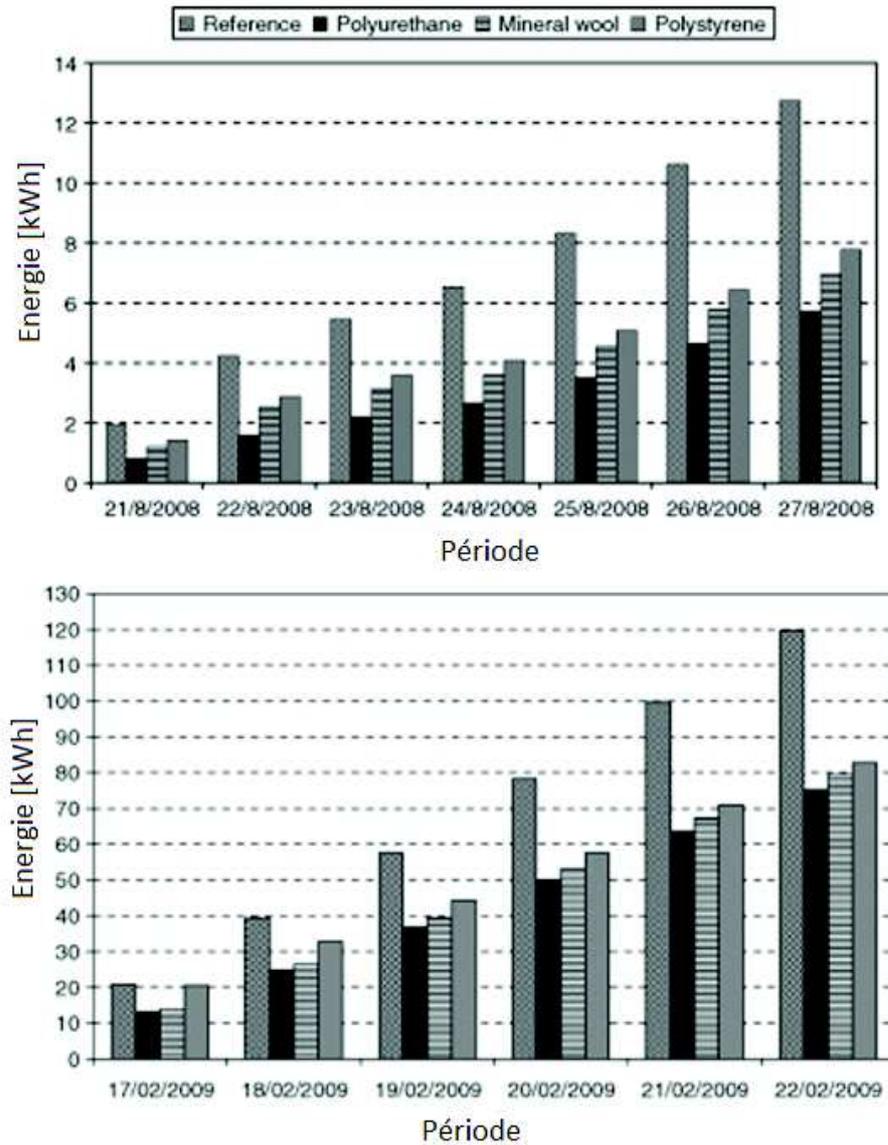


FIGURE 2.7: Evolution de la consommation énergétique (Résultats de l'étude de Cabeza et al. (2010) [61]).

Dans la littérature, les études qui se basent sur la valeur initiale de la conductivité lors de la sélection de l'isolation en phase de conception [63, 64, 65, 66, 67] ne considèrent que la valeur déterministe fournie lors de l'achat. Toutefois, certains auteurs ramènent les écarts de performance des bâtiments à la performance des isolants utilisés qui serait inférieure aux prédictions initiales [3, 20, 22]. Néanmoins, très peu d'études expérimentales permettent de quantifier les incertitudes liées aux performances initiales fournies par les fabricants.

L'étude effectuée par Macdonald (2002) [3] se base sur un rapport de Clarke et al (1990) [3] qui traite l'harmonisation des propriétés thermo-physiques pour l'utilisation en simulation énergétique. Ce rapport contient une base de données internationale et détaille la variabilité des données, ce qui permet d'estimer l'incertitude sur la conductivité thermique de différentes classes de matériaux (non-hygroscopique, inorganique-poreux

et organique-hygroscopique). L'intérêt de cette étude réside dans le fait que l'auteur se base sur un ensemble de données réelles fournies par différents fabricants d'isolants et s'intéresse à l'impact de la température et de l'humidité sur l'incertitude. Le tableau 2.4 présente, suivant la classe du matériau étudié, l'incertitude estimée sur la conductivité thermique en fonction de la température et de l'humidité.

La variabilité considérée dans cette étude, quantifie la différence de performance entre des matériaux de mêmes type mais provenant de fabricants différents. Les résultats montrent que quelle que soit la nature du matériau, à 10°C l'incertitude sur la conductivité des matériaux est de 5%. En ce qui concerne l'humidité, l'auteur a tout d'abord déduit que la teneur en eau que l'on retrouve en général dans les matériaux non-hygroscopiques, inorganiques-poreux et organiques-hygroscopiques est de 1%, 4% et 7% respectivement. Les matériaux soumis à l'humidité présentaient alors une incertitude sur la conductivité thermique qui allait de 5% pour les matériaux non-hygroscopiques à 25% pour les matériaux organiques-hygroscopiques.

Paramètre environnemental		Classes de matériaux		
		Non-hygroscopique	Inorganique-poreux	Organique-hygroscopique
Température	Température	10°C		
	C.V. de λ			
Humidité	Teneur en eau	1%	4%	7%
	C.V. de λ	5%	15%	25%

Tableau 2.4: Incertitude sur conductivité thermique selon la classe de matériau [3].

Plus récemment, une étude de Dominguez-Munoz et al. (2010) [46] a analysé une base de données fabricants pour proposer des modèles de quantification de l'incertitude liée à la conductivité thermique des isolants. L'objectif étant de se baser cette fois sur la masse volumique du matériau utilisé.

Les auteurs ont constatés que lorsqu'un type d'isolant et sa masse volumique sont bien définis, l'incertitude liée à la conductivité aux conditions de référence atteint sa valeur minimale. Ces incertitudes proviennent de deux sources : (1) le fait que la conductivité dépende d'un certain nombre de facteurs incontrôlables, tels que des différences dans le processus de fabrication ou des différences dans les propriétés intrinsèques du matériau et (2) le manque de précision des mesures [46].

Le facteur clé influant sur la conductivité thermique d'un isolant est sa masse volumique, pour une température et une teneur en eau fixées aux conditions de référence. Une relation linéaire permet d'exprimer le lien entre la conductivité λ et la masse volumique moyenne ρ . La partie conductrice de la conductivité thermique totale est la somme de la conductivité de l'air (constante) et de la conductivité de la matrice solide qui augmente avec la masse volumique [46] :

$$\lambda_{\text{conduction}} = a + b \rho \quad (2.6)$$

Enfin, si on considère la partie radiative de la conductivité, les auteurs ont constaté qu'elle est une fonction réciproque de la masse volumique $\lambda_{rad} = \frac{c}{\rho}$, ce qui nous donne une conductivité totale de la forme [46] :

$$\lambda = a + b \rho + \frac{c}{\rho} \quad (2.7)$$

La relation (2.7) est généralement utilisée pour les matériaux ayant des masses volumiques inférieures à 50 kg/m^3 tandis que pour les matériaux de masse volumique supérieure à 50 kg/m^3 , λ_{rad} peut être négligée [46].

Dominguez-Munoz et al. (2010) [46] se sont inspirés de la relation (2.7) pour proposer un modèle analytique de quantification de l'incertitude. Ils distinguent deux cas :

1. **Type et masse volumique du matériau connus** : dans ce cas, la conductivité aux conditions de référence atteint des valeurs minimales. La conductivité est donnée par une loi normale $\lambda \sim N[\mu_\lambda, \sigma_\lambda]$, de moyenne et d'écart-type :

$$\mu_\lambda = a + b \rho + \frac{c}{\rho} \quad (2.8)$$

$$\sigma_\lambda = d + e \rho + \frac{f}{\rho} \quad (2.9)$$

2. **Type et/ou masse volumique du matériau inconnus** : très souvent en phase de conception, la seule information que nous avons est la description générale du matériau à modéliser. Le type d'isolation ainsi que la nature du matériau sont, pour la plupart du temps connus, tandis que sa masse volumique ne l'est souvent pas.

Pour faire face à ce manque d'information, les auteurs suggèrent un classement des matériaux et une analyse par classe et par fourchette de masses volumiques. Pour chaque classe, les valeurs minimum et maximum de la conductivité sont calculées. Cette information est utilisée pour modéliser la conductivité par le biais d'une distribution de probabilité ou d'un intervalle d'encadrement [46].

Pour quantifier l'incertitude intrinsèque de la conductivité thermique du matériau, un nombre important de mesures expérimentales est requis. Grâce à ces mesures, il est possible de déterminer les coefficients a , b , c , d , e et f du modèle présenté précédemment (2.9). Dominguez-Munoz et al. (2010) [46] ont étudié de nombreux matériaux fibreux inorganiques et mousseux organiques et ont utilisé la méthode des moindres carrés pour calibrer leur modèle, en se basant sur un ensemble de données fourni par les fabricants.

A l'instar de cette étude, la plupart des études dans la littérature se basent sur les données disponibles, à savoir celles provenant des différents fabricants européens. Cependant, aucune de ces études n'essaie de quantifier l'incertitude intrinsèque relative à un isolant fabriqué par un même fabricant.

VISITE D'UNE USINE DE FABRICATION DE LAINE DE ROCHE

Afin de se faire une idée des sources d'incertitudes pouvant affecter les propriétés des matériaux isolants pendant les différentes phases de production, une visite de l'entreprise **Rockwool-France** de Saint-Eloy-Les-Mines fut réalisée dans le cadre de cette

thèse. A l'issue de cette visite, les sources d'incertitude ont été relevées principalement par rapport au processus de fabrication et aux systèmes de mesure, ainsi que par rapport aux moyens de stockage et de transport.

Cette usine produit différents produits en laine de verre pour des applications en toitures et dans les murs. En phase de production :

- A. Du basalte et des briquettes⁵ d'une certaine granulométrie sont mélangés puis chauffés à 1500°C dans des fours à Cubilot⁶ pour recréer de la lave.
- B. La lave est envoyée dans des spinners⁷ pour la formation des fibres. Dans ces spinners, sont ajoutés des liants pour agglomérer les fibres.
- C. Un collecteur/convoyeur récupère ensuite les fibres. La masse volumique des matériaux est alors réglée grâce à ce tapis. En effet, quel que soit le type de production, à la sortie des spinners, nous avons toujours le même volume de laine sortant. La laine est répartie sur le lit collecteur de gauche à droite. En fonction du produit désiré, la vitesse du convoyeur est réglée pour obtenir la masse volumique voulue. Plus la vitesse est importante, plus la masse volumique sera faible.
- D. A ce stade, la laine ne se tient pas. Celle-ci est alors passée dans un autre four chauffé à 250°C pour polymériser la colle introduite plus tôt. A la sortie, les plaquettes sont formées et découpées grâce à une scie à eau.
- E. Un opérateur vérifie visuellement les plaquettes en sortie.
- F. Les plaquettes sont ensuite emballées dans des colis en polyéthylène, puis superposées sur des palettes. Le tout est recouvert de polyéthylène.
- G. Le stockage se fait à l'air libre.

Dans ce processus totalement automatisé, les sources de variabilité sont nombreuses et dépendent principalement de :

- La composition chimique de la matière première : à savoir le basalte et les briquettes qui dépendent des carrières de provenance. Pour s'assurer de la qualité du basalte, différentes étapes de validation sont nécessaires. Une partie est réalisée par le fournisseur qui s'occupe de l'analyse interne (composition chimique avant tir) et une autre par Rockwool qui valide les produits finis en cours de livraison à des fréquences bien établies.

En ce qui concerne les briquettes, Rockwool analyse les différentes recettes en fonction de leur création et réalise un suivi selon une fréquence établie lors de l'application d'une recette.

- Le réglage des spinners et du convoyeur : ces machines changent de vitesse à chaque nouvelle production (en moyenne, une fois toutes les deux heures).
- Les mesures : les caractéristiques thermiques obtenues par type de produit sont le cumul de l'ensemble des résultats des contrôles journaliers de la production. Ils

⁵ les Briquettes sont fabriquées à partir des déchets d'usine récupérés.

⁶ Cubilot : Four vertical de fusion où la matière à faire fondre est en contact direct avec le combustible.

⁷ Les spinners sont de grandes roues qui tournent à vitesse modulable. Plus la vitesse est importante plus les fibres seront fines.

représentent une valeur homogène pouvant être atteinte en production de façon répétitive. Cette valeur est validée en collaboration avec l'ACERMI, le LNE et le CSTB. Une valeur moyennée et un écart-type peuvent alors être établis selon la fréquence choisie (journalière, hebdomadaire, etc). Ces mesures sont contrôlées deux fois par an par l'ACERMI (chez Rockwool puis dans leur laboratoire). La validation de ces contrôles fait que l'on autorise la production ou non. Cependant, l'opérateur ne fait ses prélèvements qu'au bout de 5 à 10 minutes après le lancement du produit.

En règle générale, le plus souvent des biais significatifs sur la performance des matériaux fibreux tels que la laine de verre ou la laine de roche sont attendus. Ces matériaux apparaissent déjà moins homogènes à l'oeil nu (Figure 2.8) que les mousses organiques (Figure 2.9).



FIGURE 2.8: Isolants à structure visuellement hétérogène.



FIGURE 2.9: Isolants à structure visuellement homogène.

De par ces constats, nous proposons de quantifier l'incertitude liée à la conductivité thermique des isolants en nous basant non pas sur les mesures obtenues juste après la production, mais sur des résultats d'essais de laboratoire sur des matériaux achetés après être passés par les phases de stockage et de transport.

Deux types d'isolant sont considérés, les matériaux fibreux inorganiques et les mousses organiques. Nous proposons d'étudier l'influence de la masse volumique et de l'épaisseur d'isolation sur la variabilité de la conductivité thermique initiale. Les modèles de quantification de la conductivité thermique et l'incertitude associée, proposés par Dominguez-Munoz et al. (2010) [46] sont re-calibrés en considérant nos résultats expérimentaux.

D'un autre côté, nous avons noté que les matériaux d'isolation se dégradent à long terme. Une étude de cas nous permet de mettre en évidence l'importance de considérer la dégradation des propriétés isolantes des matériaux, lors du choix des matériaux en phase de conception.

2.4 QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE ASSOCIÉE AUX MATÉRIAUX D'ISOLATION

Comme nous l'avons montré dans les paragraphes précédents, la nature du matériau et le procédé de fabrication jouent un rôle essentiel sur la variabilité des propriétés des matériaux isolants. Ainsi, il est nécessaire de quantifier ces variabilités en se basant sur des mesures expérimentales, des estimations d'experts et des résultats de simulation [68]. En raison du manque de données, nous avons réalisé une campagne d'essais à l'IUT d'Allier à Montluçon. L'incertitude sur la conductivité thermique est quantifiée dans le cas des isolants les plus utilisés sur le marché français.

Dans ce qui suit, nous présentons tout d'abord la campagne d'essais ainsi que le dispositif expérimental utilisé pour mesurer les conductivités, avant de présenter les résultats statistiques.

2.4.1 Description de la campagne expérimentale

Nous avons réalisé 52 essais, répartis entre les quatre isolants les plus utilisés pour l'isolation des façades, à savoir le polystyrène, le polyuréthane, la laine de verre et la laine de roche en panneaux.

Ces quatre types d'isolant peuvent être regroupés en deux classes de matériaux : les mousses organiques (polystyrène et polyuréthane) et les matériaux fibreux inorganiques (laine de verre et laine de roche).

Le tableau 2.5 présente les épaisseurs des matériaux étudiés et le nombre d'échantillons analysés. Ces isolants sont destinés à la même application (panneaux pour façades) mais avec des épaisseurs différentes. Le nombre d'échantillons testés varie de 4 à 7. Le petit nombre d'échantillons pour chaque configuration se justifie par les limites en temps et en moyens d'essais, dans le cadre de cette thèse dont l'objectif est de constater les tendances générales.

2.4.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental mis en place (Figure 2.10) est utilisé pour déterminer la conductivité thermique réelle des échantillons. La méthode de la plaque chaude gardée (ISO8302 [69]) est utilisée. Cette méthode est très utilisée pour mesurer la conductivité thermique des matériaux en régime stationnaire.

Comme l'illustre la figure 2.10, notre dispositif est composé de :

1. **une paroi de soutènement** : composée de briques en béton cellulaire ;

Type de Matériau	Code	Épaisseur (mm)	Nombre d'essais
Polystyrène	EPS10	100	7
	EPS5	50	4
	EPS3	30	4
	EPS2	20	4
Laine de verre	LDV10	100	7
	LDV8	75	4
	LDV5	45	5
Laine de Roche	LDR5	55	5
	LDR3	30	7
Mousse de polyuréthane	PU	40	5

Tableau 2.5: Description de la campagne d'essais.

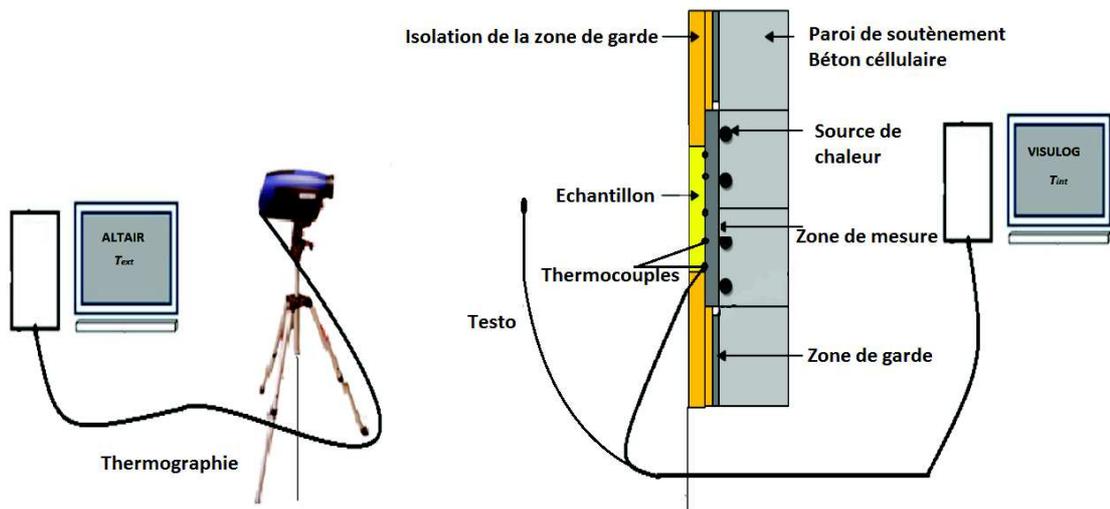


FIGURE 2.10: Dispositif expérimental.

2. **une source de chaleur** : la source de chaleur permet de créer le gradient de température entre les surfaces intérieure et extérieure de l'échantillon. Dans notre cas, nous avons utilisé une résistance électrique encastrée au centre du mur de soutènement (Figure 2.11a). Cette résistance électrique est raccordée à un thermostat permettant de maintenir la température quasi-constante entre une température de consigne (T_{Consigne}) et une température ($T_{\text{Consigne}} + \Delta T$) au cours d'un cycle de temps (Figure 2.11b). ΔT doit être assez petite pour assurer un flux quasi permanent.
3. **zones de garde et de mesure** : une plaque métallique est placée en aval du mur de soutènement recouvrant la résistance. Il s'agit de la plaque chauffante qui sera en contact avec nos échantillons, son rôle est d'homogénéiser la chaleur sur la surface intérieure (amont) de l'échantillon. Deux zones sont alors distinguées (Figure 2.12) :
 - a) **zone de mesure** : cette zone représente l'endroit où sera placé l'échantillon.

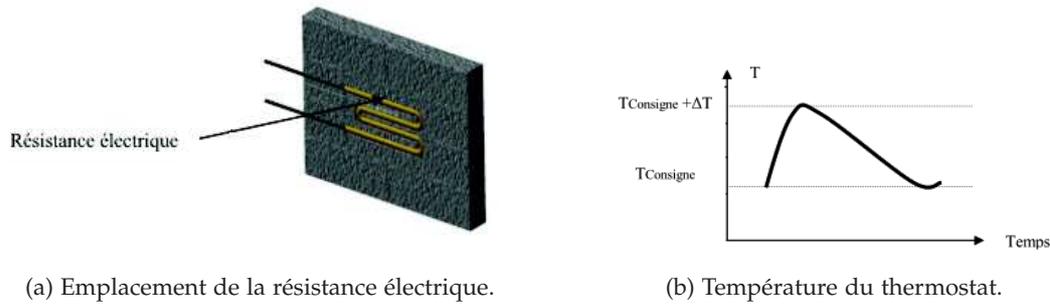


FIGURE 2.11: Source de chaleur sur la face amont de l'échantillon.

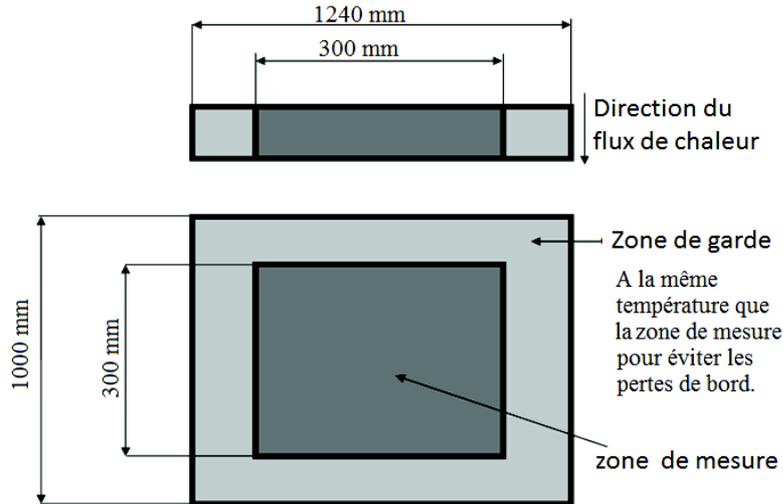


FIGURE 2.12: Présentation des zones de mesure et de garde.

- b) **zone de garde** : cette zone représente le reste de la plaque qui entoure la zone de mesure, elle a pour objectif d'assurer un transfert de chaleur unidirectionnel en compensant les pertes latérales. Sa température est réglée de telle sorte qu'elle soit identique à celle de la zone de mesure. Pour ce faire, deux tapis chauffants ont été ajoutés au montage pour équilibrer la température au niveau de la zone de garde (Figure 2.13).
4. **échantillons** : des échantillons normalisés 300 mm × 300 mm de forme parallélépipédiques sont placés en contact avec la plaque chauffante.
 5. **cadre d'isolation** : pour éviter les effets de bord au niveau des échantillons, un cadre en laine de verre est placé sur la zone de garde (Figure 2.14).
 6. **appareillages et capteurs de mesure** : Pour mesurer l'écart de températures entre l'amont et l'aval de l'échantillon, différentes instrumentations seront placées.

Sur la face intérieure (en amont) des échantillons en contact avec la plaque chauffante (zone de mesure), 17 thermocouples de type K sont installés comme le montre la figure 2.15. Ces thermocouples permettent de mesurer les températures en amont des échantillons (T_{Int}) et sont distribués de manière à obtenir une bonne représentation de la zone de mesure. Un logiciel de traitement (VISULOG [70]) permet ensuite le suivi et la gestion des différents canaux de mesure.

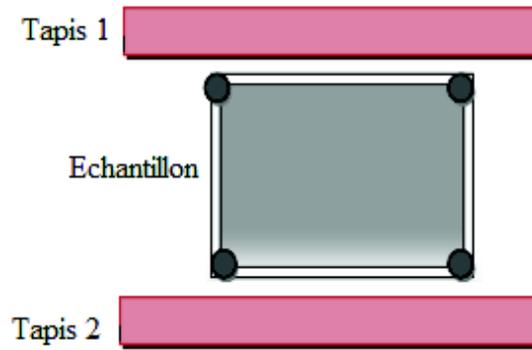


FIGURE 2.13: Emplacement des tapis chauffants.

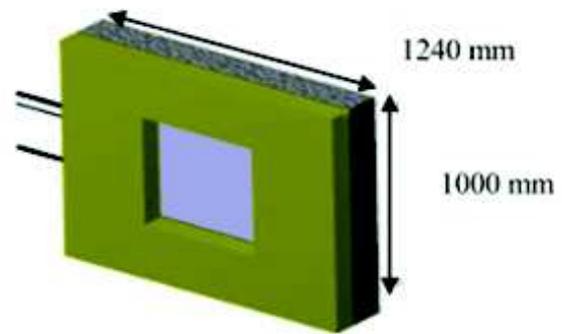


FIGURE 2.14: Encadrement en Laine de verre.

Pour déterminer les températures au niveau de la surface extérieure (en aval) des échantillons (T_{Ext}), la thermographie infrarouge est utilisée. Cette méthode permet de détecter, grâce à une caméra infra-rouge, les discontinuités et défauts de la structure interne des bâtiments en observant les variations locales de la température de surface [71]. Le processus de transfert de chaleur analysé par thermographie est illustré sur la figure 2.16. Chaque image thermique obtenue par la caméra donne les températures à chaque pixel touché par le rayonnement provenant de l'échantillon. Le bilan énergétique est résumé dans l'équation suivante [71] :

$$W_{Tot} = \epsilon T W_{Obj} + (1 - \epsilon) T W_{Ref} + (1 - T) W_{Atm} \quad (2.10)$$

où W_{tot} représente l'énergie totale atteignant la caméra lorsque l'objet est visé, W_{Obj} représente l'énergie rayonnée à partir de l'objet étudié, qui dépend de sa température, et W_{Ref} représente l'énergie provenant des différentes sources autour de la zone de mesure. Sa valeur dépend de la température de tous les objets face à l'objet étudié en plus des propriétés réfléchissantes de la surface de l'objet lui-même. Enfin, W_{Atm} représente l'absorption de l'atmosphère qui est étroitement liée à la température de l'air, à l'humidité relative et à la distance entre la caméra et la surface de l'objet. Les paramètres liés à W_{Ref} et W_{Atm} doivent être identifiés et considérés lors de la configuration de la caméra-IR. Lorsque ces deux termes sont convenablement considérés, la précision des mesures de la caméra dépend seulement de l'incertitude liée aux propriétés d'émissivité de l'objet.

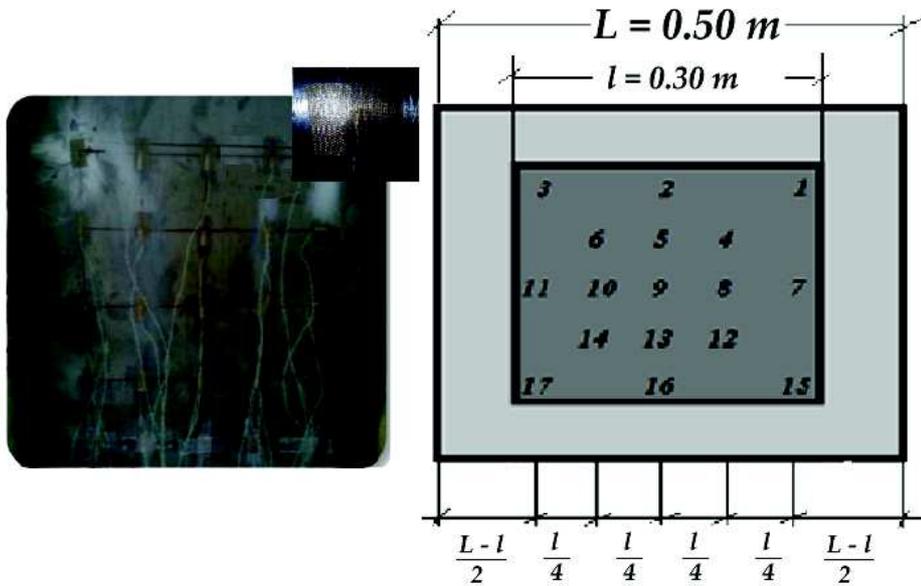


FIGURE 2.15: Position des thermocouples.

L'émissivité peut être déterminée en effectuant différentes mesures de la surface étudiée en utilisant d'autres moyens de mesure. Autrement dit, les propriétés réfléchissantes de l'échantillon peuvent être directement corrigées par l'application d'un corps noir (plaque de cuivre noir ou peinture mate noire) pour obtenir des émissivités (ϵ) se rapprochant de l'unité [72, 73].

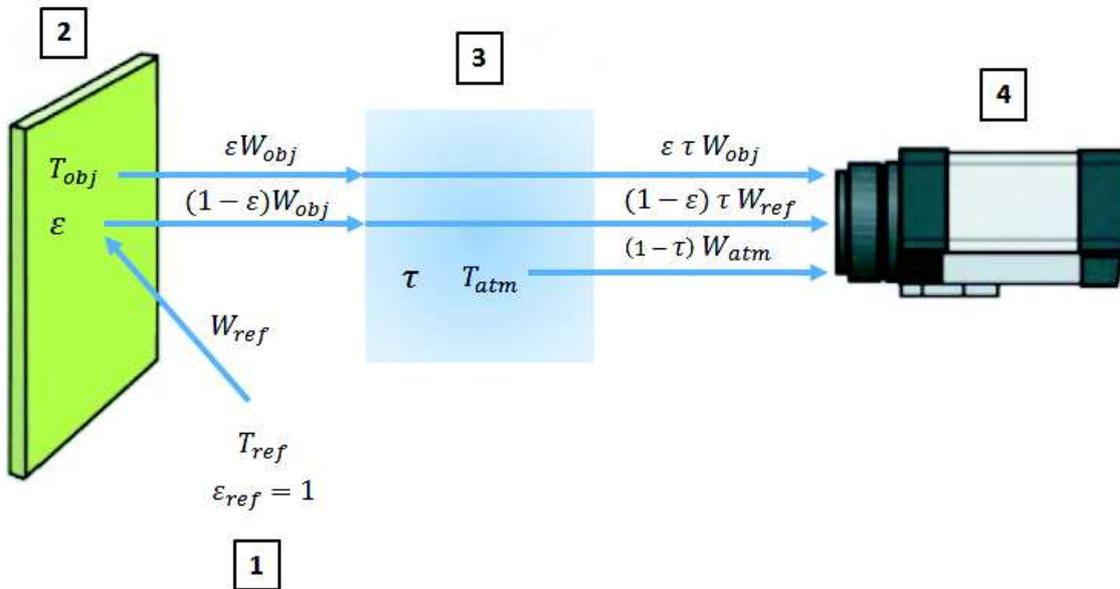


FIGURE 2.16: Thermographie infrarouge : Processus du transfert de chaleur [71].

Dans notre cas, une caméra-IR, de type "Silver" de 320×256 pixels fabriquée par FLIR [73], nous a permis d'enregistrer les rayonnements infrarouges émis par nos échantillons. Les propriétés réfléchissantes de les échantillons ont été corrigées

grâce à l'application d'une couche de peinture noire (mate) pour rapprocher ϵ de la valeur unité.

Pour réduire l'énergie de rayonnement relative à l'environnement, une structure en laine minérale a été mise en place. Cette dernière permet également de réduire les pertes de chaleur par convection et les effets de bord (Figure 2.17). Un thermohygromètre de type "Testo 435" a été utilisé pour déterminer les conditions atmosphériques ambiantes (température ambiante et humidité relative).

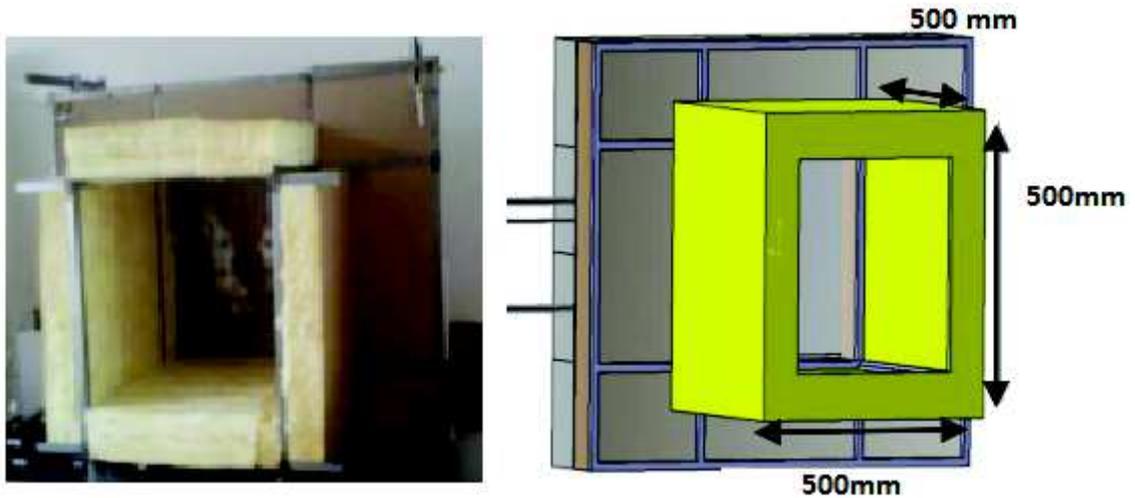


FIGURE 2.17: Cadre en laine de verre pour stabiliser l'écoulement d'air en aval.

Pour déterminer la résistance thermique des échantillons (R), il est nécessaire de considérer le transfert de chaleur partant du mur à la camera comprenant à la fois le rayonnement thermique (Ray) et la convection ($Conv$) donnés par [72] :

$$\dot{Q}_{Ray} = 4 \epsilon \sigma S T_{Mur}^3 (T_{Mur} - T_{Ext}) \quad (2.11)$$

$$\dot{Q}_{Conv} = h_{Int} S (T_{Mur} - T_{Int}) \quad (2.12)$$

où \dot{Q}_{Ray} et \dot{Q}_{Conv} représentent les flux thermiques radiatif et convectif, respectivement, ϵ représente l'émissivité, σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5.66794 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), S est la section de l'échantillon étudié, h_{Int} est le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'environnement intérieure, T_{Mur} est la température du mur, T_{Ext} est la température extérieure reflétée et T_{Int} est la température en surface intérieure de l'échantillon (en contact avec la zone de mesure).

La résistance thermique R est alors déduite du flux total \dot{Q} :

$$\dot{Q} = \frac{S}{R} (T_{Int} - T_{Ext}) \quad (2.13)$$

avec :

$$R = \frac{T_{Int} - T_{Ext}}{(h_{Int}(T_{Mur} - T_{Int})) + (4 \epsilon \sigma T_{Mur}^3 (T_{Mur} - T_{Ext}))} \quad (2.14)$$

Pour déterminer la valeur du coefficient h_{Int} (Annexe A), les propriétés de l'air sont requises. Ces dernières sont mesurées grâce au thermohygromètre (Testo435)

placé en aval de l'échantillon et permettent de calculer le nombre de Nusselt (Nu) en fonction du type d'écoulement observé (Figure A.7). Le coefficient de convection est alors déduit de ce nombre (Nu) qui représente le rapport entre le transfert thermique convectif et le transfert thermique conductif ($Nu = \frac{h_{int} d}{\lambda}$; avec d la longueur caractéristique de la surface).

Remarques :

1. Pendant l'essai, les échantillons sont pris en sandwich entre la plaque chaude et l'environnement extérieur, et un flux de chaleur constant est imposé. Pour assurer les conditions stationnaires du régime permanent, les mesures sont réalisées deux à trois heures après la mise en route de la source de chaleur.
2. L'analyse par thermographie est de plus en plus utilisée notamment pour vérifier la continuité de l'enveloppe des bâtiments. Toutefois, dans la littérature cette technique n'est utilisée qu'en environnement extérieur, d'où le terme liée à la convection dans l'équation (2.12), qui est souvent plus intense.

En laboratoire, la convection n'est pas aussi importante qu'en environnement extérieur. Par ailleurs, la présence du cadre en laine de verre (Figure 2.17) permet de réduire les pertes de chaleur par convection. Néanmoins, par souci de précision, nous choisissons de garder ce terme et de mesurer la convection grâce au thermohygromètre placé à l'intérieur du cadre de laine de verre.

3. Les échantillons sont stockés horizontalement de manière à éviter l'écrasement du matériau.

2.4.3 Variabilités du coefficient de conduction

La méthode de la plaque chaude gardée permet de déterminer la conductivité thermique des échantillons testés grâce à la formulation suivante :

$$\lambda = \frac{e \varphi_0}{S (\Delta T_{Ext} - \Delta T_{Ech})} \quad (2.15)$$

où S est la surface de l'échantillon étudié, e est l'épaisseur de l'échantillon, φ_0 est le flux transmis à la zone centrale de la plaque chaude et ΔT_{Ext} et ΔT_{Ech} sont les écarts de température dans l'environnement extérieur et au niveau de l'échantillon.

Tableau 2.6: Résultats expérimentaux.

Matériaux	Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	μ_λ	C.V. (%)	Fabricant
LDV10	Epaisseur [mm]	111,3	110,6	112,2	107,8	110,9	110,5	106,9	110,03	1,756	100
	ρ [kg/m ³]	25,32	20,65	24,54	24,52	21,62	20,52	23,12	22,43	10,19	Inconnue
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,045	0,040	0,038	0,038	0,039	0,038	0,039	0,0396	6,34	0,040
LDV8	Epaisseur [mm]	64,6	74,9	77,1	76,7				73,4	6,7	75
	ρ [kg/m ³]	16,93	14,24	17,04	16,86				16,27	7,21	Inconnue
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,033	0,036	0,035	0,035				0,0347	3,14	0,032
LDV5	Epaisseur [mm]	49,0	50,7	48,35	46,8	49,5			48,87	2,64	45
	ρ [kg/m ³]	16,59	18,45	17,39	19,01	19,95			18,278	6,47	Inconnue
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,048	0,046	0,050	0,050	0,050			0,0488	3,28	0,036
EPS10	Epaisseur [mm]	99,5	99,5	99,3	100	99	99,5	99,25	99,44	0,31	100
	ρ [kg/m ³]	12,71	12,72	12,76	12,80	12,32	12,83	12,86	12,78	0,45	14
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,049	0,045	0,045	0,039	0,039	0,044	0,044	0,044	8,15	0,0385
EPS5	Epaisseur [mm]	48,9	49,1	48,9	49,3				49,05	0,39	50
	ρ [kg/m ³]	10,72	10,13	10,74	10,37				10,49	2,8	Inconnue
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,037	0,042	0,037	0,041				0,039	6,7	0,036
EPS3	Epaisseur [mm]	29,7	29,4	29,7	29,4				29,55	0,586	30
	ρ [kg/m ³]	14,7	14,8	14,7	14,8				14,75	0,39	Inconnue
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,047	0,048	0,047	0,049				0,048	3,96	0,040
EPS2	Epaisseur [mm]	19,6	19,4	19,7	19,3				19,5	0,94	20
	ρ [kg/m ³]	15,6	15,7	15,4	15,8				15,62	1,093	Inconnue
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,064	0,055	0,065	0,06				0,06	7,032	0,04
LDR5	Epaisseur [mm]	57,5	56,8	58,2	57	57,8			57,46	0,801	55
	ρ [kg/m ³]	62,48	55,56	60,23	55,7	54,31			57,66	5,45	Inconnue
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,035	0,034	0,035	0,045	0,043			0,038	12,06	0,035
LDR3	Epaisseur [mm]	28,4	28,5	29,6	28,7	28,8	29,5	29,3	28,97	1,687	30
	ρ [kg/m ³]	37,011	37,013	37,056	39,107	39,641	41,29	41,36	38,92	5,02	Inconnue
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,030	0,031	0,031	0,031	0,03	0,03	0,031	0,0306	1,75	0,035
PU	Epaisseur [mm]	39,2	39,6	39,5	39,7	39,3			39,46	0,47	40
	ρ [kg/m ³]	28,54	29,47	29,84	29,8	29,14			29,36	1,64	33
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,024	0,023	0,025	0,026	0,027			0,025	5,66	0,022

Le tableau 2.6 présente les conductivités thermiques obtenues en laboratoire pour chaque échantillon testé, tandis que le tableau 2.7 compare les conductivités thermiques obtenues expérimentalement aux valeurs spécifiées sur les produits achetés. Nous constatons que dans la plupart des cas, les conductivités thermiques obtenues expérimentalement sont en dessous des performances attendues et dépendent fortement de la structure interne du matériau étudié. En effet, nous constatons que les matériaux fibreux (laine de verre (LDV) et laine de roche (LDR)) présentent les plus gros écarts par rapport aux valeurs spécifiées, en raison de leur forte compressibilité qui les rend plus sensibles à la qualité de la fabrication et aux conditions de stockage et de transport. Par exemple, si nous comparons l'écart de performance des échantillons de LDV5 aux écarts obtenus par un matériau synthétique tel que l'EPS5, nous observons que pour quasiment la même épaisseur (5 cm), la variabilité de la Laine de Verre (LDV) est de 30% contre 8% pour le polystyrène expansé (EPS), soit plus de 22% de différence.

D'autre part, nous constatons également que la variabilité de la performance des isolants dépend de l'épaisseur du panneau. En effet, quel que soit le type de matériau, les écarts les plus importants sont associés aux plus petites épaisseurs.

A titre d'exemple, les LDV10 (i.e. échantillons de laine de verre à 10 cm, voir Tableau 2.5), montrent moins de 1% d'écart entre la performance mesurée et celle attendue. Avec de plus faibles épaisseurs de LDV, tels que les échantillons de LDV5, la performance mesurée peut atteindre 30% de moins par rapport à celle prévue.

Dans le cas des matériaux synthétiques, nous constatons également que l'écart de performance se creuse avec les petites épaisseurs. Les échantillons les plus épais sont moins sensibles aux aléas extérieurs. Les échantillons de Polystyrène expansé (EPS) à très faibles épaisseurs (2 cm) présentent une conductivité thermique moyenne 20% plus grande que celle prévue par le fabricant ; tandis qu'à 5 cm, l'écart de performance diminue atteignant à peine 8% de différence. La raison est sans doute due à la masse volumique qui serait mieux maîtrisée lorsque l'épaisseur des échantillons est importante (Tableau 2.7).

Au regard de l'écart-type, nous constatons que dans tous les cas, plus l'épaisseur de l'isolant est importante plus l'écart-type observé est grand. Dans le cas de la LDV par exemple, nous constatons que l'écart-type passe de 0,0016 à 0,0025 de 4,5 cm à 10 cm, soit près de 36% en plus de variabilité. Tandis que dans le cas de la Laine de Roche (LDR), nous constatons qu'entre 3 et 5 cm, l'écart-type passe de 0,0005 à 0,0046 soit plus de 89% de variabilité en plus.

La masse volumique des matériaux d'isolation n'est pas toujours fournie lors de l'achat, car le choix d'un isolant se fait principalement sur la base de sa conductivité thermique. Néanmoins, de nombreux auteurs soulignent l'impact de la masse volumique sur la qualité de la conductivité thermique. Le tableau 2.8 présente la moyenne et l'écart-type obtenus sur la masse volumique des matériaux étudiés. Ces masses volumiques mesurées en laboratoire, montrent qu'en fonction de la classe de matériau, les écarts les plus importants sont observés avec les matériaux fibreux inorganiques. Par ailleurs, plus l'échantillon est épais plus l'incertitude observée est importante. A titre d'exemple, dans le cas de la LDV, les échantillons de 10 cm présentent un coefficient de variation de plus de 10% tandis qu'à faible épaisseur ce coefficient de variation baisse atteignant à peine 7,2% pour LDV8 et 6,5% pour LDV5. A l'opposé, il est vrai que la masse volumique des matériaux compacts synthétiques est mieux maîtrisée, même si elle reste quelque peu affectée par les incertitudes. Les résultats obtenus dans ce cas

Codes des Échantillons	Valeur fabricant [W/mK]	Expérimentations [W/mK]	
		Moyenne	Ecart-Type
LDV ₁₀	0,0400	0,0396	0,0025
LDV ₈	0,0320	0,0348	0,0011
LDV ₅	0,0360	0,0488	0,0016
LDR ₅	0,0354	0,0384	0,0046
LDR ₃	0,0350	0,0306	0,0005
EPS ₁₀	0,0385	0,0440	0,0035
EPS ₅	0,0360	0,0390	0,0027
EPS ₃	0,0400	0,0480	0,0019
EPS ₂	0,0400	0,0600	0,0040
PU	0,0220	0,0250	0,0014

Tableau 2.7: Conductivités thermiques expérimentales.

montrent qu'au contraire, avec les matériaux compacts, plus l'épaisseur est importante plus la masse volumique est maîtrisée par le fabricant.

Matériau	masse volumique [kg/m ³]		
	Moyenne	Ecart-Type	Valeur fabricant
LDV ₁₀	22,43	2,285	Inconnue
LDV ₈	16,27	1,172	Inconnue
LDV ₅	18,28	1,183	Inconnue
LDR ₅	57,66	3,14	Inconnue
LDR ₃	38,92	1,95	Inconnue
EPS ₁₀	12,78	0,057	14
EPS ₅	10,49	0,294	Inconnue
EPS ₃	14,75	0,0577	Inconnue
EPS ₂	15,62	0,171	Inconnue
PU	29,36	0,48	33

Tableau 2.8: Densités obtenues expérimentalement.

Remarque : La qualité de la valeur mesurée va dépendre :

- des erreurs de mesure :

Les erreurs de mesures peuvent affecter l'évaluation de la conductivité. Ces erreurs sont dues aux imperfections des appareils de mesure, aux erreurs dans l'exploitation des données brutes de mesure mais également aux erreurs dues au mode ou aux conditions d'emploi (Rigueur de l'opérateur).

Dans notre cas, placer une sonde de thermocouple vient perturber automatiquement l'environnement (i.e. l'écoulement du gaz ou de la conduction est perturbé).

Réciproquement, l'environnement peut perturber la valeur de la température, lorsqu'il y a rayonnement. Ces inconvénients sont toutefois plus limités avec la caméra, encore faut-il que la sonde et la caméra soient correctement placées.

2. de la précision des capteurs de mesures :

Les différents capteurs utilisés lors de ces essais présentent l'avantage d'être assez précis. La précision de la mesure obtenue grâce aux thermocouples est de $0,1^{\circ}\text{C}$, supposant un bon étalonnage et une reproductibilité correcte. Quant à la caméra infrarouge, la température est donnée pour 20 mK , en supposant un étalonnage correcte et un corps noir (émissivité = 1).

Calibration du modèle de quantification de l'incertitude

Pour pouvoir déterminer la variabilité de la conductivité thermique d'un matériau, nous proposons d'utiliser le modèle analytique proposé par Dominguez-Munoz et al. (2010) [46]. Son modèle préalablement utilisé pour quantifier la variabilité de la conductivité thermique des matériaux provenant de différents fabricants, est utilisé dans notre cas pour évaluer les moments statistiques de la conductivité thermique d'un matériau provenant du même lot de fabrication.

Pour ce faire, des ajustements par la méthode des moindres carrés permettent de calibrer le modèle analytique et de déterminer les coefficients a , b , c pour le calcul de la conductivité moyenne (2.8) et les coefficients d , e et f pour l'estimation de l'écart-type (2.9). Ces coefficients sont déduits de nos essais et sont présentés respectivement dans les tableaux 2.9 et 2.10.

Les coefficients dans les tableaux 2.11 et 2.12 sont obtenus par Dominguez-Munoz et al. (2010) [46] pour quantifier la variabilité des performances thermiques d'un même type de matériau provenant de différents fabricants.

Matériaux	μ_{λ} : Base de données Expérimentale		
	a	b	c
Laine de Verre	0,047	$1,4 \times 10^{-3}$	-0,0566
Laine de Roche	0,0244	$4,0 \times 10^{-4}$	0,0395
Polystyrène	-9×10^{-4}	0,0036	0,058

Tableau 2.9: Coefficients du modèle de la conductivité moyenne (campagne expérimentale).

Matériaux	σ_{λ} : Base de données Expérimentale		
	d	e	f
Laine de Verre	$-5,3 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-4}$	$-4,026 \times 10^{-3}$
Laine de Roche	8×10^{-4}	2×10^{-5}	$4,47 \times 10^{-3}$
Polystyrène	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$-1,489 \times 10^{-3}$

Tableau 2.10: Coefficients du modèle d'écart-type de la conductivité (campagne expérimentale).

Nous constatons que nos coefficients donnent des conductivités moyennes inférieures à celles obtenues en utilisant les coefficients de Dominguez-Munoz et al. (2010) [46]. En effet, nos modèles, permettent de quantifier l'incertitude sur la performance intrinsèque d'un type de matériau ayant la même composition physico-chimique et le même procédé de fabrication. Tandis que Dominguez-Munoz et al. (2010) [46] considèrent les incertitudes sur la performance de matériaux n'ayant pas la même base de fabrication, des matériaux qui n'ont pas nécessairement la même composition chimique et avec des processus de fabrication parfois différents.

Au regard de l'écart-type, nous constatons également que nos coefficients sont inférieurs à ceux obtenus grâce à la base de données fabricants. L'incertitude obtenue par Dominguez-Munoz et al. (2010) [46] considère, en plus de la variabilité intrinsèque du matériau, la variabilité inter-fabricants.

Enfin, les coefficients présentés dans ces tableaux ne sont valables que pour les matériaux étudiés. Chaque fabricant pourrait calibrer ces modèles sur la base de sa propre production, ce qui lui permettrait d'estimer la fiabilité de son processus de fabrication et la qualité de sa production. Par ailleurs, il serait intéressant de fournir des coefficients cibles à imposer aux fabricants, pour pouvoir contrôler la qualité des produits présentés sur le marché.

Matériaux	μ_λ : Base de données Fabricants		
	a	b	c
Laine de Verre	0,02616	$4,0456 \times 10^{-5}$	0,1563
Laine de Roche	0,03559	$3,8351 \times 10^{-5}$	0
Polystyrène	0,02496	$5,9674 \times 10^{-5}$	0,1769
Polyuréthane	0,02463	0	0

Tableau 2.11: Coefficients du modèle de calcul de conductivité moyenne (basés sur les données fabricants) [46].

Matériaux	σ_λ : Base de données Fabricants		
	d	e	f
Laine de Verre	$1,0346 \times 10^{-3}$	$-4,3632 \times 10^{-6}$	$1,4277 \times 10^{-2}$
Laine de Roche	$6,9711 \times 10^{-4}$	$6,3794 \times 10^{-6}$	0
Polystyrène	$1,0169 \times 10^{-3}$	$-6,1739 \times 10^{-6}$	$-8,2696 \times 10^{-3}$
Polyuréthane	$1,2519 \times 10^{-3}$	0	0

Tableau 2.12: Coefficients du modèle de calcul de l'écart-type sur la conductivité (basés sur les données fabricants) [46].

Identification des lois de probabilité

L'identification des lois de distribution est impérative pour l'analyse de la fiabilité. Dans notre cas, la méthode des rangs médians est bien adaptée pour identifier la

meilleure loi de distribution dans le cas de faible nombre d'échantillons. Le rang médian est donné par :

$$r_i = \frac{n_i - 0,3}{n + 0,4} \quad (2.16)$$

où n_i est le rang du spécimen considéré et n le nombre total de spécimens.

Sur les figures 2.18 à 2.17, nous comparons la fonction de répartition de la conductivité thermique obtenue expérimentalement avec celles des lois normale et log-normale. Le choix de la loi se fait en se basant sur les résultats du test d'ajustement Kolmogorov-Smirnov puisqu'il est le mieux adapté aux faibles échantillons. Le tableau 2.13 présente les résultats du test et récapitule la distribution de probabilité la plus adéquate par matériau étudié. Ces résultats montrent que la loi log-normale correspondrait mieux, ce qui est conforme aux valeurs strictement positives de la conductivité thermique.

Dans la littérature, la loi normale est souvent utilisée pour décrire l'incertitude sur la conductivité [46] parce qu'elle est la mieux appropriée pour décrire les données physiques mesurées [3].

En réalité, si une variable aléatoire X suit une loi log-normale, son logarithme $\text{Ln}X$ suit une loi normale. Pour estimer les paramètres $\mu_{\text{Ln}X}$ et $\sigma_{\text{Ln}X}$ il est possible de se baser sur l'échantillon des observations de la variable X :

$$\mu_{\text{Ln}X} = \text{Ln}\left(\frac{\mu_X}{\sqrt{1 + \text{CV}_X^2}}\right) \quad \text{et} \quad \sigma_{\text{Ln}X}^2 = \text{Ln}(1 + \text{CV}_X^2) \quad (2.17)$$

Dans le cas des faibles échantillons, si le coefficient de variation CV_X est suffisamment petit (par exemple $\text{CV}_X < 0,2$) on a l'approximation suivante : $\sigma_{\text{Ln}X} = \text{CV}_X$.

Dans notre cas, les coefficients de variation des conductivités thermiques étant petits, le test ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'utiliser la loi normale pour décrire la dispersion des résultats.

La variabilité de la performance thermique des matériaux d'isolation requiert une marge supplémentaire pour la garantie énergétique de l'habitation. Cette section a permis de quantifier l'incertitude à laquelle on pourrait s'attendre selon le type de matériau. Les questions auxquelles nous devons répondre sont : à quel degré ces incertitudes peuvent influencer sur les performances énergétiques d'un bâtiment ? Dans ce cas, arrive-t-on malgré tout à respecter les exigences réglementaires ?

Matériau		Loi normale (N)	Loi log-normale (LN)	Recommandation
PU		✓	✓	LN
EPS	EPS ₁₀	×	✓	LN
	EPS ₅	✓	✓	LN
	EPS ₃	✓	✓	LN
	EPS ₂	✓	✓	LN
LDV	LDV ₁₀	×	✓	LN
	LDV ₈	✓	✓	LN
	LDV ₅	✓	✓	LN
LDR	LDR ₅	×	✓	LN
	LDR ₃	✓	✓	LN

Tableau 2.13: Identification des lois de distribution de la conductivité thermique.

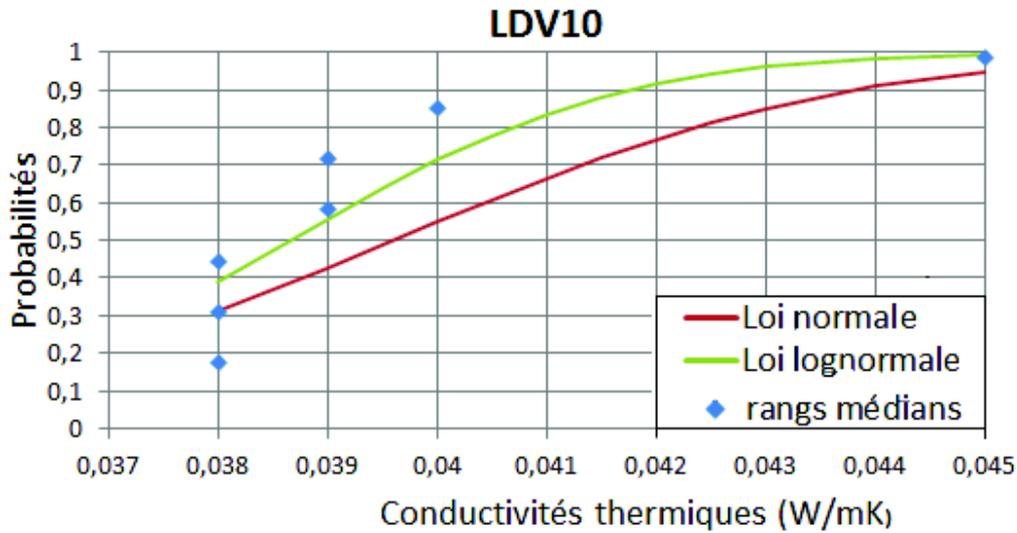
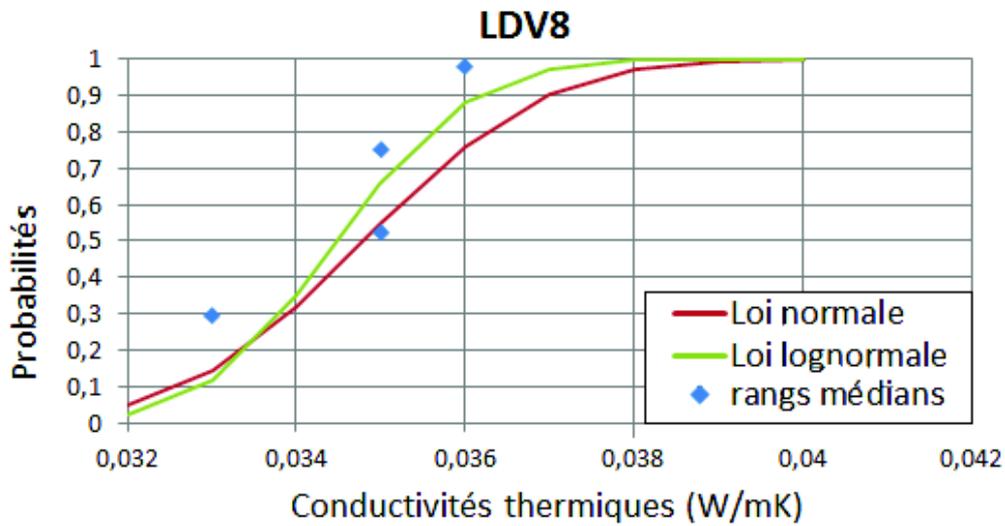
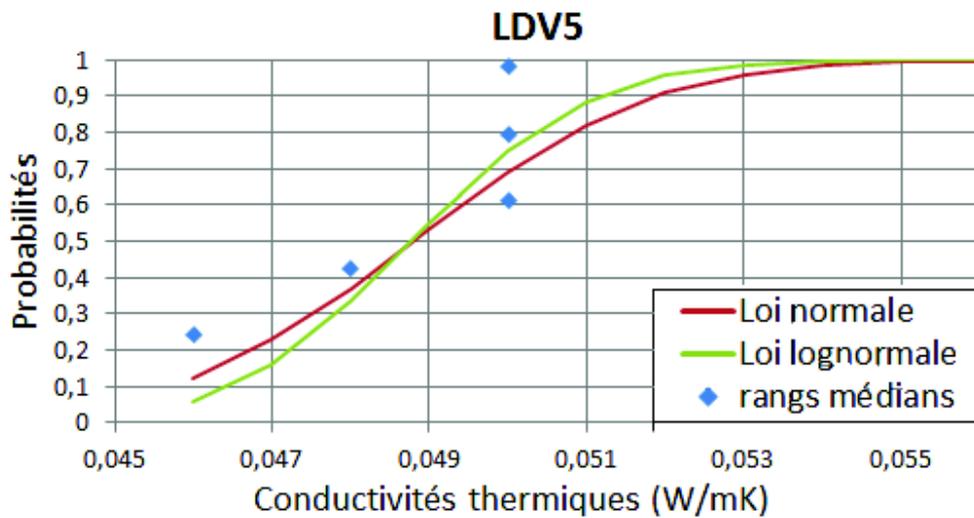
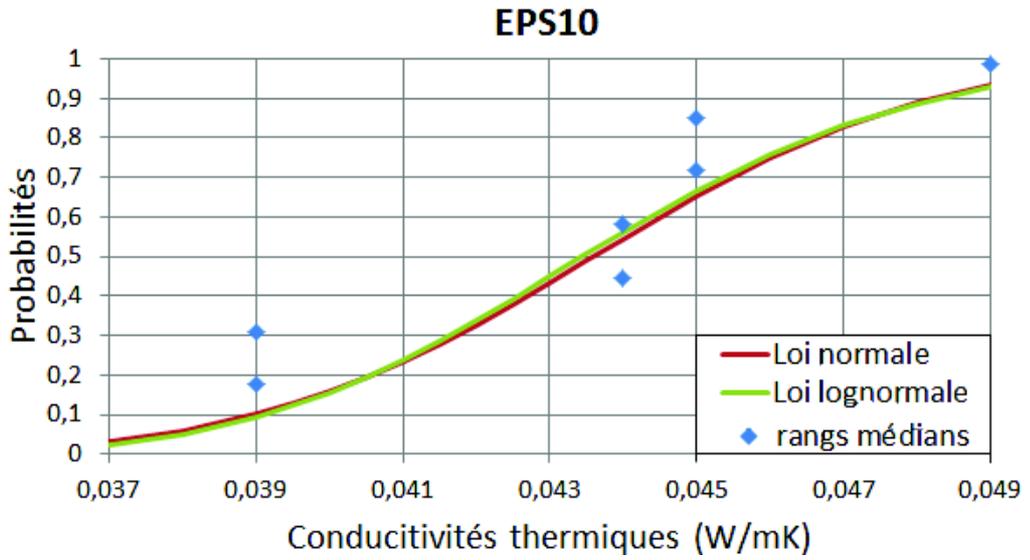
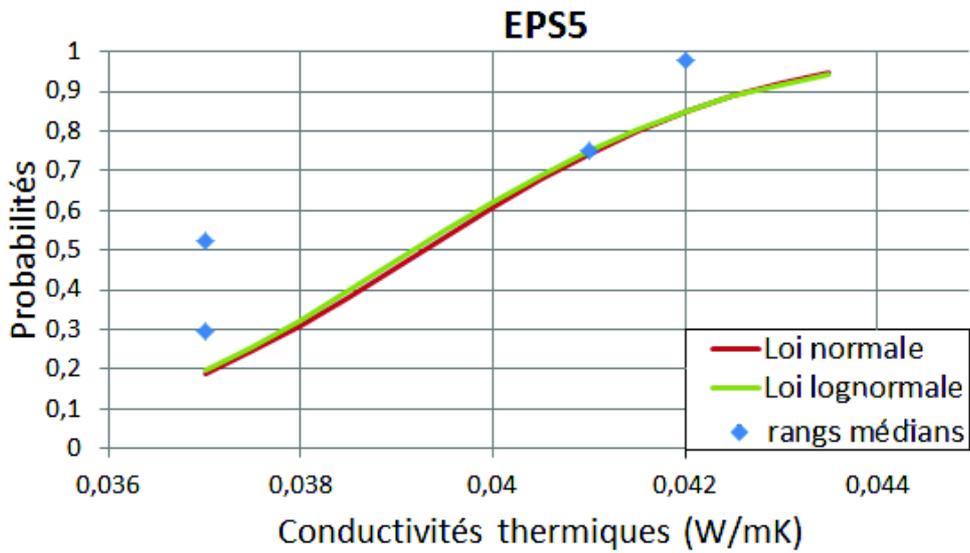
(a) LDV₁₀(b) LDV₈(c) LDV₅

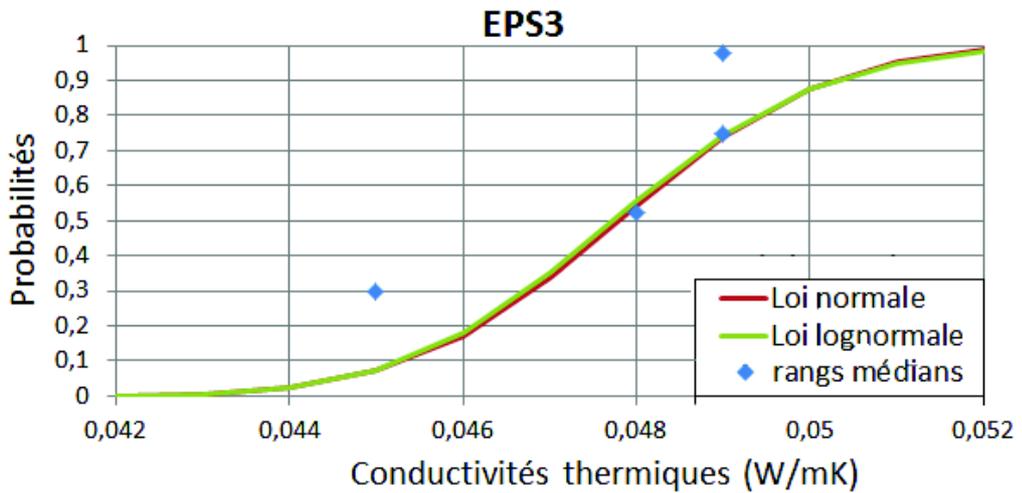
FIGURE 2.18: Identification de la loi de distribution dans le cas de la laine de verre.



(a) EPS₁₀



(b) EPS₅



(c) EPS₃

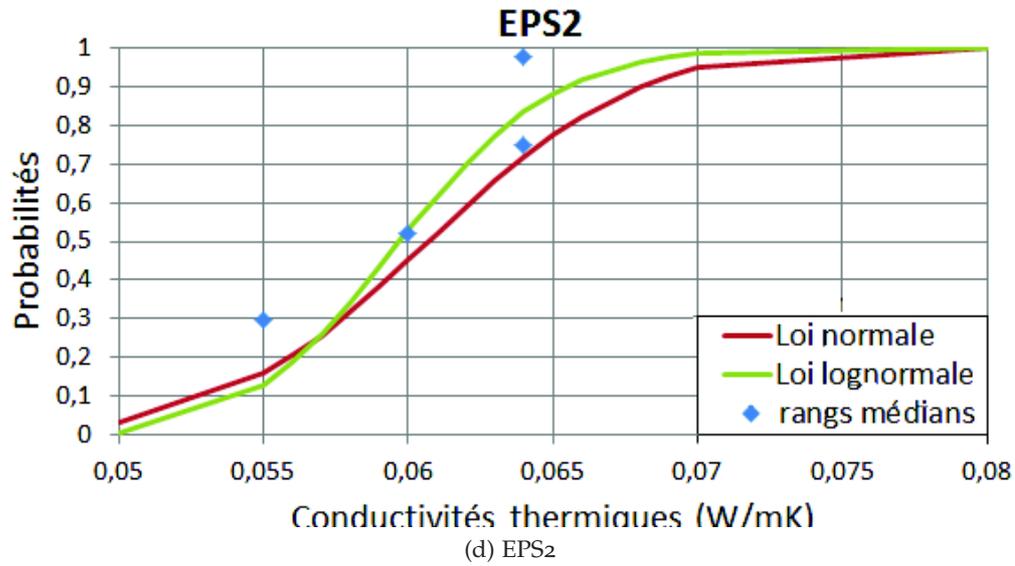


FIGURE 2.17: Identification de la loi de distribution dans le cas du Polystyrène.

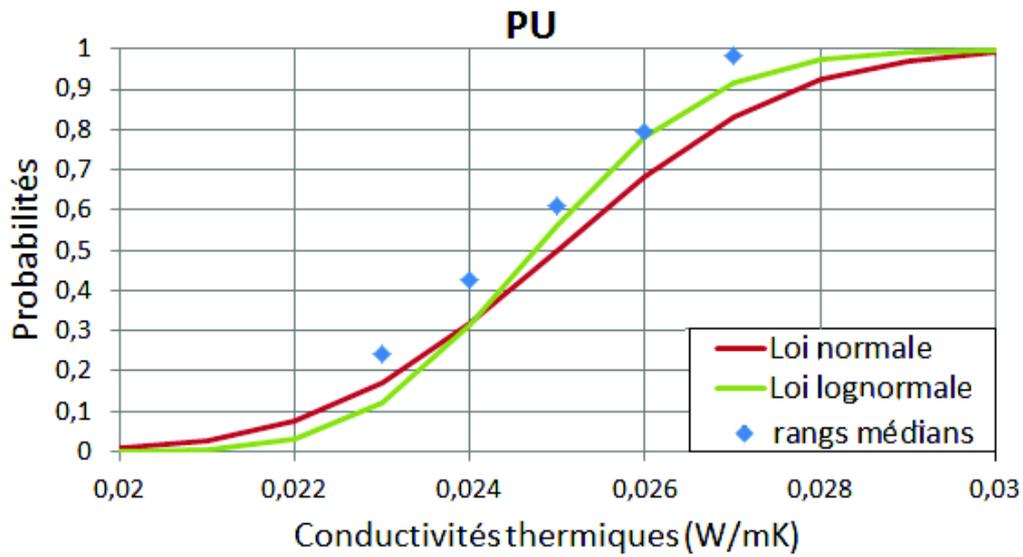
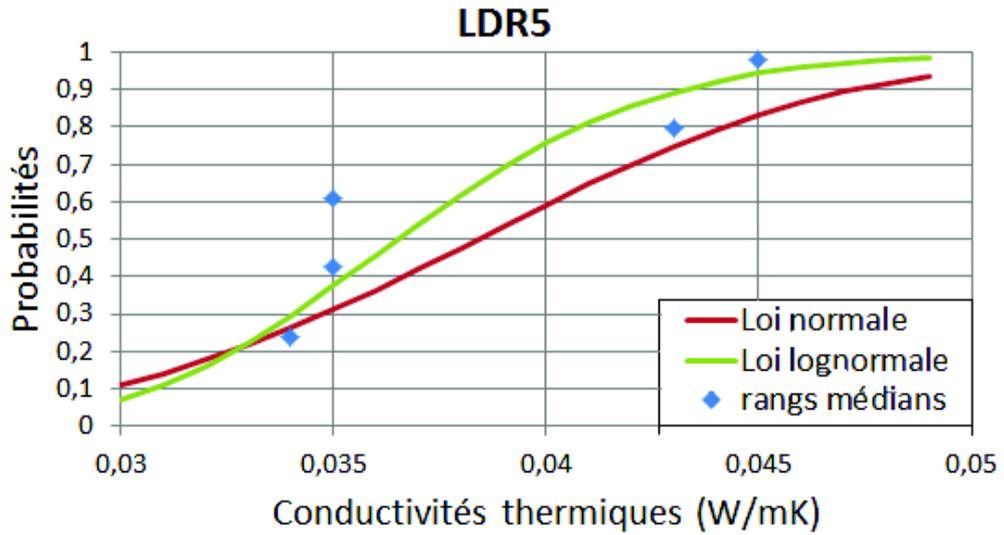
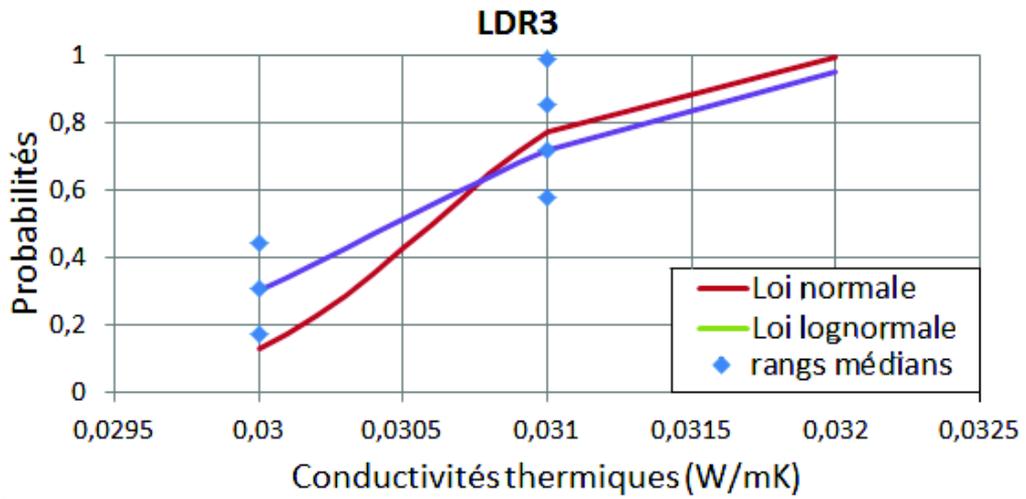


FIGURE 2.18: Identification de la loi de distribution dans le cas du Polyuréthane (PU).



(a) LDR₅



(b) LDR₃

FIGURE 2.19: Identification de la loi de distribution dans le cas de la laine de roche.

2.5 ETUDE DE LA FIABILITÉ DE L'ISOLATION D'UN MUR

Dans cette section, nous proposons d'évaluer la fiabilité d'une paroi multi-couche. Le but est de vérifier la performance énergétique de la paroi en considérant les incertitudes liées aux matériaux d'isolation.

2.5.1 Isolation thermique des façades

Pour l'isolation des façades, trois types de solutions peuvent être proposées. L'isolation thermique par l'intérieur (ITI), l'isolation thermique par l'extérieur (ETI) et le système constructif à isolation thermique répartie (ITR).

- L'isolation thermique par l'intérieur (ITI) consiste à placer l'isolant au moyen de colle ou de chassis du côté intérieur de la façade. Dans le cas des maisons à plusieurs niveaux, elle est interrompue au droit des parois intérieures (planchers et refends) générant ainsi d'importants ponts thermiques au niveau des liaisons.

La performance thermique des murs doublés par l'intérieur dépend essentiellement de la résistance thermique effective de l'isolant après déduction de l'impact des ponts thermiques intégrés. Le traitement de ces ponts thermiques est nécessaire dans la grande majorité des cas afin de rendre le bâtiment compatible avec les exigences du Grenelle.

- L'isolation thermique par l'extérieur (ETI) consiste à placer autour du bâtiment une double peau isolante couverte par un sous-enduit qui maroufle une armature de fibre de verre. Un enduit de finition vient terminer le système. Dans le cas des ossatures bois, cette isolation est réalisée sous bardage, les isolants sont insérés entre les ossatures bois, elles-mêmes fixées au support au moyen d'équerres. Quant au bardage, il est fixé directement sur l'ossature bois.

Ce type d'isolation est généralement préférée à l'isolation par l'intérieur car elle offre de nombreux avantages, tels que la prévention de la condensation de l'humidité et l'utilisation de la masse thermique du bâtiment, ainsi que le traitement efficace des différents ponts thermiques et des liaisons courantes généralement observés avec l'isolation par l'intérieur. Ce type d'isolation trouve sa place aussi bien en rénovation qu'en construction neuve mais requière des précautions spécifiques de mise en oeuvre.

- Le système constructif d'isolation répartie (ITR) consiste quant-à-lui à utiliser l'épaisseur de la paroi porteuse pour isoler. Ce système permet de réduire les ponts thermiques des planchers tout en tirant partie de l'inertie des murs pour récupérer les apports solaires en hiver et réduire l'inconfort en été.

Dans notre cas d'étude, nous considérons des murs sans irrégularités, composés de matériaux sains. La figure 2.20 présente les trois types de murs que nous considérons :

- **NI** : Mur non isolé (mur de référence).
- **ITI** : Mur isolé par l'intérieur.
- **ETI** : Mur isolé par l'extérieur.

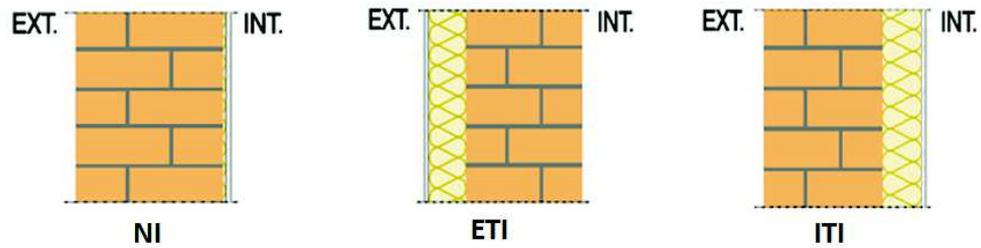


FIGURE 2.20: Configuration des murs considérés.

Ces murs sont composés de 20 cm de parpaing et 8 cm d'isolant, le tout recouvert d'enduits intérieur et extérieur (Tableau 2.14).

Composants	Épaisseurs [m]	Conductivités thermiques [W/mK]
Parpaing	0,200	1,60
Isolant	selon le cas	selon le type d'isolant (Tableau 2.7)
Enduit intérieur	0,014	0,25
Enduit extérieur	0,015	0,40

Tableau 2.14: Caractéristiques des composants du mur.

Pour évaluer la fiabilité énergétique des murs étudiés, il est nécessaire de définir dans un premier temps le mode de défaillance à étudier. Dans ce cas d'étude, le bon fonctionnement du système est assuré tant que la consommation énergétique ne dépasse pas la consommation maximale imposée par la réglementation (Cepmax). Cette consommation est évaluée sur la base des pertes de chaleurs qui s'opèrent à travers les différents murs étudiés. Une surface unitaire de 1 m² sans défauts ni ponts thermiques présente un transfert identique en régime permanent pour les cas ITI et ETI, qui peut être évalué grâce à l'équation (1.16) donnée dans le chapitre précédent.

Pour simplifier les calculs de la consommation énergétique, il est généralement possible de calculer les pertes de chaleur en utilisant le concept des degrés-jours unifiés (DJU) plutôt que la différence de température ponctuelle utilisée dans la relation (1.16). Ce concept, est largement utilisé dans la littérature [43, 67, 74], et permet de déterminer les pertes de chaleur annuelles Q_A , comme suit [39] :

$$Q_A = 86400 U \text{ DJU} \quad (2.18)$$

avec U le coefficient de transmission surfacique et DJU les degrés-jours unifiés.

L'hypothèse sous-jacente de la méthode des DJU est que, pour maintenir une température intérieure spécifique, il existe une température extérieure dite "température de base" telle que si la température de l'environnement extérieur est supérieure à cette température de base, un refroidissement/climatisation de l'air sera nécessaire, tandis qu'au contraire, si la température de l'environnement extérieur est inférieure à la température de base, des besoins en chauffage seront nécessaires [75].

Pour un lieu donnée, ces DJU représentent la somme des différences de températures journalières par rapport à une température de base imposée toute au long de l'année. En France, ce concept est également connu sous "DJU-base18" car la température de base est de 18°C. On distingue deux valeurs de DJU permettant le calcul des besoins en chauffage et en climatisation [75] :

$$DJC = \sum_{i=1}^{PC} (T_{base} - T_o(i))^+ \quad (2.19)$$

$$DJR = \sum_{i=1}^{PR} (T_o(i) - T_{base})^+ \quad (2.20)$$

où DJC est la valeur du degré-jour de chauffe et DJR est la valeur du degré-jour de réfrigération, T_{base} est la température de base de l'environnement à chauffer (ex. 18°C en France, 18,5°C en GB et 18,3°C aux USA), $T_o(i)$ est la température extérieure moyenne au jour i , PC représente la période de chauffe allant généralement de octobre à mai [76, 11], tandis que PR représente la période de refroidissement, et $(.)^+$ indique que seuls les valeurs positives sont considérées.

Le tableau 2.15 compare quelques DJU relatives à trois villes françaises pour la même année. Les Degrés Jours de Chauffe (DJC) sont beaucoup plus importants dans les régions froides du centre, telle que Clermont-Ferrand, nécessitant ainsi des besoins en chauffage plus importants, contrairement aux régions méditerranéennes aux Degrés Jours de Réfrigération (DJR) plus importants, nécessitant ainsi des besoins plus importants en climatisation.

DJU (K)	Nantes	Clermont-Ferrand	Marseille
DJC (K)	2124,8	2488,62	1343,2
DJR (K)	101,5	119,8	756,5

Tableau 2.15: Valeurs de DJU pour trois villes françaises.

2.5.1.1 Evaluation de la consommation énergétique

La consommation énergétique annuelle se déduit directement des pertes de chaleur. Deux termes sont à distinguer, $E_{C,C}$ relatif à la consommation en chauffage et $E_{C,R}$ relatif à la consommation en réfrigération [77] :

$$E_{C,C} = \frac{86400 U DJC}{\eta_s Hu} \quad (2.21)$$

$$E_{C,R} = \frac{86400 U DJR}{COP Hu} \quad (2.22)$$

où η_s est l'efficacité du système de chauffage ($\eta_s = 0,85$), COP est le coefficient de performance du système de refroidissement ($COP = 3,5$), Hu est la valeur calorifique

($H_u = 3,599 \times 10^6$ J/kWh). La consommation totale E_C représente alors la somme de ces deux types de consommation :

$$E_C = E_{C,C} + E_{C,R} \quad (2.23)$$

Dans le cas du mur non isolé (NI) et du mur isolé (ITI ou ETI), nous calculons la consommation énergétique à l'aide des formules précédentes (2.21) à (2.23) et les données des tableaux 2.14 et 2.15. Le Tableau 2.16 donne les consommations énergétiques annuelles obtenues dans le cas des trois villes considérées.

Dans le cas du mur non isolé, qui sert de référence, le manque d'isolation entraîne, sans surprise, d'importantes consommations énergétiques. Dans tous les cas, la consommation annuelle dépasse largement la valeur maximale autorisée par la RT2012 ($C_{epmax} = 50$ kWh/m²/an), ce qui souligne l'importance de l'isolation. Par ailleurs, les consommations obtenues en régions froides sont plus importantes que dans les régions à climat modéré tel que Marseille, en raison de leurs DJC nettement plus importants.

Dans le cas des murs isolés, le tableau 2.16 compare les consommations estimées en utilisant d'une part les propriétés thermiques moyennes fournies par les fabricants de matériaux (FAB) et d'autres part, les propriétés moyennes obtenues expérimentalement (EXP).

Dans un premier temps, nous constatons que l'isolation permet d'atteindre plus de 80% d'économies en énergie dans une région comme Nantes et plus de 78% dans une région comme Marseille, en fonction de l'épaisseur et de la nature du matériau utilisé.

Les conductivités thermiques moyennes obtenues en laboratoire ont souvent montré des performances inférieures à celles prédites par les fabricants ce qui se traduit par des consommations énergétiques plus importantes que celles basées sur les données fabricants. Cependant, dans le cas le plus défavorable, la différence de consommation ne dépasse pas 16% (cas de la LDV5 en région nantaise).

Dans le cas de la LDV, les consommations sont quasi-identiques pour les échantillons de 10 cm. Toutefois, l'écart se creuse lorsque l'épaisseur diminue, car nous avons remarqué expérimentalement qu'avec les matériaux fibreux, plus l'épaisseur diminuait, plus l'incertitude observée sur les propriétés thermophysiques augmentait. Dans le cas des échantillons d'EPS, nous remarquons également la même tendance. En effet, plus l'épaisseur est importante, plus la performance de l'isolant est maîtrisée et se rapproche de la performance prédite par le fabricant, ce qui entraîne des consommations réelles plus proches des consommations prédites.

Dans tous les cas, la déviation moyenne de la performance réelle par rapport à celle estimée dépend comme prévu de la performance réelle de l'isolant utilisé, qui varie quant à elle en fonction du type de matériau et de sa masse volumique, mais aussi de l'épaisseur utilisée. En règle générale, la variabilité des propriétés thermophysiques est beaucoup mieux ressentie avec les matériaux fibreux inorganiques, de nature facilement altérable par les aléas extérieurs. Cependant, les matériaux synthétiques (mousses organiques), de nature beaucoup plus stable semblent également être légèrement touchés par les incertitudes. D'autre part, nous remarquons que la variabilité de la performance semble plus importante dans le cas des faibles épaisseurs où la masse volumique semble moins maîtrisée.

Matériau	Nantes [kWh/m ² /an]		Clermont-Ferrand [kWh/m ² /an]		Marseille [kWh/m ² /an]	
	FAB	EXP	FAB	EXP	FAB	EXP
mur NI	83,59		97,91		59,38	
mur ITI	FAB	EXP	FAB	EXP	FAB	EXP
LDV10	18,81	18,67	22,036	21,86	13,36	13,26
LDV8	19,77	21,04	23,16	24,65	14,04	14,95
LDV5	30,71	36,48	35,97	42,73	21,82	25,92
LDR5	28,38	29,92	33,24	35,05	20,16	21,26
LDR3	38,34	35,56	44,90	41,66	27,23	25,26
EPS10	18,26	20,23	21,39	23,71	12,97	14,38
EPS5	28,69	30,22	33,61	35,40	20,38	21,47
EPS3	41,12	44,92	48,17	52,62	29,21	31,91
EPS2	49,50	57,29	57,98	67,11	35,16	40,69
PU	23,85	26,09	27,94	30,56	16,95	18,53

Tableau 2.16: Consommation énergétique annuelle en utilisant les données escomptées et les données estimées.

2.5.1.2 Dégradation à long terme de la conductivité thermique

Les consommations annuelles obtenues précédemment sont estimées pour un matériau à l'état neuf. Au fil du temps, les propriétés se dégradent en raison de l'influence de la température et de l'humidité. La figure 2.21 présente la dégradation de l'EPS et de la LDV sur quinze ans sous l'hypothèse la plus défavorable d'atteindre 50% d'humidité au bout de 15 ans. A l'état neuf, nous constatons que les propriétés isolantes de la LDV sont beaucoup plus performantes que celles de l'EPS. Cependant, de par sa nature fibreuse, la LDV est plus affectée par l'humidité, ce qui engendre une dégradation beaucoup plus importante au fil du temps. De plus, l'incertitude attendue sur ce type de matériau est naturellement plus importante.

Lors de la simulation, les valeurs de conductivité annuelle sont interpolées sur la base de données ponctuelles fournies dans la littérature technique [57]. En laboratoire, aucun essai de vieillissement n'a pu être réalisé, nous décidons alors d'étendre nos résultats en utilisant un intervalle de confiance à 95%. Cet intervalle permet d'évaluer le degré de précision à accorder aux consommations prédites et nous donne une visualisation de l'incertitude de l'estimation.

La figure 2.22 présente l'évolution des consommations annuelles moyennes obtenues avec la conductivité thermique des matériaux EPS10 et LDV10 illustrée sur la figure 2.21. Dans le cas de la LDV, la consommation énergétique annuelle augmente très rapidement contrairement à l'EPS. Ainsi, même si le polystyrène possède des propriétés thermiques moins performantes à l'état neuf, il permet de garantir le respect de l'exigence Cepmax, pendant beaucoup plus d'années. En effet, comme nous pouvons le constater de la figure 2.22a, le mur isolé à la LDV10 atteint la limite imposée de 50 kWh/m² en moins de 4 ans contre environ 8 ans pour l'EPS10.

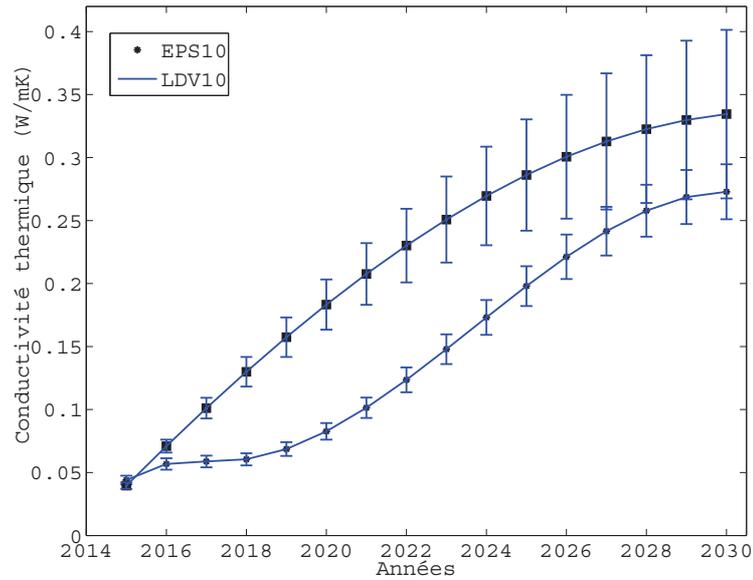


FIGURE 2.21: Dégradation du polystyrène et de la laine de verre.

La figure 2.22b présente l'évolution de l'intervalle de confiance associée à la consommation tout au long de la DDV. Les limites supérieure et inférieure permettent de délimiter l'intervalle de consommation selon l'incertitude annuelle associée à la conductivité thermique des isolants considérés. En nous basant sur la borne supérieure des estimations, nous observons que la LDV peut atteindre C_{epmax} au bout de 2 ans contre 5 ans pour l'EPS.

Ces résultats soulignent l'importance de considérer les performances thermiques des isolants à long terme lors du choix des matériaux.

2.5.1.3 Analyse de fiabilité

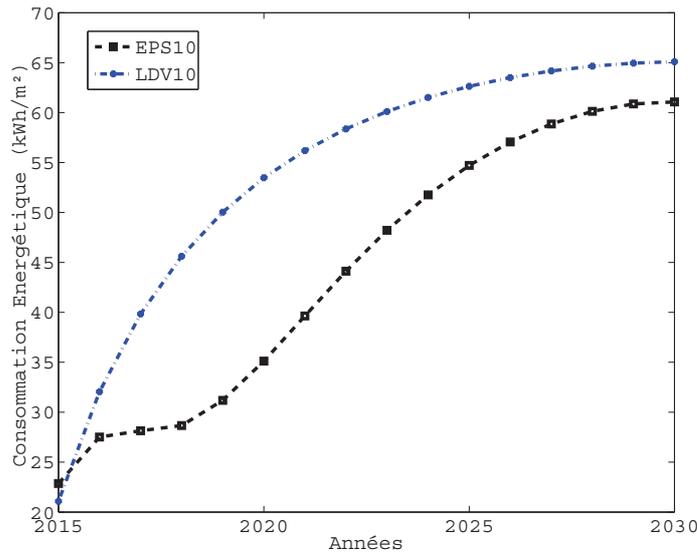
L'analyse de fiabilité permet de décrire l'aptitude de l'isolant à garantir l'exigence réglementaire C_{epmax} tout au long de sa durée de vie en termes de probabilités de défaillance. La probabilité de défaillance donne une mesure du degré de confiance à accorder à l'isolation et correspond ainsi à la probabilité de violation du critère d'état limite. La fonction d'état limite G est décrite en fonction de C_{epmax} comme suit :

$$G(\lambda, t) = C_{epmax} - E_C(\lambda, t) \quad (2.24)$$

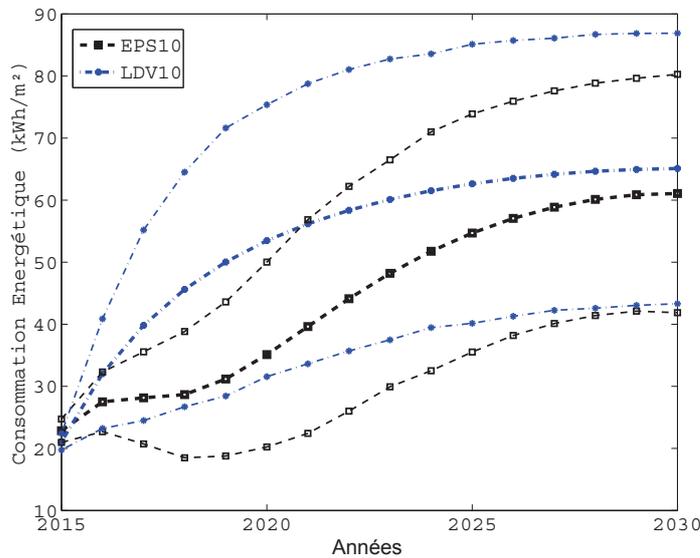
où λ la variable aléatoire de conductivité définie par la loi de probabilité et les moments statistiques obtenus expérimentalement (tableaux 2.7 et 2.13) :

$$\lambda \sim \text{LN}(\mu_\lambda, \sigma_\lambda) \quad (2.25)$$

Au fil du temps, μ_λ se dégrade et σ_λ augmente. Chaque année, la fonction d'état limite G est évaluée et la probabilité que la consommation annuelle dépasse C_{epmax} est déterminée en utilisant la méthode FORM (Annexe C).



(a) Consommation moyenne.



(b) Prise en compte de l'incertitude.

FIGURE 2.22: Evolution de la consommation énergétique en utilisant le Polystyrène ou la Laine de verre.

En considérant à présent les incertitudes croissantes associées à la conductivité thermique des isolants (Figure 2.21), nous déterminons l'évolution de la probabilité de défaillance annuelle (Figure 2.23) attendue dans le cas des murs isolés à la laine de verre et au polystyrène, respectivement.

En observant les probabilités annuelles calculées (Tableau 2.17), nous constatons que pendant les dix premières années, les deux isolants sont considérés extrêmement fiables en dépit des incertitudes croissantes, car les valeurs de la probabilité de défaillance restent inférieures à 10^{-4} . Cependant, au delà de la dixième année, la probabilité de défaillance augmente significativement jusqu'à atteindre des valeurs non-

négligeables. Il est clair que la fiabilité de l'isolation ne dépend pas uniquement de

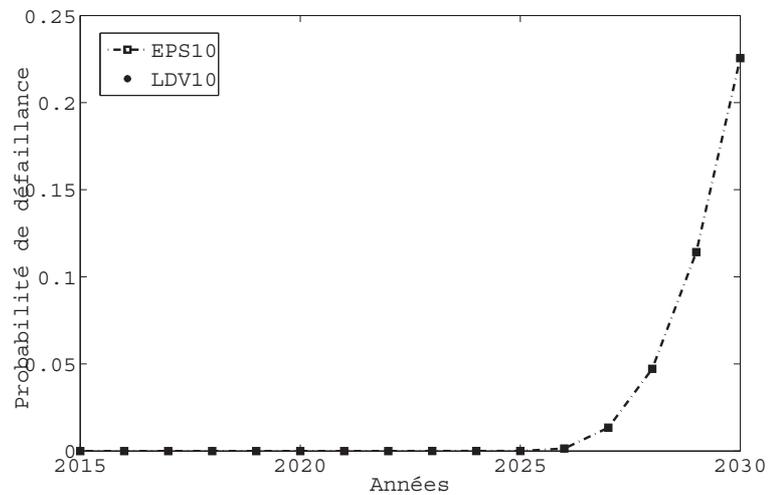


FIGURE 2.23: Evolution de la probabilité de défaillance annuelle dans le cas de laine de verre.

Année	P_f	
	EPS ₁₀	LDV ₁₀
1 – 7	0	0
8	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$
9	$1,49 \cdot 10^{-7}$	$1,49 \cdot 10^{-7}$
10	$4,19 \cdot 10^{-5}$	$4,19 \cdot 10^{-5}$
11	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$
12	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$
13	$4,72 \cdot 10^{-2}$	$5,65 \cdot 10^{-2}$
14	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,44 \cdot 10^{-1}$
15	$2,25 \cdot 10^{-1}$	$2,66 \cdot 10^{-1}$

Tableau 2.17: Evolution de la probabilité de défaillance annuelle.

la performance isolante du matériau mais aussi de la région dans laquelle le mur est situé. La figure 2.24 présente l'évolution de la probabilité de défaillance d'un mur isolé à l'EPS10, dans différentes régions présentées précédemment (Nantes, Clermont-Ferrand ou Marseille). Alors que la probabilité de défaillance augmente dans tous les cas, nous observons des probabilités de défaillance plus importantes à Clermont-Ferrand et Nantes en raison de leurs climats froids, nécessitant beaucoup plus de consommation énergétique. A l'opposé, le mur isolé à Marseille semblerait rester fiable tout au long de la DDV avec des probabilités de défaillance quasi-négligeable (inférieure à 10^{-9}).

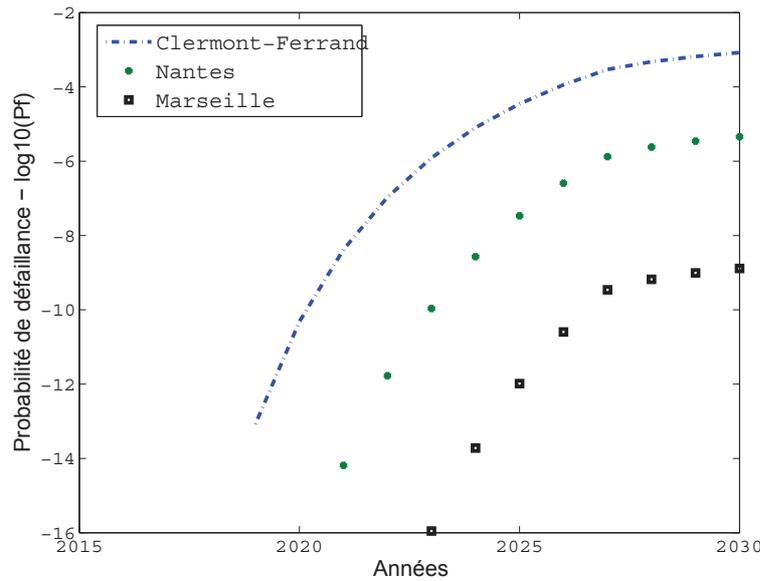


FIGURE 2.24: Evolution de la probabilité de défaillance de l'isolation en fonction des régions.

L'étude de fiabilité apporte une confiance supplémentaire lors des simulations. En général, la plupart des matériaux étudiés expérimentalement ont montré une performance initiale inférieure à la performance nominale escomptée, ce qui entraîne de légères sur-consommations. Toutefois, l'étude de fiabilité a permis de montrer que l'impact de ces incertitudes n'était pas significatif, et que la performance de l'isolation restait fiable. A long terme, la fiabilité de l'isolation baisse en raison de la dégradation des propriétés isolantes du matériau. Parallèlement, l'incertitude sur la conductivité λ ne fait qu'augmenter au fil du temps, et ne peut donc plus être négligée.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'impact de la région considérée lors du choix de la solution technique. En général, dans la littérature, la variabilité des performances thermiques des matériaux est négligée en toutes circonstances. Nos résultats ont montré que dans le cas où l'isolation est réalisée en région à climat modéré, l'isolation reste fiable en dépit des incertitudes sur la performance thermique des matériaux et peuvent ainsi être négligées. A l'opposé, les probabilités de défaillance obtenues en région froide et humide indiquent que la dégradation des matériaux et l'incertitude associée ne peuvent être négligées. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en considération l'agressivité climatique de la région.

Notre étude a permis de mettre en évidence l'impact de la performance variable de l'isolant sur la fiabilité de l'isolation au cours de sa DDV. En effet, dans le cas des deux isolants étudiés (LDV et EPS), un choix se basant sur les propriétés initiales aurait conduit au choix de la LDV, qui possède de meilleures propriétés initiales. Néanmoins, au cours du temps, sa nature compressible et facilement altérable par les transferts hygrothermiques, fait qu'elle se dégrade plus vite que l'EPS et risque d'atteindre Cepmax plus rapidement.

Grâce à l'analyse de fiabilité, nous avons montré que l'utilisation de la LDV était finalement moins fiable sur le long terme que l'EPS, car les probabilité de défaillances étaient légèrement plus élevées avec la LDV comme matériau d'isolation.

2.6 CONCLUSION

De nombreux paramètres extérieurs peuvent altérer les performances nominales d'un isolant. Ces paramètres peuvent être liés au processus de fabrication, à la technique de mesure, aux conditions de stockage et de transport, et aux conditions environnementales.

Dans ce travail, nous avons proposé une étude expérimentale qui a permis de quantifier la variabilité de la conductivité thermique et de la masse volumique des matériaux les plus couramment utilisés en isolation des façades. L'incertitude associée à chaque type de matériau a été décrite par des lois de probabilité et dans le but de pouvoir les intégrer dans le processus de simulation.

Nous avons constaté que la performance thermique effective des matériaux est souvent différente de la valeur nominale. Cependant, la perte de performance se ressent plus avec les matériaux fibreux, à cause de leur forte compacité, qu'avec les matériaux organiques, dotés d'une meilleure stabilité géométrique. Par ailleurs, nous avons constaté que la variabilité des résultats était également liée à l'épaisseur du matériau étudié. En effet, la variabilité obtenue sur la performance des matériaux épais, même fibreux, était plus faible que celle obtenue sur les isolants de faible épaisseur.

Un modèle analytique permettant de quantifier l'incertitude sur la conductivité thermique a été calibré grâce à nos essais expérimentaux. L'intérêt de ce modèle réside dans le fait qu'il permet de quantifier l'incertitude que l'on pourrait avoir sur un type d'isolant.

En pratique, les incertitudes sur la performance initiale des isolants sont souvent considérées comme négligeables en phase de conception, parce que les contrôles sont supposés rigoureux. Dans ce sens, nos résultats ont montré que l'incertitude liée à la conductivité initiale de l'isolant pouvait éventuellement être négligée, du moins avec les matériaux étudiés.

Toutefois, à long terme, la prise en compte des incertitudes croissantes dues à la dégradation du matériau s'avère nécessaire et peut conditionner le choix de conception. A cet effet, l'analyse de fiabilité permet de mesurer la capacité de l'isolant à garantir le niveau d'exigence tout au long de la durée de vie, en dépit des incertitudes. En d'autres termes, elle permet d'identifier à partir de quel moment on pourrait s'attendre à une défaillance de l'isolant. Une application sur un cas de mur de façade a permis de montrer qu'en fonction de l'agressivité du climat, de la cinétique de dégradation du matériau et des incertitudes croissantes associées à la perte de performance, des défaillances énergétiques pouvaient survenir au cours des premières années de fonctionnement, rendant ainsi l'investissement en isolation peu amorti.

CHAPITRE III

DÉFAUTS DE MISE EN ŒUVRE

3.1 INTRODUCTION

Il est admis qu'une isolation réussie passe par une mise en œuvre efficace du système d'isolation, pour assurer la continuité thermique de l'enveloppe du bâti. Pendant longtemps, l'attention était essentiellement portée à la performance des matériaux uniquement. Cependant, plus un bâtiment est isolé, plus les ponts thermiques et les défauts de mise en œuvre deviennent les seuls points de passage de la chaleur vers l'extérieur.

A l'heure actuelle, avec le niveau d'exigence des nouvelles réglementations, il devient nécessaire de vérifier la qualité de la mise en œuvre et le respect des règles de pose. Certains défauts qui pouvaient être jusque là considérés comme négligeables ne le sont plus, parce qu'au delà de leur impact énergétique indéniable, ces discontinuités deviennent les points froids entraînant la perte de confort, la condensation et les pathologies potentielles qui leur sont associées.

3.2 CONTINUITÉ DE L'ENVELOPE DU BÂTIMENT

Avec l'apparition de la RT2000, la notion de paroi est apparue pour chasser les fuites et pour tenir compte des apports gratuits. Lorsqu'il suffisait auparavant de considérer la conductivité thermique des matériaux, il devient essentiel aujourd'hui de tenir compte des points de discontinuité de l'enveloppe. Néanmoins, il est encore difficile de prévoir avec précision l'impact de ces discontinuités sur la consommation d'énergie.

3.2.1 Ponts thermiques

Un Pont Thermique (PT) est défini comme une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique, par ailleurs uniforme, est modifiée de façon sensible par :

- la pénétration totale ou partielle de l'enveloppe du bâtiment par des matériaux ayant une conductivité thermique différente ;
- le changement local de l'épaisseur des matériaux de la paroi, ce qui revient à changer localement la résistance thermique ;
- la différence entre les surfaces inférieure et extérieure, comme il s'en produit aux liaisons entre parois.

Deux types de PT sont distingués :

1. **Ponts thermiques linéiques** : il s'agit des déperditions provoquées par les liaisons entre les éléments constructifs (Figure 3.1). Ils sont caractérisés par un coefficient linéique Ψ exprimé en $[W/mK]$.
2. **Ponts thermiques structurels** : il s'agit des déperditions ponctuelles liées aux procédés d'accroche des isolants ou de leur parement, tel que l'impact des chevilles et des équerres. Ils sont exprimés en $[W/K]$.

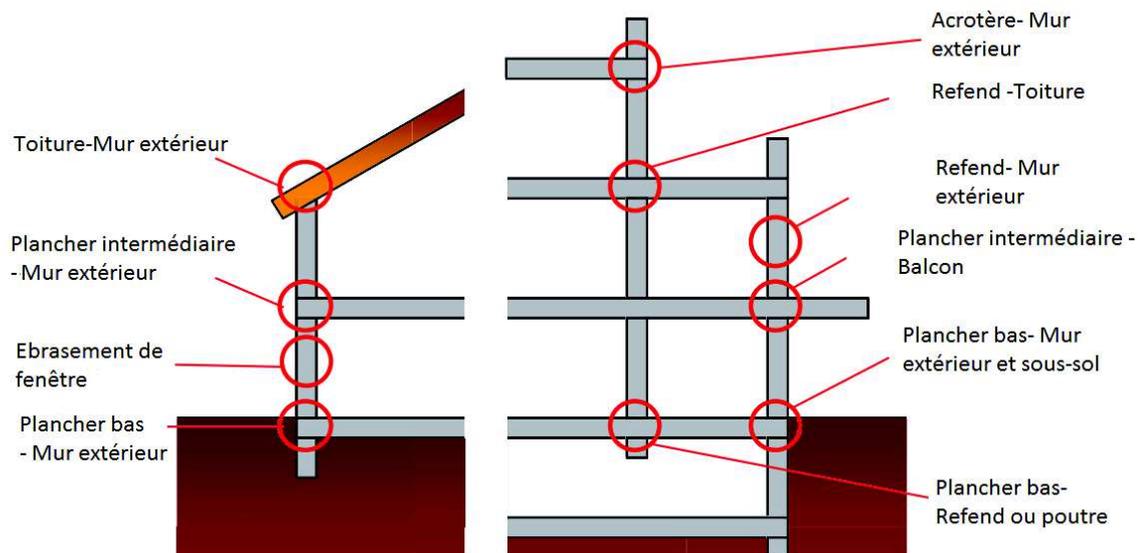


FIGURE 3.1: Localisation des ponts thermiques.

En pratique, le traitement complet des ponts thermiques permet de réduire fortement leur impact et d'améliorer ainsi la performance de l'enveloppe. Néanmoins, il est encore difficile de les supprimer complètement. Par conséquent, il est nécessaire de les intégrer dans le calcul de la résistance de la paroi. La figure 3.2 présente l'impact des ponts thermiques sur les déperditions dans des bâtiments à différents niveaux d'isolation.

Dans la littérature, on estime que les pertes de résistance murale seraient de 20 à 30% supérieures à celles du modèle idéalisé, en raison des PT [?] et pourraient même dépasser 40% dans certains bâtiments [78, 79]. La littérature scientifique est très riche dans ce domaine. De nombreux cas pratiques sont traités, notamment liés aux jonctions entre deux éléments constructifs, les ouvertures ou les raccords entre les éléments [? 80, 81, 82, 83], mais aussi les différents effets liés au refroidissement de la surface intérieure et la condensation qui en résulte [80, 84]. Nous pouvons citer les travaux de ? (?) [?] qui ont étudié l'influence des PT dans les éléments de construction verticaux, notamment les doubles parois utilisées en Grèce et constatent que les PT entraînent 30% de besoins en chauffage additionnels. Kosny and Christian (1995) [85] se sont attelés à l'évaluation des valeurs de R de différentes configurations de murs à ossature métallique. Ils ont constaté que la valeur de R était étroitement liée à la configuration du mur, et que dans certains cas, le mur perdait 50% de sa résistance initiale. Abdou and Murali (1994) [86] ont étudié les effets des joints de mortier sur la résistance thermique des murs non-isolés. Ces derniers constatèrent que la résistance d'un mur de maçonnerie en béton avec des

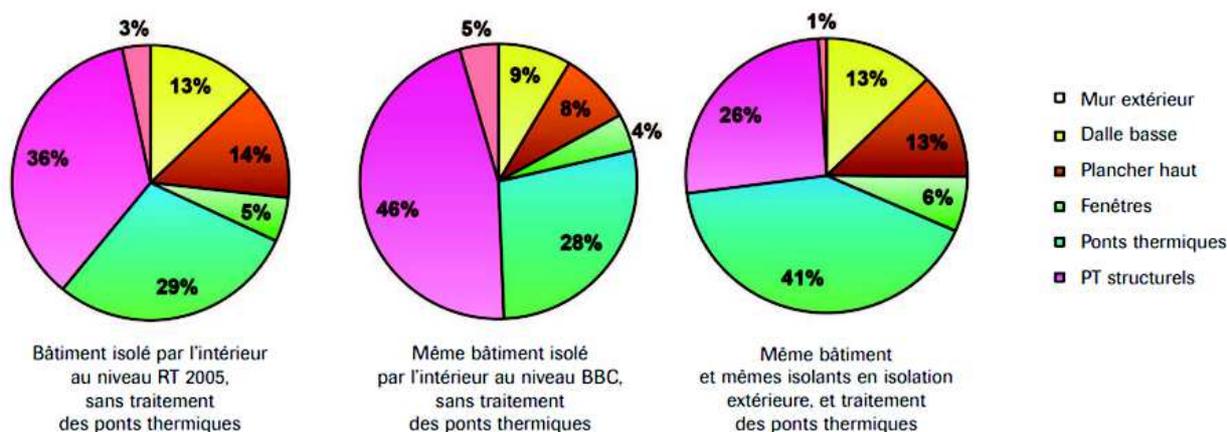


FIGURE 3.2: Répartitions des déperditions par les parois selon différents niveaux de d'isolation [57].

jointes de mortier augmente de 8%. Dans le cas de l'isolation des toits, Al Sanea (2003) [87] s'est intéressé à l'effet des PT entre les éléments constituant les toits de bâtiment et a constaté qu'environ 40% des pertes de chaleur par les toits se faisait par les côtés alors que ces derniers ne représentent que 20% de la surface du toit, etc. Toutes ces études ont permis d'évaluer l'impact de différents ponts thermiques en contexte réel.

D'autre part, au delà de la problématique énergétique, il faut souligner le fait que la présence des ponts thermiques génère un risque de pathologie du bâtiment. En effet, les ponts thermiques créent à l'intérieur des bâtiments des points froids sur lesquels l'humidité de l'air peut se condenser. Cela génère alors des traces d'humidité, des moisissures (entraînant odeurs et allergies) et des coulures [57].

A la différence des structures planes, le transfert de chaleur au niveau d'un PT est caractérisé par un flux à deux ou trois dimensions [88]. Il est assez facile de prendre en compte la perte de chaleur supplémentaire liée à un pont thermique grâce à l'utilisation des coefficients de transmission linéique et ponctuel. Cependant, il est plus difficile de considérer les aspects dynamiques de ce phénomène (retards/décalages et amortissement entre l'amplitude des températures extérieures et intérieures), ce qui peut fausser les résultats surtout lorsque l'inertie du pont thermique est différente de celle de la paroi [89].

A l'heure actuelle, de par l'exigence des nouveaux bâtiments, il devient nécessaire de considérer ces aspects tridimensionnels et de les intégrer dans le processus de simulation, qui ne considère jusqu'à présent que des flux à une dimension. Dans ce sens, de nombreuses approches sont utilisées pour modéliser les effets des ponts thermiques, en développant des modèles d'approximation ou de régression basés sur des méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis [90, 91], des volumes finis [87] ou des différences finies [92, 93]. Ces méthodes requièrent néanmoins un effort numérique important mais commencent à être progressivement intégrées dans les programmes de simulation.

3.2.2 Défauts de mise en œuvre

Les défauts de mise en œuvre sont des discontinuités dans l'enveloppe du bâtiment qui apparaissent pour des raisons pratiques lors de l'installation de l'isolation. Ces défauts jusque là, considérés comme négligeables, ne le sont plus lorsqu'une performance élevée est recherchée, parce que leur impact dans les déperditions devient prépondérant, tant sur le plan énergétique que pathologique.

A la différence des autres secteurs industriels, le secteur du bâtiment doit tenir compte des variations inévitables dans la mise en œuvre et la conception. Dans la pratique, les concepteurs s'autorisent une certaine marge et acceptent le travail des campagnons tant que la tâche demandée est convenablement réalisée, et ceci indépendamment du niveau de précision obtenu [23].

Dans le cas spécifique de l'isolation dans le bâtiment, les défauts sont généralement dus à :

- une main d'œuvre non qualifiée : le manque de rigueur et de formation des campagnons en est principalement la cause ;
- un manque de rigueur lors des contrôles : il est important d'avoir recours à des contrôleurs expérimentés et bien formés car la qualité du contrôle a une influence majeure sur la performance réelle de l'isolation.

Dans la littérature scientifique, très peu d'études traitent concrètement les défauts de mise en œuvre mais de nombreux auteurs s'accordent à dire que leur présence influe significativement sur les propriétés thermiques effectives de l'isolation [94, 95, 17]. Avec l'apparition de la thermographie, il est possible de réaliser des audits et des inspections de contrôle pour détecter les défauts qui entraînent les fuites d'air [96] et les endroits à plus faible résistance thermique [97].

Les défauts de mise en œuvre sont très souvent identifiés par leurs conséquences. A titre d'exemple, El Diasty (1988) [23] cite les défauts de mise en œuvre comme principales anomalies, en plus des PT, à entraîner l'apparition de points de condensation dans les bâtiments. Ahzahar et al. (2011) [98] considèrent également que ces défauts sont à l'origine des problèmes de défaillance de l'isolation, de sur-coût et de retard. Dans des études de cas pratique, Othman et al. (2015) [99] citent les défauts de mise en œuvre pour expliquer l'apparition de moisissures dans des bâtiments hospitaliers en Malaisie, en plus des facteurs liés à la ventilation, à la conception et à l'environnement. En Italie, lors d'un projet de rénovation d'un bâti historique, Ascione et al. (2011) [21] ont vérifié le maintien de la performance thermique en réalisant des essais in-situ, et ont bien constaté que les performances obtenues étaient en réalité bien loin de celles estimées analytiquement en raison de l'exécution non conforme. Toutefois, aucune étude ne cherche à quantifier l'impact de ces défauts sur la performance énergétique, puisqu'il est encore très difficile d'estimer avec exactitude la quantité des défauts de mise en œuvre dans l'isolation, en raison de la variation des mains d'œuvre d'un projet à l'autre [23]. Par conséquent, aucun modèle de simulation n'intègre des modules permettant d'estimer la perte de performance liée à la présence de défauts d'installation.

3.3 IMPACT DES DÉFAUTS DE MISE EN OEUVRE SUR LA PERFORMANCE DE L'ISOLATION

L'objet de notre travail est de quantifier l'impact des défauts de mise en œuvre sur la performance thermique de l'isolation. La présence de ces défauts dans l'isolation crée une hétérogénéité dans le mur conduisant ainsi à des variations de la résistance thermique (Figure 3.3) et par conséquent à des variations de flux de chaleur.

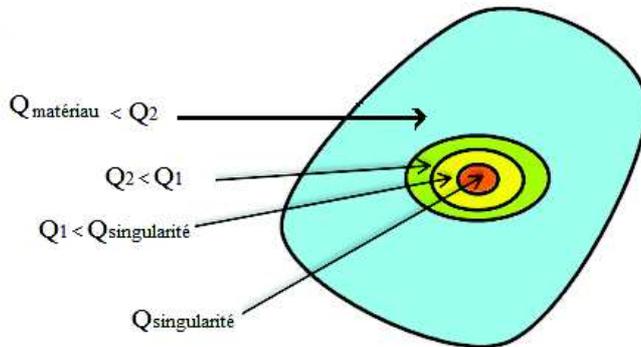


FIGURE 3.3: Pertes de chaleur dans un matériau en présence de défaut.

Pour faciliter le calcul de la demande énergétique et la simulation du flux total traversant la paroi, nous introduisons le concept d'isolation équivalente. Cette isolation équivalente nous permet d'utiliser une conductivité unique, que nous appelons "Conductivité effective" du matériau, pour traduire la résistance totale du matériau avec défaut. Pour cela, en fonction du type de défaut considéré, nous proposons dans ce qui suit un modèle analytique pour le calcul de cette conductivité effective.

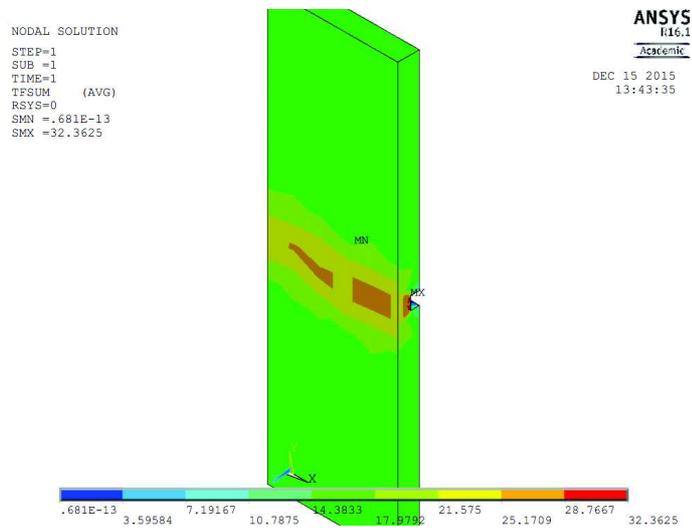
3.3.1 Concept d'isolation équivalente

Comme annoncé précédemment, la conductivité effective permet de représenter la résistance globale d'un isolant avec défaut possédant différents degrés de résistance, par une valeur unique correspondant à un matériau homogène équivalent. En réalité, la conductivité du matériau défectueux ne change pas, c'est son coefficient de transmission thermique qui change. La figure 3.4 présente un panneau en polystyrène contenant une rainure et soumis à un flux de chaleur stationnaire. Nous pouvons constater que plus la taille du défaut est importante, plus la surface affectée est importante et plus le nombre des isothermes autour du défaut augmente indiquant un gradient de température plus élevé et différents degrés de déperditions.

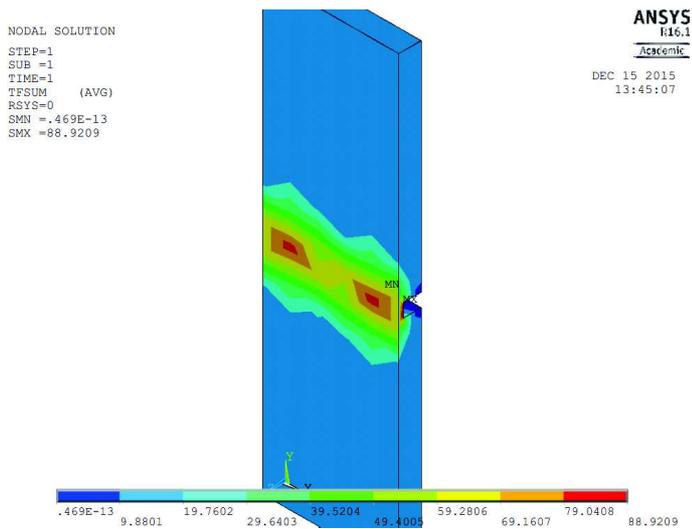
Pour pouvoir intégrer les déperditions liées aux défauts dans les modèles de simulation, nous admettons une *isolation équivalente* représentée par un isolant sain sans défaut, possédant une résistance identique à celle de l'isolant défectueux. Ainsi, la conductivité effective à considérer est calculée sur la base de la résistance globale de l'isolant défectueux.



(a) Rainure à 1 cm d'épaisseur.



(b) Rainure à 2 cm d'épaisseur.



(c) Rainure à 4 cm d'épaisseur.

FIGURE 3.4: Flux de chaleur dans un matériau en présence de différentes tailles de défauts.

Pour obtenir cette conductivité effective, un couplage des techniques de thermographie et de modélisation numérique est proposé, selon la procédure détaillée dans l'organigramme de la figure 3.5.

Dans un premier temps, une étude expérimentale est réalisée. Chaque isolant défectueux est testé en utilisant le dispositif présenté dans la sous-section 2.4.2. En utilisant un couplage entre la méthode de la plaque chaude gardée et la thermographie, un flux de chaleur stationnaire est imposé en amont de l'isolant défectueux ; la caméra-IR permet de mesurer le champ de températures ($T_{\text{ext-IR}}$) en surface extérieure de l'échantillon.

Dans un deuxième temps, le défaut est modélisé par la méthode des éléments finis dans un modèle préalablement calibré sur les échantillons sans défauts. Une analyse en régime permanent est réalisée en imposant les conditions aux limites expérimentales en termes de convection et de température appliquée. L'analyse par éléments finis permet alors d'obtenir un autre champ de température à la surface extérieure du matériau ($T_{\text{Ext-EF}}$).

Pour déterminer la conductivité effective, nous devons résoudre un problème inverse. Une procédure d'optimisation est utilisée pour corriger le champ obtenu numériquement ($T_{\text{Ext-EF}}$) de façon à le rapprocher le plus possible du champ expérimental ($T_{\text{Ext-IR}}$). Numériquement, nous discretisons les champs obtenus ($T_{\text{Ext-EF}}(256, 360)$ et $T_{\text{Ext-IR}}(\text{nb.noeuds}(x), \text{nb.noeuds}(y))$) en 25 sous-matrices de température ($T_{\text{Ext-IR}}(\frac{256}{5}, \frac{360}{5})$ et $T_{\text{Ext-EF}}(\frac{\text{nb.noeuds}(x)}{5}, \frac{\text{nb.noeuds}(y)}{5})$). La conductivité thermique est déterminée au niveau des 25 éléments associés aux 25 sous-matrices de température et elle est ajustée grâce à la méthode des moindres carrés. Ainsi, la conductivité thermique en chaque point est calibrée en minimisant l'écart quadratique entre les champs de température expérimental et numérique. La conductivité effective globale λ^* représente ensuite la conductivité thermique moyenne de l'échantillon.

3.3.2 Défauts étudiés

Les défauts qui nous intéressent sont ceux communément rencontrés dans la pratique, lors de la pose des panneaux pour l'isolation des façades :

1. **Rainures (EPS-R)** : ce sont des défauts que l'on trouve généralement avec les matériaux synthétiques denses et difficilement compressibles. Il s'agit de défauts plutôt réguliers réalisés pour faire passer les gaines et les fils électriques (Figure 3.6a).
2. **Ouvertures (LDV-O)** : ce type de défauts se trouve généralement entre deux panneaux d'isolation. Ils apparaissent suite à un tassement ou une mauvaise installation des panneaux. Étant plus répandus avec les matériaux souples et fibreux, ils peuvent être considérés comme un cas particulier de la rainure, où la profondeur du défaut serait égale à l'épaisseur du panneau isolant (Figure 3.6b).
3. **Ecrasement (LDV-Ec)** : ce type de défaut est généralement observé sur les matériaux souples facilement compressibles. Dans ce cas, le défaut entraîne une variation de la géométrie du matériau au-delà du point d'écrasement (Figure 3.6c).

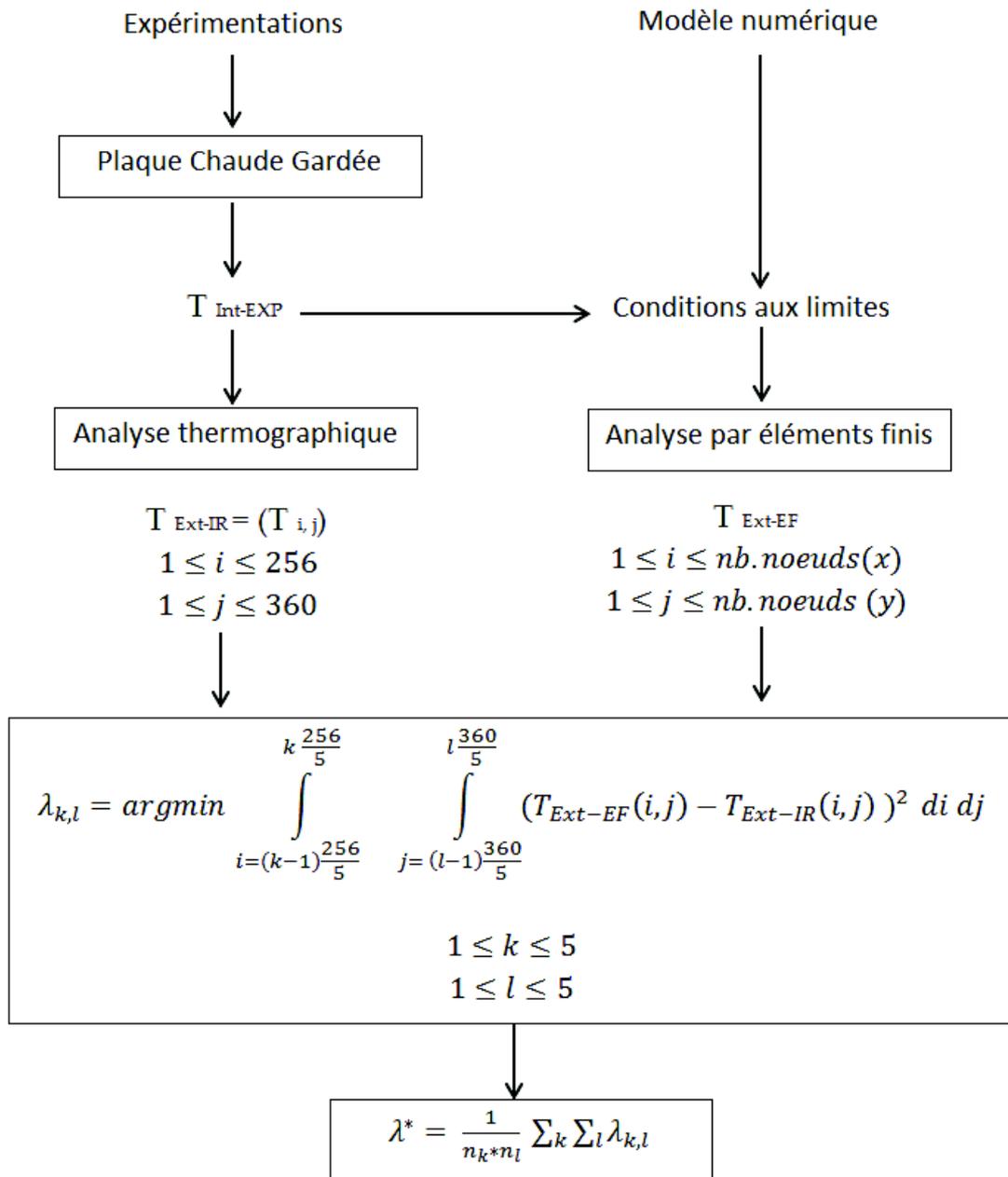


FIGURE 3.5: Procédure de détermination de la conductivité effective.

4. **Passage de fils (LDV-Pfils)** : avec les matériaux compressibles, à la différence des matériaux synthétiques et denses, la présence de gaines et de fils électriques engendre très souvent un écrasement de la matière et la présence de trous à certains endroits pour le passage des fils (Figure 3.6d).

Le tableau 3.1 présente les défauts étudiés et le nombre d'échantillons analysés. Le code choisi combine le type de l'isolant utilisé d'une part et le type et la taille de défaut d'autre part. A titre d'exemple, EPS5 – R3 représente un isolant en polystyrène de 5 cm, contenant une Rainure R de largeur 3 cm, etc. Pour réduire l'incertitude sur la performance initiale du matériau, les échantillons étudiés sont de masse volumique équivalente et proviennent du même lot de production.

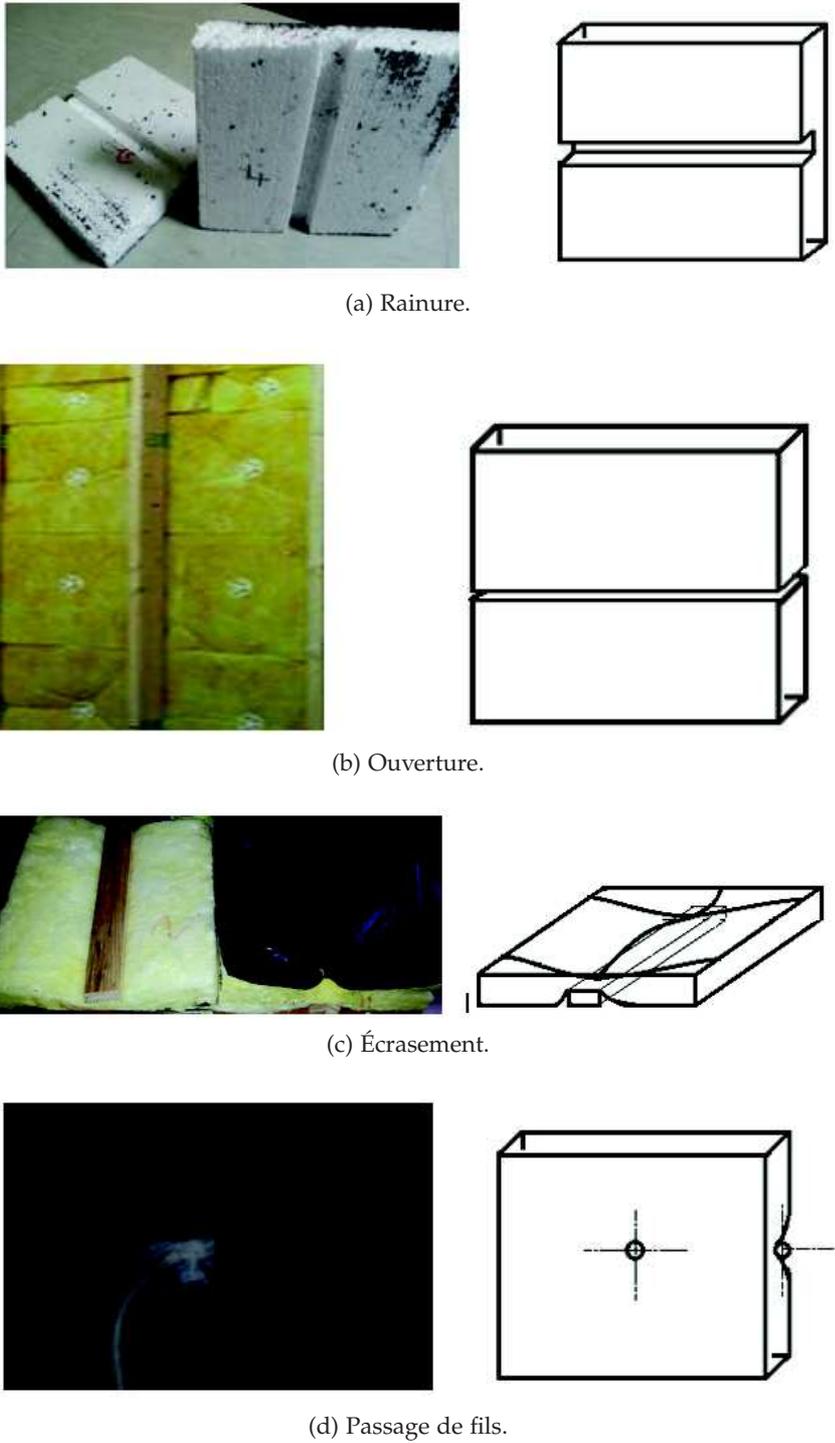


FIGURE 3.6: Défauts étudiés.

3.3.3 Etude expérimentale

Les échantillons de dimensions 300×300 mm sont testés à l'aide de la méthode de la plaque chaude gardée. Le support expérimental utilisé est identique à celui utilisé pour la caractérisation des matériaux sains (Figure 2.10).

Type de défaut	Code	Épaisseur	Dimensions du défaut		Nombre d'essais
		ep [mm]	Épaisseur t_d [mm]	Largeur w_d [mm]	
Rainure	EPS5-R3	50	20	30	6
	EPS5-R5	50	20	50	6
	EPS4-R1	40	10	30	6
	EPS4-R2	40	20	30	6
Ouverture	LDV8-O5	80	80	5	5
Écrasement	LDV5-EC2	50	20	/	5
	LDV8-EC2	80	20	/	4
	LDV8-EC4	80	20	/	4
Passage de fils	LDV5-Pf2	50	$\phi = 20$	/	5

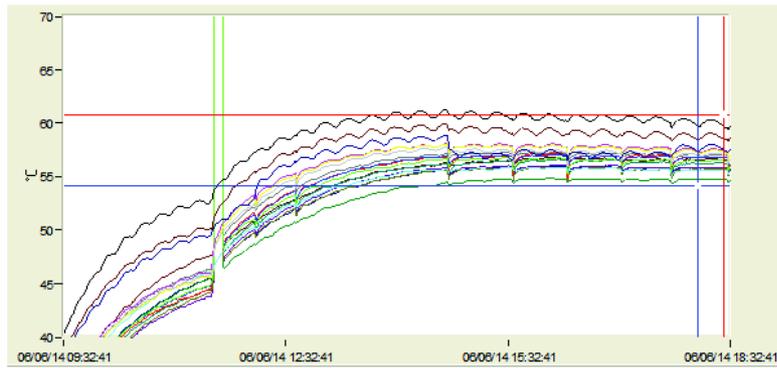
Tableau 3.1: Description de la campagne d'essais sur les matériaux avec défauts.

Les échantillons sont pris en sandwich entre la plaque chaude et l'environnement extérieur. La résistance placée en amont de la plaque chaude impose un gradient de température entre la surface intérieure de l'échantillon et sa surface extérieure exposée à l'environnement ambiant. Cette résistance est contrôlée par un thermostat qui permet de stabiliser la température et de garder un flux stationnaire tout au long de l'essai autour de la température de consigne $T = 60\text{ °C}$ et d'un $\Delta T \leq 0,5\text{ °C}$. La figure 3.7 présente l'évolution de la température en surface intérieure de l'échantillon au niveau des 17 points de contrôle, correspondant aux thermocouples (Figure 2.15) placés sur la zone de mesure. La figure 3.7a illustre l'évolution de la température après la mise en marche de la résistance où nous pouvons constater une constante évolution de la température jusqu'à stabilisation par rapport à la température imposée.

Toutefois, d'après la figure 3.7, nous constatons que la température au niveau de la zone de mesure, en contact avec la surface intérieure de l'échantillon, est inférieure à 60 °C en raison de l'inertie de la plaque chaude de 6 mm d'épaisseur. Lorsque nous observons l'évolution de la température à long terme, nous retrouvons les différents cycles de température de la résistance et observons la fluctuation de la température de la plaque chaude autour d'un certain $\Delta T (\leq 0,5\text{ °C})$ qui peut néanmoins être négligée. En effet, à l'échelle d'un cycle, en détaillant l'évolution de la température (Figure 3.7b), nous constatons que la température au niveau de chaque thermocouple de la zone de mesure est stable. Seuls les trois points de contrôle, qui s'avèrent être les points liés aux thermocouples les plus proches de la résistance (thermocouples 8, 9 et 10 sur la figure 2.15), présentent une fluctuation ($\leq 0,5\text{ °C}$) qui reste néanmoins négligeable.

Remarque : Lors de l'essai, il est nécessaire d'attendre la stabilisation du flux de chaleur au niveau de la zone de mesure pour garantir un régime permanent. Les échantillons sont ensuite placés dans le montage.

Avant de commencer les mesures de la température sur la surface extérieure de l'échantillon, il est nécessaire encore une fois d'attendre que le flux qui traverse l'échantillon soit stabilisé. En effet, nous pouvons observer qu'il s'écoule un temps de transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur de l'échantillon qui dépend de l'épaisseur de l'échantillon testé (temps de stabilisation du transfert par conduction).



(a) Evolution de la température jusqu'à stabilisation.

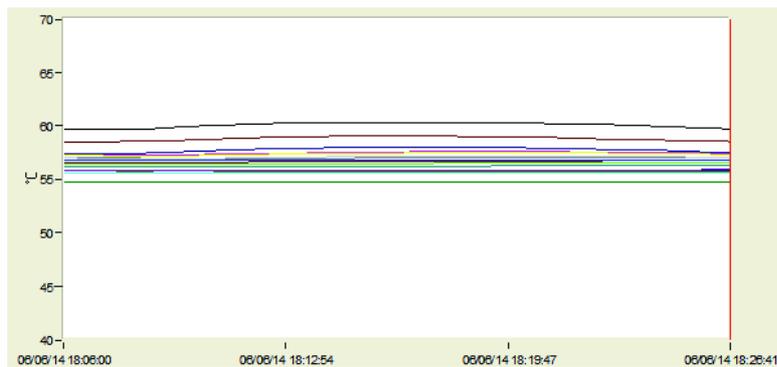
(b) T_{int} au cours d'un cycle de temps.

FIGURE 3.7: Evolution de la température intérieure au niveau des 17 thermocouples réparties sur la zone de mesure.

La figure 3.8 montre l'évolution de la température en surface extérieure de trois échantillons analysés consécutivement. En effet, grâce à la camera-IR, nous pouvons également contrôler l'évolution de la température extérieure des échantillons, au niveau des 17 points de contrôle, chaque cycle étant associé à un échantillon. Dans tous les cas, la stationnarité du flux est vérifiée car nous observons que la température se stabilise au même moment à tous les niveaux de contrôle.

Cas de la Rainure

La figure 3.9 présente les images thermiques obtenues pour les différentes tailles de rainure. Les deux premières images (Figures 3.9a et 3.9b) présentent les températures extérieures des isolants en polystyrène de 5 cm d'épaisseur, possédant des rainures de différentes largeurs. Les deux dernières images (Figures 3.9c et 3.9d) présentent les températures extérieures des isolants en polystyrène de 4 cm d'épaisseur, possédant des rainures de différentes épaisseurs. De toute évidence, nous observons plus de pertes de chaleur au niveau des rainures, car le matériau perd en épaisseur et donc en résistance.

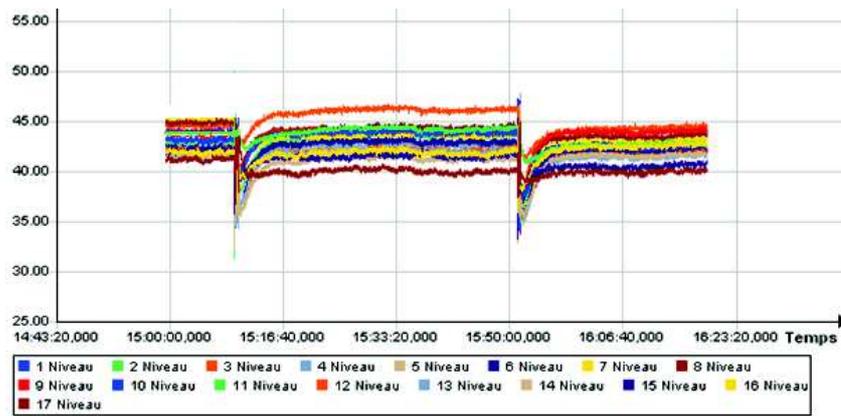


FIGURE 3.8: Evolution de la température extérieure ($T_{\text{Ext-IR}}$) après la pose de l'échantillon.

En regardant de plus près la figure 3.9, nous pouvons formuler les remarques suivantes :

- Dans le cas des faibles épaisseurs de rainure (EPS4-R1), la température de surface extérieure au niveau de la rainure (43°C) se rapproche de celle observée sur le reste de la surface du matériau (42°C). L'épaisseur de la rainure ne représente ici qu'un quart de l'épaisseur totale de l'isolant. Avec un centimètre de plus (EPS4-R2), nous constatons que l'écart de température se creuse rapidement. En effet, les échantillons d'EPS4-R2 montrent que la température au niveau de la rainure atteint 45°C , créant ainsi un écart de plus de 3°C entre la surface saine du matériau et l'emplacement du défaut.
- En faisant varier la largeur de la rainure, la diffusion de la chaleur est également affectée. Dans le cas de faibles largeurs de rainure (EPS5-R3), la perte de chaleur est plus localisée (EPS5-R3) et l'écart de température est important (37°C au niveau de la partie saine du matériau contre 39°C au niveau du défaut). D'autre part, lorsque la largeur de la rainure est plus grande, nous pouvons observer une plus grande surface de fuites mais les écarts de température sont moins importants entre la région saine du matériau (42°C) et la région de la rainure 43°C .

La figure 3.10 présente les températures extérieures tout le long des rainures de 1 cm (EPS4-R1) et 2 cm (EPS4-R2) de profondeur, respectivement. Il est intéressant de noter que la température extérieure est constante sur tout le long de l'échantillon, ce qui permet de vérifier la stationnarité du flux de chaleur qui traverse la rainure. Quelques petits pics de température sont observés sur les côtés, au niveau des zones de contact "échantillon/cadre en laine de verre" naturellement dus à l'imperfection du contact entre le polystyrène de l'échantillon analysé et la LDV du cadre isolant. Ces derniers ne sont bien évidemment pas considérés dans les calculs. Enfin, nous retrouvons logiquement que la rainure la plus profonde (2 cm - EPS4-R2) présente des températures extérieures largement supérieures à celles des échantillons EPS4-R1.

Cas de l'ouverture

Les défauts de type "Ouverture" sont en réalité un cas particulier des rainures, où la profondeur du défaut est égale à l'épaisseur du matériau (i.e. il n'y a plus aucune barrière pour retenir la chaleur).

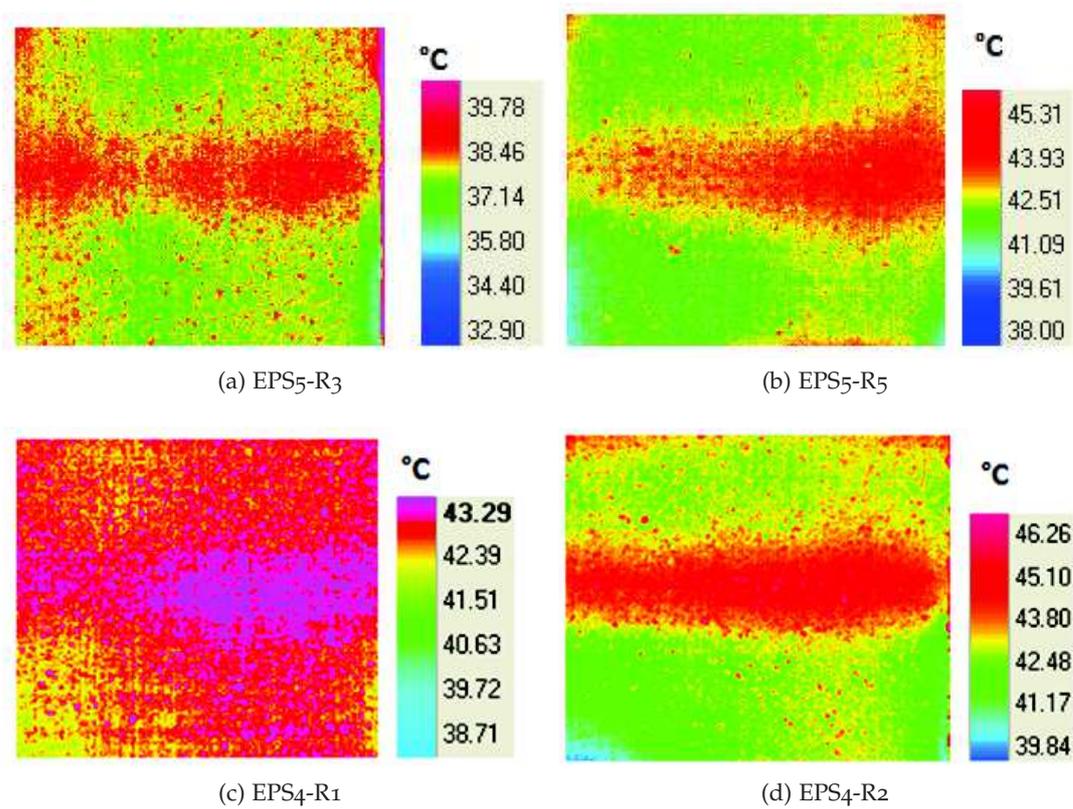


FIGURE 3.9: Images thermiques obtenues dans le cas de différentes tailles de rainures.

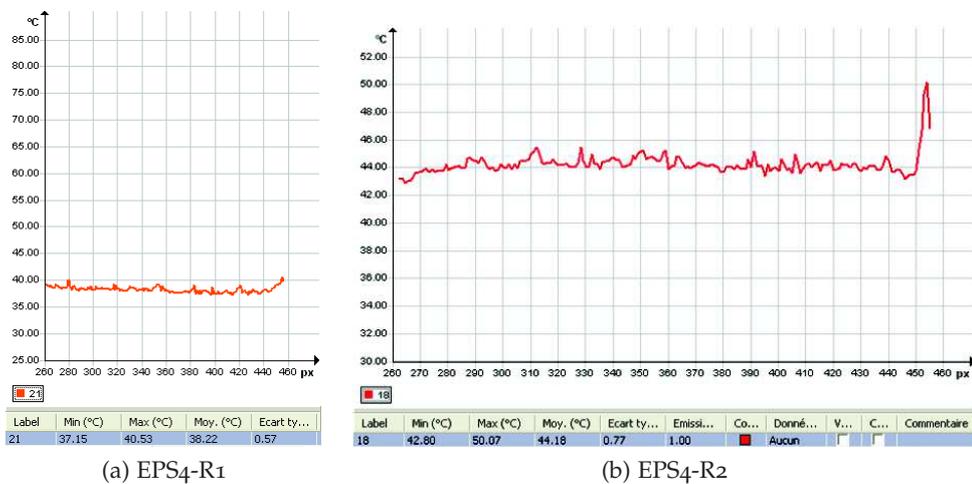


FIGURE 3.10: Températures extérieures au niveau du centre de la rainure- Variation de l'épaisseur de la rainure

L'image thermique présentée en figure 3.11 montre la différence de température que l'on pourrait observer entre deux matériaux superposés. Nous pouvons observer des fuites de chaleur entraînant des écarts de température d'environ 1°C entre les zones saines et défectueuses de l'échantillon, alors que la superposition des isolants est supposée quasi-parfaite.

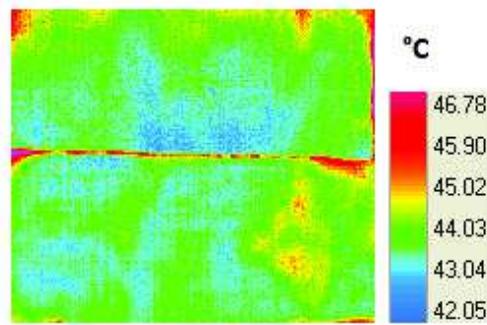


FIGURE 3.11: Images thermiques obtenues dans le cas de superposition de matériaux - Défaut de type Ouverture (LDV8-O5).

Cas de l'écrasement

Dans le cas des défauts de type écrasement, nous avons eu recours à des profilés en bois¹ sur lesquels les échantillons en laine de verre sont agrafés. Les images thermiques présentées sur la figure 3.12 présentent les différences de températures obtenues sur les échantillons écrasés.

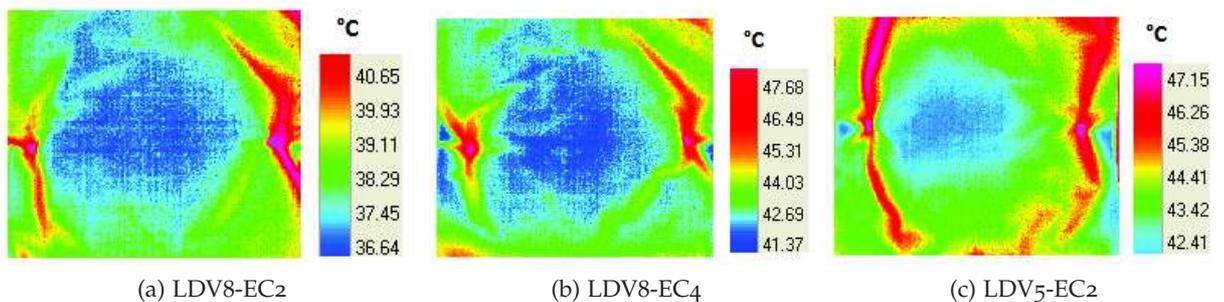


FIGURE 3.12: Images thermiques obtenues dans le cas de L'écrasement.

Pour ce type de défaut, la géométrie de tout l'échantillon se retrouve modifiée par le défaut, entraînant ainsi de nombreuses fluctuations de la température sur la surface du matériau. Sur les images de la figure 3.13, nous observons aisément les différentes isothermes.

Les deux premières images thermiques présentent les températures extérieures d'un isolant de 8 cm écrasé sur un profilé de 2 cm (LDV8-EC2) et de 4 cm (LDV8-EC4), respectivement. Nous observons que la zone affectée par les changements de température est plus importante avec le LDV8-EC4 dû à l'écrasement qui est plus important et qui entraîne des modifications géométriques globales plus importantes.

La même observation peut être constatée entre les échantillons de LDV8-EC2 et les échantillons de LDV5-EC2. Dans ce cas, les échantillons sont d'épaisseurs différentes mais ils sont écrasés sur des profilés de mêmes dimensions (2 cm). Bien évidemment, les échantillons de LDV5-EC2 sont les plus affectés géométriquement ce qui entraîne beaucoup plus de pertes de chaleur.

¹ Bois de conductivité thermique 0,18 W/mK [100]

Pour mieux comprendre le phénomène, dans le cas des échantillons de LDV5-EC2, la figure 3.13 présente les températures à la surface extérieure obtenues au niveau des zones les plus affectées géométriquement par le défaut. A travers ces courbes de températures, nous pouvons visualiser la variabilité de la résistance du matériau déformé par l'écrasement. La concavité des courbes reflète la convexité de la forme géométrique du matériau obtenue après écrasement.

Les courbes verte et orange présentées à gauche montrent les lignes de température passant par les points d'agrafe gauche et droit, respectivement. Ces courbes de température sont quasi-superposées parce que la déformation du matériau au niveau de ces courbes est identique et quasi-symétrique. Les pics de température sont associés aux points d'agrafes où l'écrasement est maximal. Toutefois, on remarque que la température maximale à droite est inférieure à celle au niveau de l'agrafe de gauche. Ceci est dû au fait qu'au niveau de l'agrafe de gauche, de petites déchirures autour de l'agrafe entraînent plus de déperditions de chaleur. La courbe en rouge à droite montre quant à elle, la ligne de température qui passe par les deux agrafes en même temps, où nous retrouvons les deux pics de température qui représentent les points d'agrafe à gauche et à droite.

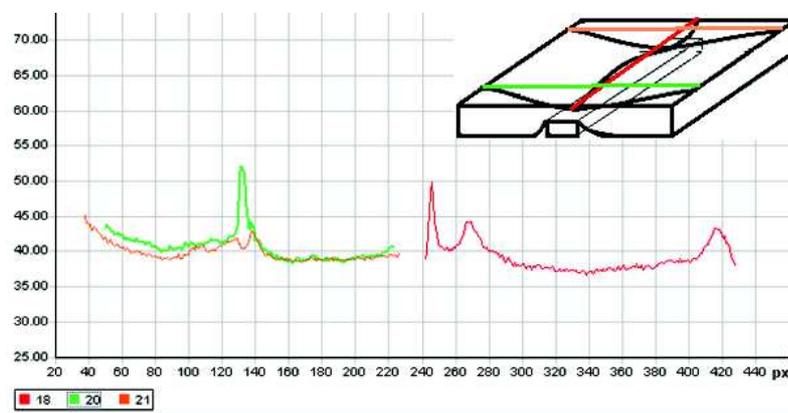


FIGURE 3.13: Température extérieure au niveau des points d'écrasement.

Cas du passage de fils

Dans le cas des matériaux traversés par des fils, les deux images thermiques présentées sur la figure 3.14 représentent les distributions des températures dans le cas du passage d'une gaine de 2 cm de diamètre, dans un matériau fibreux compressible. Le passage de cette gaine entraîne l'écrasement partiel de l'échantillon et l'apparition d'un trou pour pouvoir passer la gaine. La première image (Figure 3.14a) est observée dans le cas où le trou permettant le passage de la gaine ou du fil est recouvert d'une bande adhésive, tandis que l'échantillon observé sur la deuxième image ne contient pas d'adhésif (Figure 3.14b).

Dans ces deux cas, nous observons en toute logique, que les pertes au niveau de l'écrasement partiel de l'échantillon s'accroissent au niveau du trou de passage de la gaine, et bien que l'on pourrait douter de l'efficacité d'une bande adhésive pour réduire les pertes, l'analyse thermographique a mis en évidence le fait que l'utilisation de l'adhésif permettait de conserver beaucoup plus la performance du matériau et de

localiser les pertes. En effet, l'utilisation de l'adhésif permet de réduire la diffusion thermique surfacique et le flux sortant au niveau de l'écrasement.

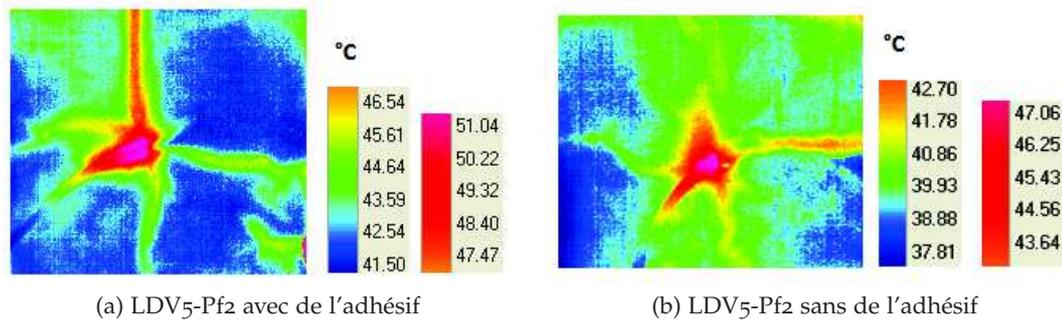


FIGURE 3.14: Images thermiques obtenues dans le cas des passages de fils.

3.3.4 Etude numérique

Le modèle éléments finis est mis en œuvre pour simuler le comportement thermique des échantillons avec défauts. Les échantillons et les défauts associés sont dans un premier temps modélisés grâce au logiciel éléments finis ANSYS [101]. La géométrie des échantillons est modélisée en 3D. Les éléments volumiques à n noeuds ont été utilisés pour le maillage. Néanmoins, ANSYS choisit, en maillage libre, le nombre et la taille des éléments à utiliser en fonction de la complexité géométrique à traiter, seul le degré de finesse du maillage est imposé (4 sur une échelle de 1 (grossier) à 6 (très fin)). Pour les défauts réguliers tels que la rainure et l'ouverture, un maillage régulier peut être adopté.

Dans le cas des rainures, il est possible d'adopter un maillage régulier car ce type de défaut n'altère pas la géométrie du reste de l'échantillon. Cependant, nous optons pour un maillage libre (Figure 3.15a) tétraédrique qui permet une décomposition géométrique plus fine au niveau des arrêtes de la rainure pour une meilleure modélisation du flux thermique à ce niveau. Dans le cas des ouvertures, nous gardons le maillage régulier car il n'y a pas de continuité du matériau au niveau des bords de l'ouverture (Figure 3.15b).

Dans le cas des défauts plus complexes, un maillage tétraédrique est préféré pour une meilleure représentation de la géométrie du défaut et de l'échantillon déformé. La figure 3.15c présente le maillage dans le cas des échantillons écrasés alors que la figure 3.15d présente le maillage dans le cas des échantillons avec passage de fils.

L'analyse numérique consiste à appliquer le flux de chaleur sur l'échantillon avec défauts préalablement modélisés. Chaque modèle est soumis aux conditions aux limites expérimentales imposées en laboratoire :

- type de régime : permanent ;
- flux thermique nul sur les bords latéraux des échantillons ;
- convection appliquée à la surface extérieure de l'échantillon à partir des mesures hygrothermiques ;

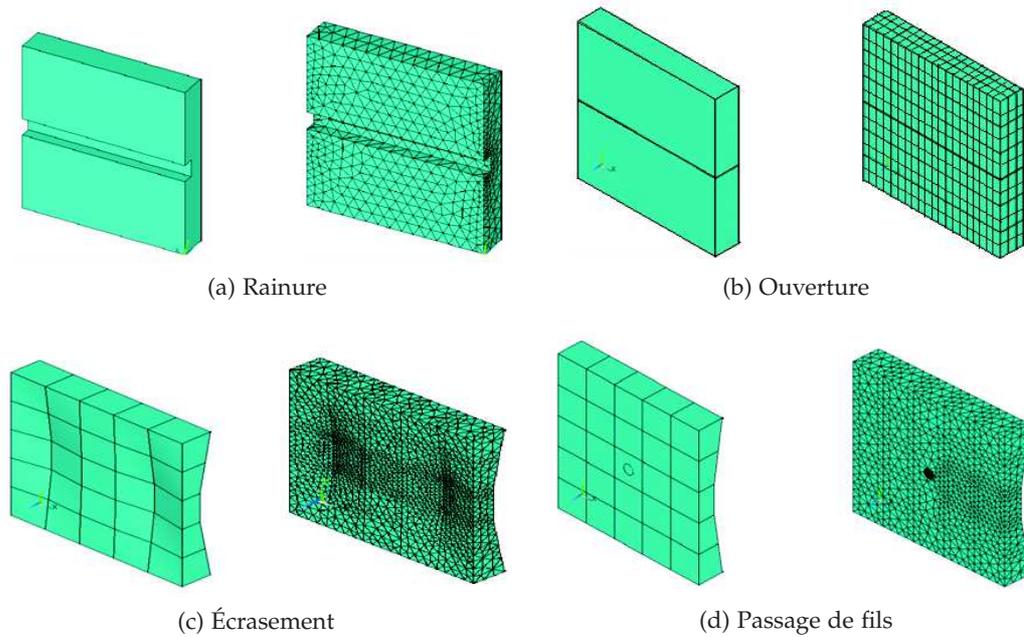


FIGURE 3.15: Modélisation des défauts sur ANSYS.

- champ de température intérieure (T_{Int}) mesuré lors de l'essai, appliqué sur la surface interne du modèle éléments finis (i.e. la surface intérieure du matériau est décomposée en 25 surfaces. La température obtenue par chaque thermocouple est imposée à la surface associée à la position du thermocouple. La température définie sur les autres surfaces non mesurées s'obtient par interpolation linéaire).

L'analyse thermique sous ANSYS permet d'obtenir différentes informations liées au flux de chaleur traversant le matériau et aux températures à la surface. La figure 3.16 présente le flux de chaleur traversant des échantillons modélisés avec les défauts étudiés.

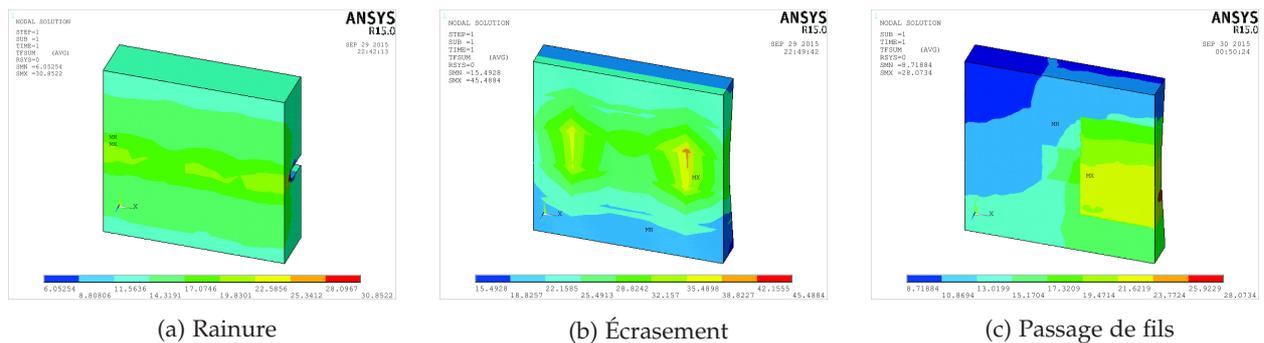


FIGURE 3.16: Flux de chaleur (W) à travers différents isolants avec défauts.

Dans un cas général, nous pouvons constater en toute logique que les pertes de chaleur au niveau des différentes singularités sont plus importantes. Dans le cas d'un défaut régulier tel que la rainure (Figure 3.16a), nous constatons que les pertes de chaleur s'effectuent tout le long de la rainure mais que plus on s'éloigne du défaut, plus on retrouve le flux homogène propre à l'isolant sain. Par ailleurs, les effets de bord

Défaut	Rainure				Ouverture
Code	EPS-R				LDV-O
Épaisseurs	50 mm		40 mm		50 mm
Échantillons	$t_d = 20\text{mm}$		$w_d = 30\text{mm}$		
	$w_d = 30$ [mm]	$w_d = 50$ [mm]	$t_d = 10$ [mm]	$t_d = 20$ [mm]	$w_d = 5$ [mm]
1	0,056	0,048	0,054	0,058	0,039
2	0,056	0,05	0,054	0,052	0,039
3	0,054	0,048	0,054	0,052	0,039
4	0,044	0,048	0,056	0,056	0,039
5	0,044	0,048	0,058	0,054	0,040
6	0,046	0,046	0,058	0,056	
μ_{λ^*} [W/mK]	0,050	0,048	0,0557	0,055	0,039
C.V. (%)	12	2,6	3,5	4,4	1,89

Tableau 3.2: Conductivités effectives obtenues pour le cas des défauts réguliers étudiés.

autour des défauts dépendent de la taille de ce dernier. Dans le cas des défauts sur matériaux souples, nous observons de complexes flux de chaleur autour des singularités. Dans le cas de l'écrasement par exemple, nous étudions le flux de chaleur traversant le matériau déformé seul (sans considérer la résistance des profilés en bois) où nous pouvons constater que les pertes de chaleur les plus importantes se trouvent au niveau des agrafes, où l'écrasement est maximal et dont l'agrafe en métal est conductrice. Le reste du matériau autour de l'agrafe se retrouve également déformé géométriquement par la pose de l'agrafe ce qui provoque des variations de flux sur toute la surface du matériau. Le flux homogène du matériau est retrouvé lorsque l'épaisseur initiale du matériau est récupérée. Ce constat est également valable dans le cas de l'écrasement partiel des échantillons traversés par des fils où des gaines (Figure 3.16b).

3.3.5 Evaluation de la conductivité effective

Grâce aux températures extérieures obtenues expérimentalement et numériquement et la procédure inverse présentée en sous-section 3.3.1, la conductivité effective de l'isolation à utiliser en simulation peut être déterminée.

Les tableaux 3.2 et 3.3 présentent les conductivités thermiques effectives obtenues dans le cas des défauts réguliers et irréguliers, respectivement. Dans le cas des échantillons écrasés et traversés par des gaines, la conductivité thermique effective représente uniquement la conductivité de l'isolant (i.e. la résistance thermique du profilé en bois et de la gaine est soustraite à chaque fois).

Dans tous les cas, le volume du défaut par rapport au volume total étudié a une influence majeure. Dans le cas des rainures, les conductivités effectives obtenues montrent clairement l'impact des différentes tailles de rainure sur la conductivité effective à adopter. Plus précisément, nous observons que :

Défaut	Écrasement		Passage de fils
Code	LDV-EC		LDV-Pf
Épaisseurs	50 mm	80 mm	50 mm
Échantillons	Écrasement sur 20 mm	Écrasement sur 40 mm	ϕ 20 mm
1	0,038	0,036	0,042
2	0,044	0,044	0,044
3	0,044	0,054	0,058
4	0,048	0,054	0,058
5			0,050
μ_{λ^*} [W/mK]	0,0435	0,047	0,0505
Coefficients de variation (%)	9,47	18,50	17,20

Tableau 3.3: Conductivités effectives obtenues pour le cas des défauts irréguliers étudiés.

- plus la taille de la rainure est importante plus les pertes en conductivité thermique sont importantes ;
- le sens du défaut a une influence majeure ; la valeur moyenne de la conductivité effective est plus sensible aux rainures profondes qu'aux rainures larges ;
- en termes de variabilité, nous observons que la variabilité des conductivités obtenues est plus importante avec les rainures profondes qu'avec les rainures larges. En fait, la zone affectée du matériau est plus grande avec des larges rainures mais les écarts restent peu significatifs car le matériau n'a pas vraiment perdu en épaisseur et les pertes au niveau de la rainure restent quasi-homogènes. A l'opposé, les rainures profondes engendrent une zone de défaut plus petite. Cependant, la perte en épaisseur d'isolant entraîne une forte baisse de la résistance thermique. De par le fait que les bords de la rainure sont importants, de larges fluctuations de la température sont observées sur la surface du matériau.

Dans le cas des ouvertures, les résultats obtenus indiquent que la conductivité moyenne des échantillons augmente de 11% par rapport à la conductivité thermique escomptée. La variabilité des mesures dans ce cas ne dépasse néanmoins pas les 2% en raison des faibles ouvertures considérées.

Dans le cas de l'écrasement, nous constatons que plus le matériau est écrasé, plus la perte en conductivité thermique effective se ressent. A titre d'exemple, les échantillons (LDV8-EC4), de laine de verre à 8 cm avec 4 cm d'écrasement (échantillons écrasés sur des profilés de 4 cm d'épaisseur), perdent environ 40% de leur performance contre 30% pour un écrasement à 2 cm (LDV8EC2). Par ailleurs, nous observons que la variabilité des résultats est plus grande lorsque le degré d'écrasement est important parce que de toute évidence il est beaucoup plus difficile de maîtriser les déformations importantes imposées aux échantillons. En pratique nous avons constaté que lorsque les matériaux étaient très déformés, de nombreuses singularités pouvaient apparaître, no-

tamment des petites déchirures au niveau des points d'écrasement entraînant beaucoup plus de fuites.

En ce qui concerne les matériaux traversés par des gaines, la conductivité thermique effective est sensiblement touchée. Ce type de défaut, qui peut être considéré comme un cas particulier de l'écrasement, entraîne néanmoins plus de pertes de chaleur en raison de la présence du trou permettant le passage de la gaine. A titre d'exemple, la conductivité thermique effective obtenue pour les matériaux écrasés à 2 cm (LDV5-EC2) sur des profilés en bois est de 0,0435W/mK, soit environ 20% de plus que la conductivité fournie par le producteur. Tandis que, la présence d'une gaine de 2 cm (LDV5 – Pf2) entraîne une perte de plus de 27% de la conductivité thermique initiale. Cependant, en terme de variabilité, il est à noter que la variabilité des résultats est beaucoup plus importante dans le cas de l'écrasement, car le matériau est beaucoup plus déformé. Cette déformation ne peut être maîtrisée avec exactitude en raison de la souplesse de la LDV.

3.3.6 Modèles d'évaluation de la conductivité effective en présence de défauts

Dans le but de considérer l'impact des défauts en phase de simulation, nous proposons dans cette section des modèles analytiques permettant d'estimer la conductivité effective à utiliser lors des calculs, en fonction du type de défaut.

Quel que soit le type de défaut, les résultats de conductivité présentés précédemment indiquent qu'une régression linéaire ne permet pas de décrire le comportement de la conductivité effective du matériau. En effet, même si le flux imposé au matériau est unidirectionnel, les défauts entraînent des effets non linéaires qui provoquent une dispersion de flux en 3D.

Pour pouvoir considérer ces effets non linéaires tout en les intégrant dans les modèles de flux à une dimension, nous proposons d'utiliser des modèles de regression non linéaire calibrés sur la base des résultats obtenus précédemment.

Dans le cas des défauts réguliers et localisés, tels que les rainures et les ouvertures, le modèle proposé est de la forme :

$$\lambda^* = \lambda_0 \exp[f(t_d, w_d)] \quad (3.1)$$

où λ^* est la conductivité thermique effective du matériau avec défaut, λ_0 est la conductivité thermique du matériau sain, $f(t_d, w_d)$ est l'exposant de l'exponentiel qui est une fonction des dimensions géométriques du défaut. En effet, nous avons observé que la conductivité effective du matériau dépendait non seulement de la taille du défaut par rapport à la dimension de l'échantillon, mais également de l'aspect du défaut (en longueur ou en largeur).

Dans le cas des rainures, cette fonction s'écrit [102] :

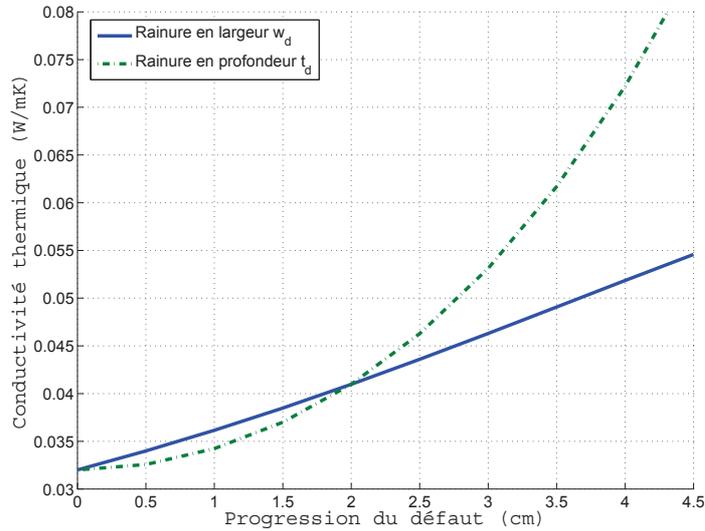
$$f_R(t_d, w_d) = [\alpha_1 (\frac{t_d}{ep})^3 (\frac{w_d}{w}) + \beta_1 (\frac{t_d}{ep})^2 (\frac{w_d}{w})] \times (\alpha_2 \frac{w_d}{w} + \beta_2) \quad (3.2)$$

tandis que dans le cas des ouvertures, elle prend la forme :

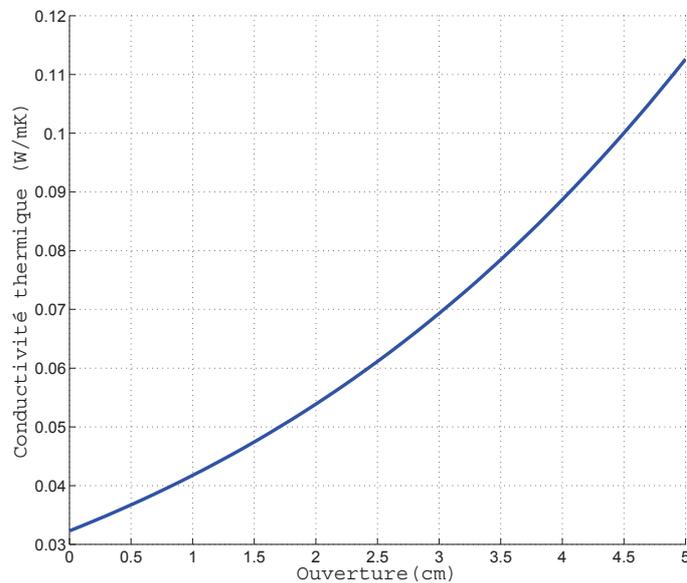
$$f_O(t_d, w_d) = \alpha \frac{w_d}{t_d} \quad t_d = ep \quad (3.3)$$

où f_R et f_O sont les exposants à utiliser dans le cas des rainures et des ouvertures, respectivement, t_d est la profondeur du défaut, w_d représente la largeur du défaut, ep l'épaisseur de l'isolant et enfin w la largeur de l'isolant.

Les coefficients utilisés dans les équations (3.2) et (3.3) sont déterminés grâce aux résultats expérimentaux et numériques présentés dans le tableau 3.2. Les coefficients obtenus pour la fonction f_R sont $\alpha_1 = -19,40$, $\beta_1 = 3,44$, $\alpha_2 = 73,88$, $\beta_2 = 6,45$ et le coefficient de la fonction f_O est $\alpha = 2$.



(a) Défaut - Rainures



(b) Défaut - Ouvertures

FIGURE 3.17: Conductivité effective en fonction de la nature de la rainure et de la taille d'ouverture.

La figure 3.17 montre l'évolution de la conductivité effective dans le cas d'un isolant de 50 mm en fonction de la taille du défaut. La figure 3.17a présente l'évolution de λ^* en fonction du type de rainure considéré : en profondeur (pointillés : largeur fixe (40 mm) et différents t_d) ou en largeur (ligne continue : épaisseur fixe (40 mm) et différents w_d). La principale observation concerne l'aspect géométrique du défaut : pour un même volume de rainure (40mm \times 25mm qui représente 6,66% du volume de l'échantillon), lorsque la profondeur est égale à $t_d = 40$ mm, les pertes en conductivité thermique sont supérieures à 43,7%, alors que lorsque c'est la largeur de la rainure qui est de $w_d = 40$ mm, nous observons des pertes d'environ 31,2%. En réalité, contrairement aux rainures larges, les rainures profondes affectent significativement la résistance thermique en raison de la perte d'épaisseur imposée au matériau. De plus, la perte en épaisseur entraîne des effets de bord plus importants et donc plus de pertes de chaleur qui interviennent à travers les bords de la rainure.

En ce qui concerne les ouvertures, les résultats sont beaucoup plus inquiétants car ce type de défaut peut être assimilé à une rainure sur toute la profondeur. Les résultats de la figure 3.17b présentent l'évolution de la conductivité effective du matériau en fonction du degré d'ouverture entre les panneaux d'isolation où nous pouvons remarquer, qu'à seulement 1 cm d'ouverture, l'isolant perd plus de 25% de sa performance thermique.

Enfin, dans le cas des défauts irréguliers, nous proposons un autre modèle de regression non linéaire. Ce modèle est différent de (3.1) parce qu'il doit être valable dans le cas où la géométrie de tout le matériau se retrouve modifiée au delà de la zone d'application du défaut. Si l'écrasement du matériau est faible, la géométrie de l'isolant n'est pas vraiment déformée et le matériau ne perd pas beaucoup de sa résistance. Dans ce cas, la conductivité effective de l'isolant se rapproche de sa conductivité initiale λ_0 . A l'opposé, plus le matériau est écrasé, plus il perd en résistance thermique. La plus faible résistance thermique pouvant être obtenue par l'isolant est alors atteinte lorsque le matériau est complètement écrasé, la conductivité effective associée dans ce cas, est notée λ_1 .

La conductivité thermique effective du matériau avec défaut λ^* est déterminée en utilisant le modèle de la forme suivante :

$$\lambda^* = \lambda_1(ep, t_w) + (\lambda_0 - \lambda_1(ep, t_w)) \exp[f(ep, t_d)] \quad (3.4)$$

où $f(ep, t_d)$ représente l'exposant dans l'équation (3.1) et dépend des propriétés géométriques de l'échantillon déformé.

$$f(ep, t_d) = \kappa(\alpha_1 ep - \beta_1) \frac{t_d}{ep} \quad (3.5)$$

où ep est l'épaisseur de l'isolant, $t_d = ep - t_w$ est l'épaisseur du matériau moins l'épaisseur t_w qui est l'épaisseur du profilé en bois (t_{bois}) dans le cas de l'écrasement ou le diamètre de la gaine (Φ) dans le cas des défauts de type passage de fils.

La conductivité thermique effective λ_1 dépend quant à elle de l'épaisseur du matériau ep et de la taille du défaut imposée par l'épaisseur t_w .

$$\lambda_1(ep, t_w) = [\alpha_2 ep + \beta_2 \left(\frac{t_w}{ep}\right)^2 - \gamma_2 \left(\frac{t_w}{ep}\right) + \delta_2] \quad (3.6)$$

Les coefficients de ces deux dernières expressions sont présentés dans le tableau 3.4 et sont calibrés grâce aux résultats expérimentaux présentés dans le tableau 3.3.

Type de défaut	$f(\epsilon_p, t_d)$			$\lambda_1(\epsilon_p, t_w)$			
	κ	α_1	β_1	α_2	β_2	γ_2	δ_2
LDV-EC	1	56,7	69	0,316	0,0065	0,0285	0,03
LDV-Pf	0,1	0	81	0	0	0	0,06

Tableau 3.4: Coefficients du modèle d'évaluation de λ^* en présence de défauts irréguliers.

La figure 3.18 montre l'évolution de la conductivité effective d'un isolant de 10 cm écrasé soit sur un profilé en bois (Figure 3.18a), soit traversé par une gaine (Figure 3.18b). De manière générale, nous pouvons remarquer que la conductivité thermique est plus affectée par le passage des gaines que par l'écrasement, en raison des pertes de chaleur supplémentaires qui passent à travers les trous et qui augmentent à force que le diamètre de la gaine augmente.

Si nous prenons le cas d'une gaine de diamètre $t_w = \Phi = 2$ cm, la perte de performance dépasse 56% tandis que l'écrasement de la LDV sur un profilé en bois d'épaisseur $t_w = t_{\text{bois}} = 2$ cm entraîne environ 52% de pertes. Dans tous les cas, les pertes de performance restent très significatives.

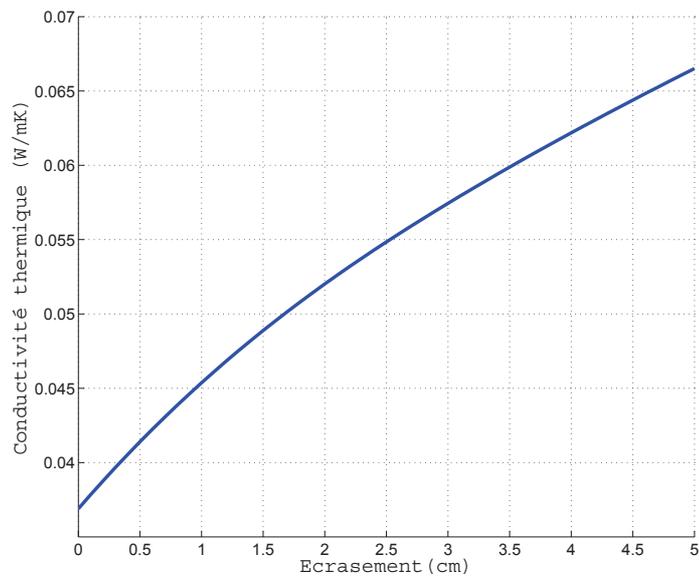
Les modèles que nous proposons permettent d'évaluer la conductivité à adopter lors des simulations énergétiques en fonction du type de défaut et de sa taille. Toutefois, ces modèles ont été calibrés sur la base des conductivités moyennes obtenues expérimentalement. Une incertitude est alors attendue sur le calcul de λ^* . Cette incertitude dépend de la dispersion des conductivités effectives obtenues expérimentalement et peut être décrite en utilisant des lois de probabilité.

3.3.7 Quantification de l'incertitude sur la conductivité effective

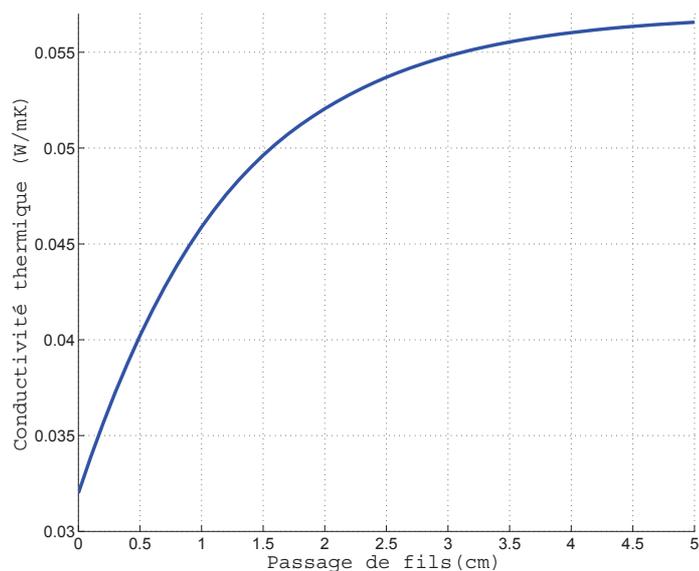
En fonction de chaque type de défaut, l'incertitude sur la conductivité effective du matériau doit être quantifiée. Dans cette section, nous utilisons la méthode des rangs médians pour déterminer la fonction de répartition de la conductivité effective associée à chaque défaut étudié. Cette fonction de répartition est ensuite comparée aux fonctions de répartition des lois normale et log-normale (Figure 3.18) en utilisant le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov. Le tableau 3.5 détaille les distributions de probabilité et les paramètres statistiques associés en fonction du type de défaut.

L'incertitude portée est associée aux diverses erreurs de mesure (aléatoires et épistémiques) mais également à la nature du matériau utilisé. A l'instar des variabilités obtenues dans le cas des matériaux sains, l'incertitude obtenue sur les matériaux fibreux avec défauts est toujours plus importante. Les valeurs présentées dans le tableau 3.5 donnent une idée sur la dispersion de la conductivité effective des matériaux avec défaut. Par ailleurs, nous remarquons qu'en fonction du type de défaut considéré, l'incertitude sur la conductivité effective n'est pas très importante au regard des faibles coefficients de variation.

Dans tous les cas, l'hypothèse selon laquelle les échantillons suivent des distributions normale ou log-normale n'est pas rejetée. Cependant, nous proposons d'adopter la



(a) Défaut - Ecrasement



(b) Défaut - Passage de fils

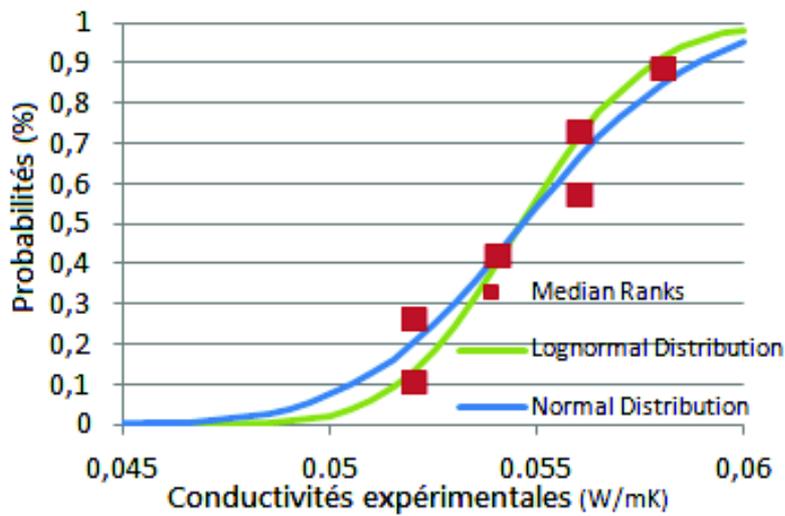
FIGURE 3.18: Conductivité effective en fonction de l'écrasement et du passage de fils.

loi log-normale, car elle semble mieux convenir en raison des valeurs toujours positives de la conductivité effective.

La quantification de l'incertitude sur la conductivité effective est essentielle et va permettre de fortifier le processus d'aide à la décision lors de la simulation de la demande énergétique en phase de conception.

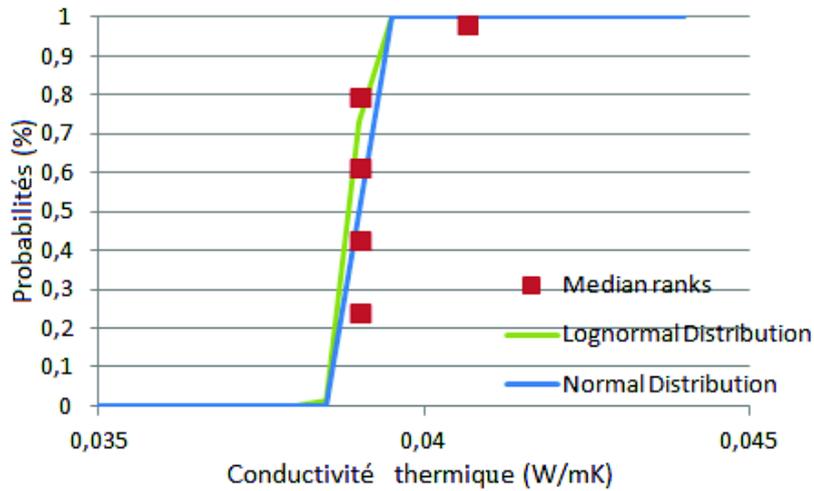
Défaut	Échantillon		Loi de distribution	μ_{λ^*} [W/mK]	C.V (%)
EPS4-R	$w_d = 30\text{mm}$	$t_d = 10\text{mm}$	LN	0,0557	0,007
	$w_d = 30\text{mm}$	$t_d = 20\text{mm}$	LN	0,0547	0,110
EPS5-R	$w_d = 30\text{mm}$	$t_d = 20\text{mm}$	LN	0,0500	0,071
	$w_d = 50\text{mm}$	$t_d = 20\text{mm}$	LN	0,0480	0,003
LDV8-O	$w_d = 5\text{mm}$		LN	0,0393	0,0014
LDV5-Ec	$t_{\text{bois}} = 20\text{mm}$		LN	0,0445	0,091
LDV8-Ec	$t_{\text{bois}} = 20\text{mm}$		LN	0,0447	0,172
	$t_{\text{bois}} = 40\text{mm}$		LN	0,0469	0,144
LDV5-Pf	$t_{\phi} = 20\text{mm}$		LN	0,0445	0,067

Tableau 3.5: Exemples de lois de distribution de la conductivité effective.

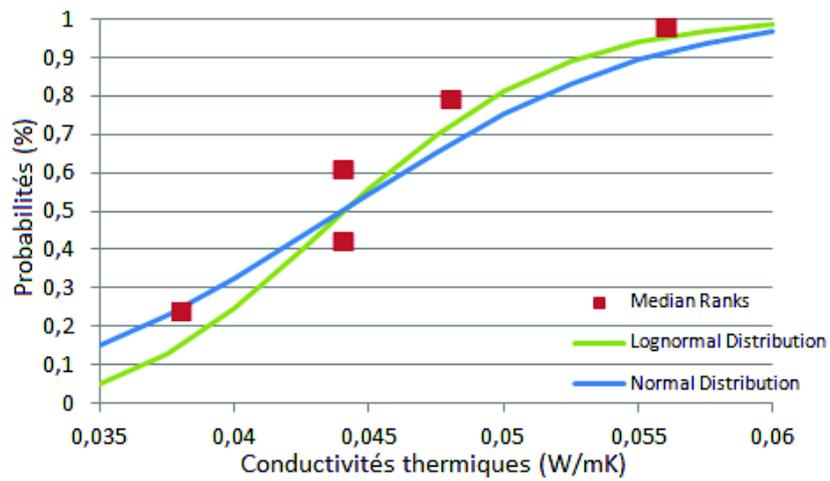


(a) Rainure- EPS4-R2

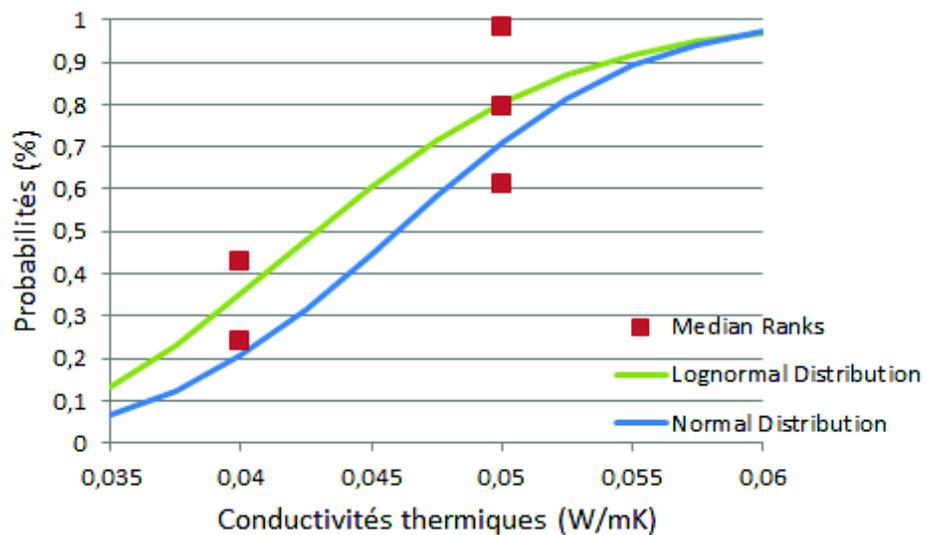
FIGURE 3.19: Identification des lois de distribution des conductivités effectives pour quelques défauts.



(b) Ouverture- LDV8-O5



(c) Écrasement - LDV5-EC2



(d) Passage de fils- LDV5-Pf2

FIGURE 3.18: Identification des lois de distribution des conductivités effectives pour quelques défauts.

3.4 APPLICATION : FIABILITÉ DE L'ISOLATION EN PRÉSENCE DE DÉFAUTS DE MISE EN ŒUVRE

Nous proposons de reprendre l'application présentée dans le chapitre 2 et d'étudier les écarts de consommation énergétique obtenus en considérant l'isolation altérée par les défauts de mise en œuvre, et la dégradation des propriétés isolantes due au vieillissement (Figure 2.22a).

Pour chaque type de défaut, la conductivité effective est calculée grâce aux modèles proposés en (3.1) et (3.4). La conductivité initiale du matériau sain λ_0 est celle fournie par le fabricant. Pour pouvoir comparer l'impact des défauts sur la consommation énergétique, nous admettons que quel que soit l'isolant utilisé, fibreux ou synthétique, $\lambda_0 = 0,032 \text{ W/m.K}$.

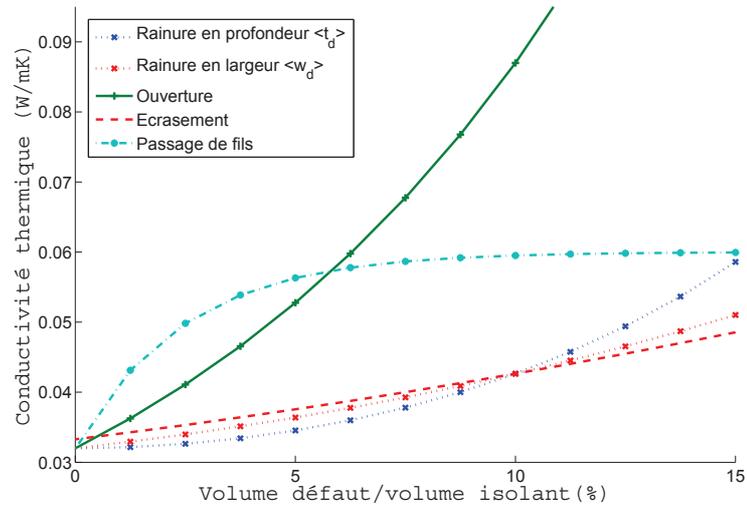
En fonction du type et de la taille du défaut, la figure 3.19 présente l'évolution de la conductivité thermique d'un isolant de 10 cm et sa résistance thermique. Dans tous les cas, nous remarquons une nette baisse de la résistance thermique quel que soit le défaut. A titre d'exemple, pour un défaut représentant 5% du volume totale de l'isolant, nous constatons que la performance thermique baisse de 36% lorsqu'il s'agit d'une ouverture, contre 28% pour une rainure profonde et 12% pour un écrasement. Les défauts tels que le passage de fils (LDV-Pf) et les ouvertures (LDV-O) semblent affecter plus significativement les performances, en raison des vides créés par le défaut.

Pour comparer l'impact du type de défaut sur la consommation énergétique, nous évaluons la consommation en considérant le mur isolé par un matériau contenant un défaut de type différent mais de même taille (volume). La figure 3.20 présente l'évolution de la consommation énergétique sur 15 ans pour les différents types de défauts étudiés où nous pouvons observer qu'en fonction du type de défaut dans le mur, les sur-coûts énergétiques peuvent atteindre 19% dans le cas de rainures profondes contre 23% dans le cas d'un matériau écrasé, tandis que la présence de gaines et de trous, laissant passer la chaleur, peut conduire à 47% d'énergie consommée en plus. Le changement de pente survenu en 2020 correspond au fait que la consommation énergétique est moins importante avec les années due au changement climatique.

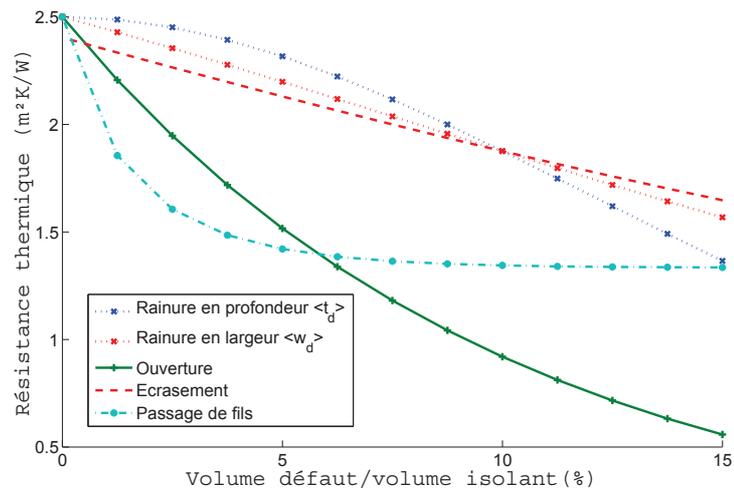
Ces résultats de consommation soulèvent des interrogations quand à la fiabilité de l'isolation, car comme nous avons pu le constater, les écarts de consommation peuvent atteindre des proportions assez importantes. La figure 3.21 présente l'évolution de la probabilité de défaillance de l'isolation en fonction du type de défaut.

Pour le calcul de la probabilité de défaillance, nous vérifions que les consommations annuelles soient en dessous de C_{epmax} . Le calcul des consommations considère la conductivité effective estimée en utilisant les modèles (3.1) et (3.4). Les conductivités effectives obtenues sont ensuite considérées comme des variables aléatoires où l'incertitude est définie grâce aux lois de probabilité identifiées dans le tableau 3.5. La méthode FORM permet de calculer la probabilité de défaillance de l'isolation vis-à-vis des exigences réglementaires.

Cette analyse de fiabilité permet de donner des informations objectives sur l'impact des incertitudes liées à la conductivité effective du matériau avec défaut. Les probabilités de défaillance montrent que l'isolation perd en fiabilité après environ 5 ans d'exploitation. Les probabilités de défaillance annuelles des murs en présence de défauts



(a) Conductivité thermique



(b) Résistance thermique

FIGURE 3.19: Evolution de λ^* en fonction du type et de la taille du défaut considéré.

irréguliers dans les isolants, type écrasement (LDV-EC) et passage de fils (LDV-Pf), sont nettement plus importantes qu'avec des défauts plus réguliers.

La figure 3.22 présente l'évolution des probabilités de défaillance en 15 ans dans le cas de murs, en considérant des isolants avec défauts. Dans le cas des rainures (Figure 3.22a), l'analyse de fiabilité montre que ce sont les rainures profondes, notamment les EPS4-R2, qui sont le plus susceptibles d'affecter la fiabilité de l'isolation sur le long

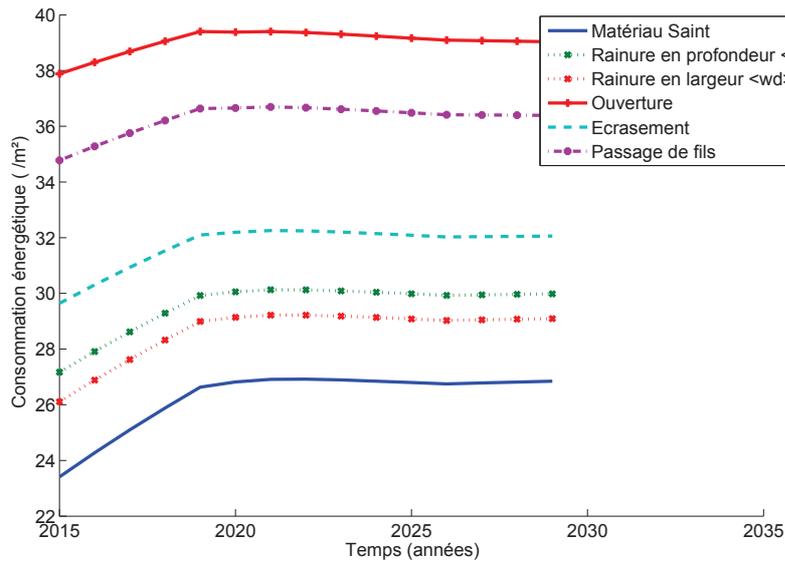


FIGURE 3.20: Evolution des besoins en consommation énergétique en fonction du défaut présent dans l'isolation.

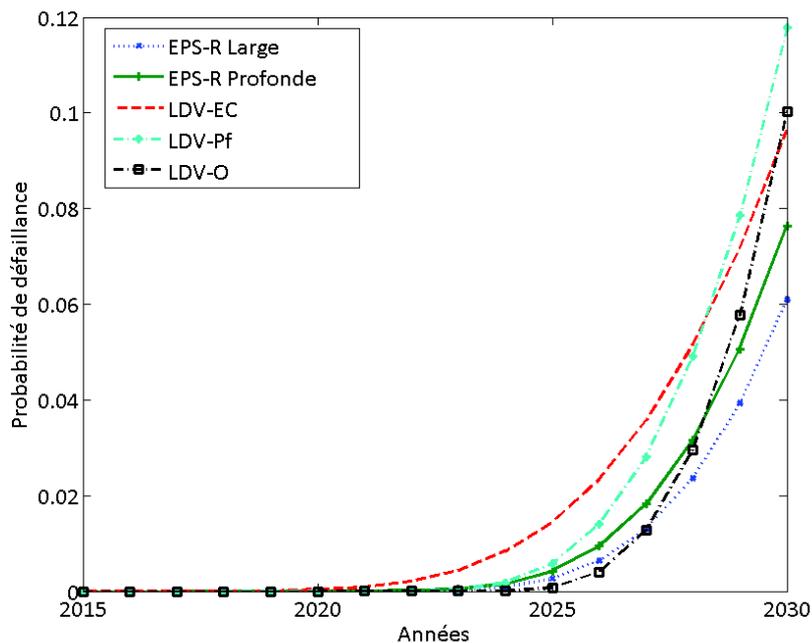
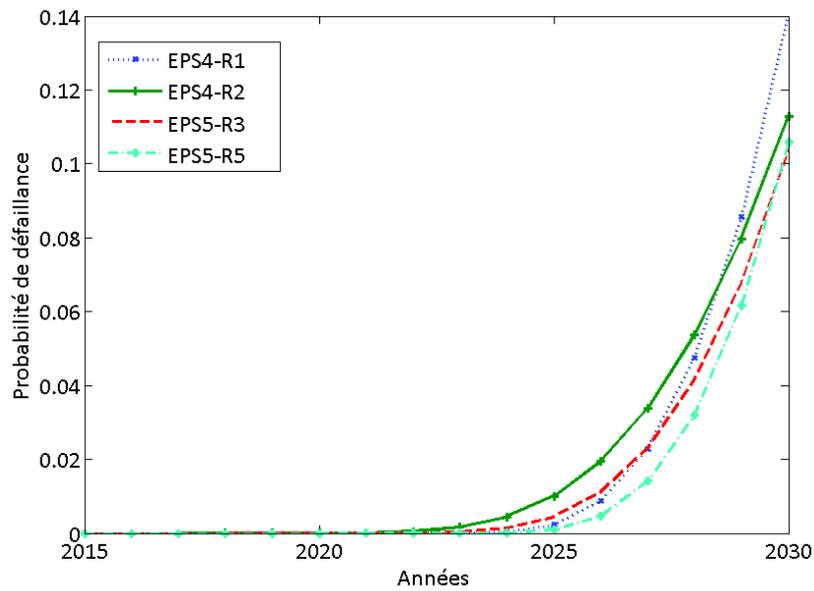
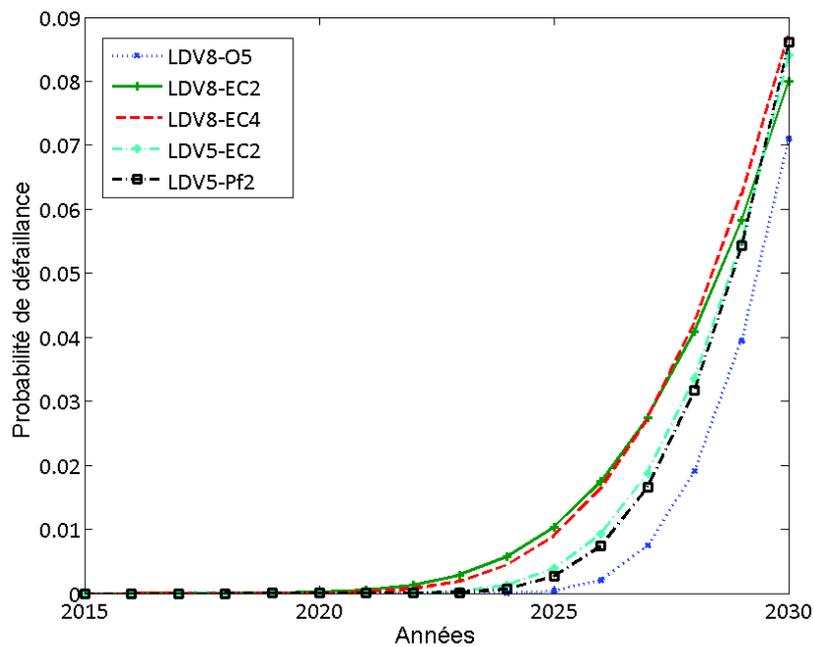


FIGURE 3.21: Evolution de la probabilité de défaillance de l'isolation en fonction du type de défaut.

terme, suivies de près par les rainures de faibles largeurs. Dans le cas des défauts dans les matériaux fibreux, la figure 3.22b présente l'évolution de la probabilité de défaillance annuelle. L'analyse de fiabilité montre que l'évolution des probabilités de défaillance des isolants écrasés est la plus importante, en raison des larges variations géométriques observées suivie de près par les défauts de LDV-Pf troués et partiellement écrasés.



(a) Rainures- EPS



(b) Ecrasement/Ouverture/Passage de fils - LDV

FIGURE 3.22: Evolution de la probabilité de défaillance de l'isolation dans le cas des défauts étudiés expérimentalement.

L'analyse de fiabilité proposée dans cette section a permis de mettre en évidence l'impact des différentes incertitudes liées à la conductivité effective des matériaux avec défauts. La plupart des défauts étudiés ont donné des valeurs largement inférieures

aux performances attendues dans le cas du matériau sain. Néanmoins, certains types de défaut semblent plus nuisibles que d'autres, notamment l'écrasement, le passage de fils/gaines ainsi que la présence d'ouvertures importantes entre les panneaux d'isolation.

3.5 CONCLUSION

Lorsqu'une enveloppe est bien isolée, les seuls points de passage de la chaleur sont alors les ponts thermiques et les défauts de mise en œuvre. Pour une évaluation réaliste de la consommation énergétique, il devient nécessaire d'intégrer ces fuites aux modèles de simulation.

Le présent chapitre a permis d'examiner l'impact des défauts de mise en œuvre sur la performance thermique des isolants. En règle générale, la présence d'un défaut fait apparaître des écarts de performance au sein d'un même matériau. Le concept d'isolation équivalente est alors adoptée, où une isolation affectée par un défaut est remplacée par une isolation sans défaut mais possédant la même résistance globale que l'isolant défectueux. Ce concept permet ainsi de déterminer la valeur de la conductivité effective à utiliser lors des calculs en phase de simulation.

Deux modèles analytiques sont proposés pour l'évaluation de la conductivité thermique effective à adopter lors de la simulation. Le premier modèle traite les défauts réguliers tels que les rainures et les ouvertures. Des défauts localisés qui n'altèrent pas la géométrie du matériau autour. Tandis que le deuxième modèle est à utiliser dans le cas des défauts irréguliers qui affectent la géométrie du matériau autour de la singularité.

Une étude expérimentale a montré que la conductivité effective de l'isolant est beaucoup plus variable avec les matériaux fibreux facilement altérables par des défauts irréguliers, de type écrasement et passage de fils. Ces défauts font varier la géométrie et l'épaisseur de l'isolant et les rendent difficilement contrôlable.

Dans le cas des matériaux synthétiques, les défauts sont le plus souvent localisés sous la forme de rainures (pour le passage des cables et gaines). L'évaluation de la conductivité effective des matériaux affectés par différentes tailles et aspects de rainures, a montré que les rainures profondes sont plus nuisibles que les rainures qui s'étalent en largeur. Par ailleurs, parmi tous les défauts étudiés dans ce chapitre, les défauts présentant des vides, tels que les ouvertures et les défauts de type passage de fils, présentaient les plus grandes pertes de résistance. Il est de ce fait très important d'éviter au maximum ce type de défauts dans la pratique.

Une analyse d'incertitude a permis de décrire la variabilité de la conductivité effective à utiliser pour estimer la fiabilité de l'isolation et améliorer le processus de décision. L'analyse de la fiabilité des isolants affectés par les défauts, a permis d'estimer en terme de probabilité de défaillance de la performance énergétique de l'isolation vis-à-vis des exigences réglementaires. Parmi les quatre défauts étudiés, le calcul des probabilités a également permis de mettre en évidence le fait que les défauts irréguliers et les ouvertures étaient les plus nuisibles.

CHAPITRE IV

VARIABILITÉ CLIMATIQUE

4.1 INTRODUCTION

Le gouvernement français ainsi que l’AIE considèrent qu’il est crucial de réduire la demande énergétique du secteur du bâtiment pour lutter contre le changement climatique [1]. Toutefois, en simulation énergétique, l’interaction dynamique entre les systèmes de construction et les sollicitations environnementales est extrêmement complexe, impliquant un grand nombre de variables difficilement prévisibles [75]. Ces variables présentent souvent de grandes incertitudes liées aux phénomènes intrinsèquement aléatoires.

Les climatologues prévoient différentes progressions climatiques possibles, en fonction des différents facteurs sociaux, environnementaux, économiques et politiques. Dans ce chapitre, nous présentons les différents scénarios climatiques et l’incertitude associée à chacun. Pour une prévision énergétique plus réaliste, nous proposons de considérer la variable climatique en simulation énergétique. Pour ce faire, nous étudions deux approches probabilistes permettant de modéliser l’incertitude climatique en nous basant sur les prévisions de groupes d’experts en climatologie.

4.2 PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES ET SOLLICITATIONS CLIMATIQUES

Le changement climatique est l’un des principaux défis du 21^{ème} siècle, avec d’importantes conséquences sur l’environnement, la santé et l’économie mondiale [103]. Selon l’AIE, la demande énergétique mondiale a augmenté à un rythme plus rapide que l’économie mondiale, principalement après la crise économique de 2008. Par ailleurs, l’évolution démographique et la variabilité climatique incontrôlable ne font qu’empirer la situation. L’AIE et le Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’évolution du Climat (GIEC) insistent fortement sur le rôle du secteur du bâtiment qui représente le plus gros potentiel d’atténuation des émissions de GES et par conséquent du changement climatique [104].

En plus des objectifs énergétiques, les réglementations thermiques actuelles visent la réduction du changement climatique en améliorant la performance thermique de l’enveloppe au moyen du développement d’outils de simulation de plus en plus précis. Toutefois, malgré les avancées indéniables, la maîtrise des consommations énergétiques des bâtiments reste encore difficile à cause du choix des données météorologiques utilisés. En effet, jusqu’à présent, nul n’est en mesure d’affirmer avec exactitude le profil climatique à employer pour les simulations.

4.2.1 Impact du climat sur le secteur du bâtiment

La mise en place de la RT2012 a donné lieu à une nouvelle répartition des zones thermiques en France, influant sur les exigences thermiques selon la zone géographique. Huit zones climatiques ont été déterminées en fonction des températures hivernales (H1, H2 et H3) et estivales (a, b, c et d). Celles-ci permettent de déterminer un "coefficient de rigueur" propre à chaque région.

Ce coefficient rigueur est pris en compte pour le calcul de la consommation énergétique en fonction des spécificités climatiques de chaque territoire. Ces zones permettent d'optimiser les règles de construction en fonction des territoires considérés. Plus le coefficient de rigueur climatique est élevé, plus l'exigence par rapport à la consommation énergétique est importante. La figure 4.1 présente les zones climatiques françaises :

- la zone H1 est la zone la plus froide, située au Nord et à l'Est ; elle est composée de trois régions a,b et c ;
- la zone H2 est une zone tempérée ;
- la Zone H3 est la zone chaude au bord de la méditerranée.

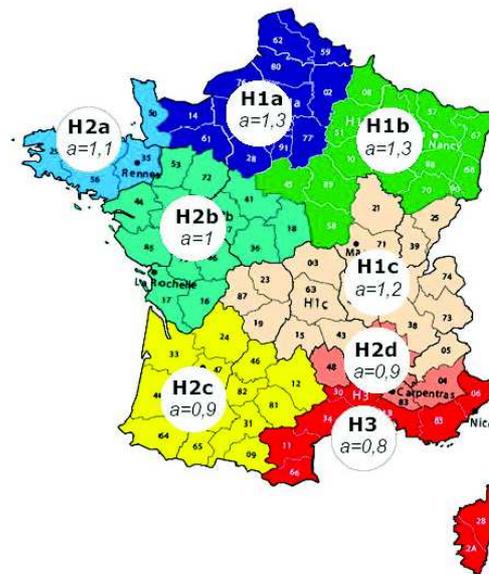


FIGURE 4.1: Zones climatiques françaises.

A titre d'exemple, pour l'obtention du label BBC, le coefficient de rigueur climatique est appliqué à la consommation conventionnelle C_{epmax} fixée à 50kWh/m^2 en suivant la formule :

$$C_{epmax_{Region}} = 50 \times (a + b) \quad (4.1)$$

où a correspond au coefficient de la zone climatique et b est donné en fonction de l'altitude du terrain de construction. Le tableau 4.1 présente des valeurs moyennes de la consommation conventionnelle ($C_{epmax_{Region}}$) modulée en fonction de la localisation géographique¹.

¹ La valeur de C_{epmax} est modulée en fonction de la localisation géographique, de l'altitude, du type d'usage du bâtiment, de sa surface pour les logements et des émissions de gaz à effet de serre des bâtiment.

Zones climatiques	RT 2005		RT 2012
	Chauffage par combustibles fossiles	Chauffage électrique (dont pompes à chaleur)	Valeur Moyenne
H1	130	250	60
H2	110	190	50
H3	80	130	40

Tableau 4.1: Valeurs de Cepmax par région climatique.

Pour l'évaluation de la demande énergétique, les outils de simulation dynamique nécessitent l'utilisation de fichiers décrivant les sollicitations environnementales. Ces fichiers contiennent des données météorologiques horaires sur la base des données historiques de la station météorologique la plus proche. Parmi les types de formats de données disponibles, le format de l'année météorologique typique (TMY2²), développé par le laboratoire national américain de l'énergie renouvelable³ est le plus utilisé. Il représente une extension des fichiers TMY proposés auparavant par le centre national américain des données climatiques⁴. Ces fichiers TMY2 sont utilisés dans les bases de données climatiques actuelles telle que *Meteonorm* qui englobe aujourd'hui les données de plus de 7700 stations météorologiques à travers le monde [105].

Les fichiers météorologiques tels que les TMY2, sont générés à partir de données mesurées sur le long terme en utilisant des fonctions statistiques et sont considérés comme convenablement adaptés pour prédire les besoins énergétiques moyens d'un bâtiment. Toutefois, étant donné que ces fichiers représentent des années types, elles ne peuvent être adaptées pour l'évaluation des risques extrêmes [105].

Si les cycles diurnes doivent être évalués, les ensembles de données horaires peuvent présenter des limites, car l'interpolation entre les valeurs horaires peuvent ne pas refléter les particularités météorologiques de la région. Par conséquent, des fichiers météorologiques permettant l'intégration des données sous-horaires ont été créés par les développeurs de ESP-r EnergyPlus, les nommant Energy Plus Weather (EPW). Ces fichiers sont cependant basés sur la même méthodologie de génération de données utilisées dans les fichiers TMY2 [105].

Dans la littérature, de nombreux auteurs soulignent le fait que les grandes incertitudes observés sur les performances des bâtiments sont dues aux variabilités associées aux données climatiques utilisées [18, 106, 107]. Par conséquent, il devient nécessaire de tenir compte de la variabilité des données utilisées dans les fichiers météorologiques (TMY2) pour une évaluation réaliste de la performance énergétique.

4.2.2 Prédiction du changement climatique

Le changement climatique se réfère à un changement d'état en termes de moyenne et de variabilité de ses propriétés, sur la même période étendue. Ce changement d'état

² TMY2 pour Typical Meteorological Year

³ NREF : National Renewable Energy Laboratory.

⁴ National Climatic Data Center.

est généralement associé à une variabilité naturelle ou résulte directement de l'activité humaine. D'après le GIEC, le forçage radiatif du système climatique est dominé par les émissions de Gaz à Effets de Serre (GES). Ces émissions sont dues aux différentes activités humaines et ont augmenté de plus de 70% entre 1970 et 2004 [8].

Pour générer les fichiers météorologiques utilisés en simulation énergétique, différentes méthodes peuvent être actuellement utilisées [75] :

- A. **Extrapolation statistique (méthode utilisée pour les DJU)** : cette méthode utilise l'extrapolation statistique sur l'historique des données météorologiques. C'est une méthode qui est simple, rapide et surtout largement utilisée par l'industrie du bâtiment pour estimer les consommations énergétiques.
- B. **Méthode de compensation cumulative (Imposed offset method)** : cette méthode est généralement utilisée aux Etats-unis, en Australie, en Nouvelle-zélande et en Grande-Bretagne. Elle permet d'estimer les données climatiques associées au réchauffement à partir de modèles climatiques complexes, qui sont basés sur les données enregistrées sur une année de référence.
- C. **Modèle météorologique stochastique (Stochastic weather model)** : cette méthode a été proposée par *Van Paassen* et *Luo* [75] pour générer des données climatiques artificielles pour diverses applications. Cependant, en raison de la nature stochastique de cette méthode, il est nécessaire de générer des données sur plusieurs années pour pouvoir représenter le profil climatique. Cette méthode a des difficultés pour modéliser un grand nombre de variables climatiques [75].
- D. **Modèle climatique global (Global climate model)** : cette méthode considère les mécanismes de transfert énergétique entre une atmosphère turbulente à trois dimensions et les continents, les océans et les surfaces hétérogènes dans l'espace. Cependant, en raison de la nature complètement complexe et chaotique du système climatique, l'utilisation de cette méthode est très difficile, voire impossible. De nombreuses approximations et simplifications ont été proposées, cependant ces modèles ne sont disponibles que chez les météorologistes.

De nombreux travaux scientifiques utilisent ces méthodes de génération pour évaluer les fichiers climatiques à utiliser pour l'étude de la performance énergétique des bâtiments dans différentes zones climatiques (ex : Canada [108], Nouvelle-Zélande [109], Suisse [110, 111], Grande-Bretagne [105, 112, 113, 114] et Hong-Kong [115]). Néanmoins, de nombreux auteurs expriment encore des réserves à l'égard des prévisions utilisées [18, 106, 107] parce que les fichiers des données météorologiques modélisant le changement climatique ne peuvent pas être validés.

Le GIEC propose quatre évolutions possibles du climat jusqu'en 2100, à partir de quatre modèles de progression des concentrations atmosphériques. Chaque scénario se base sur un certain nombre d'hypothèses sur l'évolution démographique et environnementale, sur le développement économique et technologique ainsi que sur différents facteurs sociaux [8, 106]. Ainsi, nous distinguons les quatre familles [8] présentées graphiquement sur la figure 1.15 :

1. Famille de scénarios A1 : décrivant une évolution économique et démographique rapide. A1 se divise en trois groupes décrivant les alternatives de développement technologique (A1F1 : décrivant un monde qui continue à utiliser principalement

les combustibles fossiles, A1T : avec des combustibles non fossiles, A1B : un mélange des deux).

2. Famille de scénarios A2 : décrivant un monde hétérogène avec une forte croissance démographique et un faible développement économique et technologique.
3. Famille de scénarios B1 : décrivant un monde convergent, avec la même évolution démographique que A1 mais avec des changements plus rapides des structures économiques.
4. Famille de scénarios B2 : correspondant à un monde axé sur la préservation de l'environnement et de l'égalité sociale, avec une évolution démographique et économique moyenne.

Du fait de la nature cyclique du processus de température, la modélisation de la température se base en général, sur les données historiques, en pensant qu'elles donnent une idée raisonnable du niveau de la température dans le futur. Les propriétés statistiques et les corrélations entre les variables sont directement déduites de l'historique des données observées [116]. La figure 4.2 présente l'évolution de la température annuelle dans le cas des trois scénarios B1, A1B et A2. Les observations sur lesquels se base le GIEC proviennent de la NASA⁵ (bleu foncé), du NOAA⁶ (Moutarde) et du Centre Hadley⁷ du Royaume-Uni (vert clair). Les évolutions des scénarios sont présentés comme des pistes d'évolution où les barres sur le côté indiquent la fourchette de valeurs probables associées à chaque scénario. Une fourchette est représentée par des valeurs entre -40% à +60% de la moyenne.

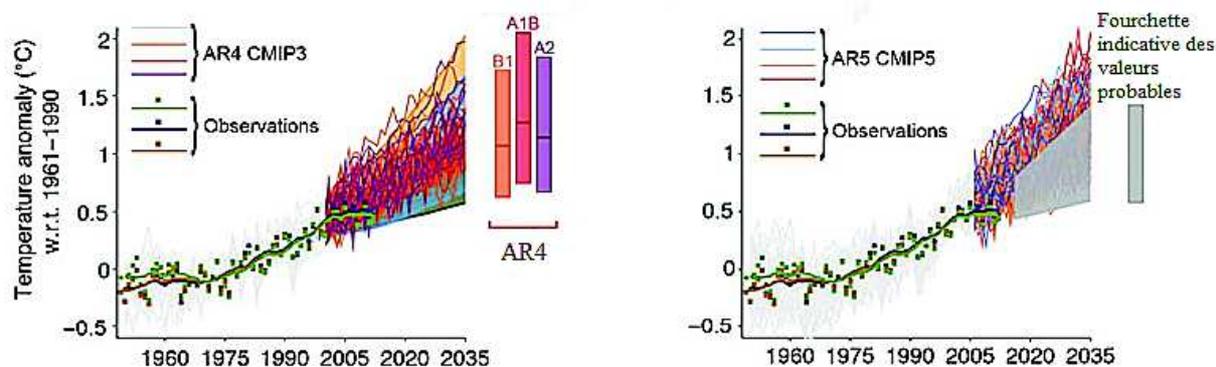


FIGURE 4.2: Evaluation des projections climatiques proposés par le GIEC [8].

La question que l'on pourrait se poser maintenant est : "Quel scénario est le plus susceptible de décrire la réalité future et peut donc être utilisé pour la simulation de la performance énergétique?". Les climatologues ne peuvent toujours pas répondre avec exactitude à cette question, car cela dépend de paramètres subjectifs, incontrôlables et difficilement estimables. Néanmoins, l'observation du changement climatique depuis les années 1980 montre que nous suivons l'évolution du scénario pessimiste A2 [117].

5 National Aeronautics and Space Administration.

6 National Oceanic and Atmospheric Administration.

7 Hadley Center for Climate prediction and Research.

4.2.3 Variabilité climatique

Les modèles climatiques sont entachés d'incertitudes liées aux processus chaotiques intrinsèques à l'atmosphère et aux interactions surface/atmosphère. Le GIEC associe à chaque scénario un degré de variabilité en fonction des différentes hypothèses présentées dans la sous-section 4.2.2. En général, trois types d'incertitudes sont considérés [8, 113] :

- la variabilité naturelle du climat interne ;
- l'incertitude sur les modèles climatiques en raison d'une mauvaise compréhension ou connaissance du processus physique du système climatique ;
- l'incertitude sur les émissions futures.

La figure 4.3 présente la variation moyenne de la température annuelle. Elle est estimée sur la base des observations historiques (ligne noire) où l'incertitude pendant cette période est notée par la zone grise (Incertainitude sur le Modèle de Climat Global (MCG)). La variabilité naturelle (en orange) est supposée constante dans le temps et dérive d'un modèle de variabilité interannuelle. L'incertitude sur les émissions (en vert) est estimée à partir de la différence du modèle moyen des projections des différents scénarios. L'incertitude sur la réponse climatique (en bleu) est basée sur le modèle de propagation climatique qui diffère d'un scénario à l'autre en fonction des hypothèses considérées. Pour chaque projection climatique, l'intervalle de confiance considéré est de 90% et signifie que la température est supposée être estimée dans cette gamme.

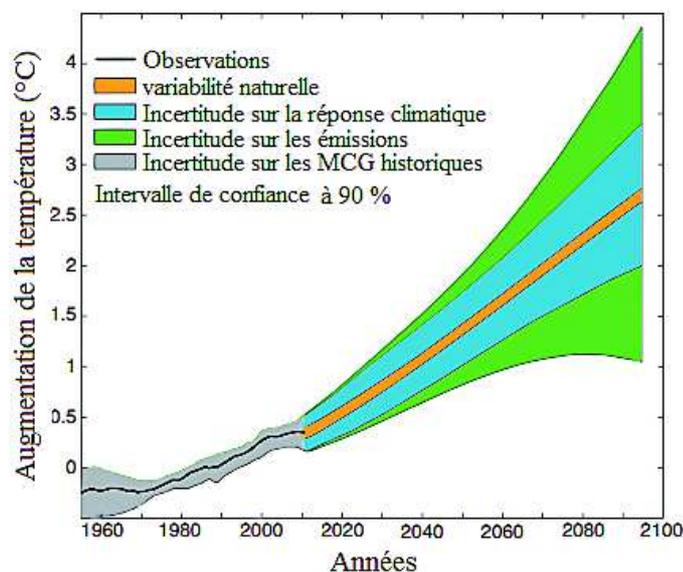


FIGURE 4.3: Incertitudes considérées par les scénarios climatiques proposés [8].

En simulation énergétique, la littérature est très critique vis-à-vis des prévisions climatiques à utiliser. De nombreux auteurs parlent de "manque de sens" des prévisions climatiques actuelles qui ne considèrent pas les événements extrêmes [18, 107, 113].

L'avantage des scénarios du GIEC est qu'ils intègrent à différents degrés les événements extrêmes. A titre d'exemple, dans le cas de la température journalière, la représentation de l'incertitude sur cette température est représentée par une gaussienne comme présentée sur la figure 4.3 [8]. La probabilité d'occurrence des événements extrêmes est alors indiquée par les zones d'ombrage. La variation de la fréquence de ces extrêmes est affectée par des changements dans (a) la moyenne (b), la variance ou (c) à la fois la moyenne et la variance de la température. Les fonctions de densité de probabilité en pointillés représentent une distribution de la température et en trait plein la distribution modifiée lorsque la moyenne et/ou la variance de la température considère une fréquence plus importante des événements extrêmes.

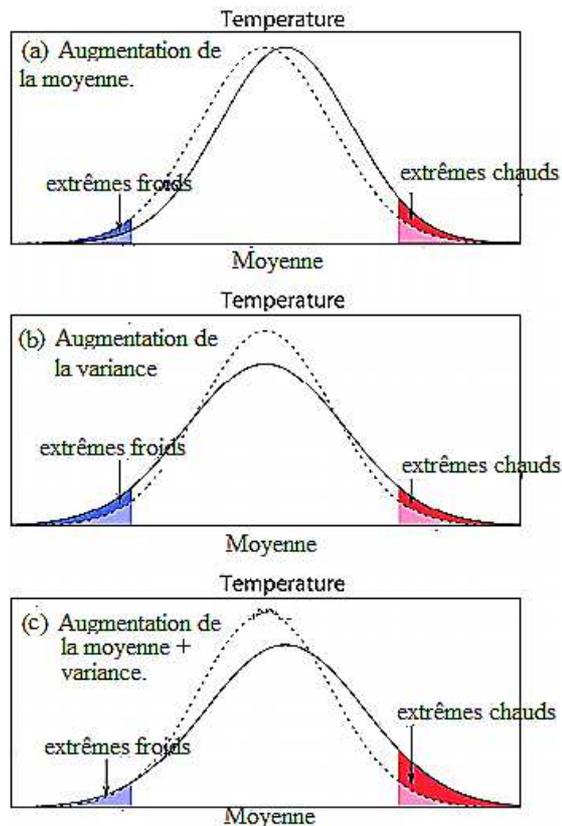


FIGURE 4.4: Variation des températures extrêmes [8].

En fonction du caractère du scénario projeté, le GIEC considère plus ou moins les événements extrêmes en jouant sur les moyennes et les variances associées aux données climatiques. Dans ce travail, nous proposons d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur la performance énergétique en nous basant sur les estimations des deux scénarios extrêmes (pessimiste A2 et optimiste B1) et le scénario moyen (A1B) du GIEC. Ces scénarios considèrent différents degrés d'incertitudes sur la base des hypothèses énoncées plus tôt.

Dans la littérature, bien que les chercheurs et les acteurs du bâtiment en ont conscience, très peu d'études traitent à l'heure actuelle la variabilité climatique lors de l'élaboration du bilan énergétique et encore moins lors de la conception de l'enveloppe du bâtiment. Les outils n'intègrent pas l'incertitude liée aux variables d'entrée

en raison du manque d'information sur la variance locale ou régionale de l'incertitude climatique.

L'étude présentée par De Wilde and Tian (2012) [18] propose une méthodologie pour quantifier le risque que le changement climatique représente pour la performance thermique des bâtiments (besoins en chauffage, en refroidissement et en ventilation). A travers des études de cas, ces auteurs démontrent que les prévisions de la performance thermique sur le long terme sont fournies avec de très grandes incertitudes.

Dans leur étude, les auteurs se basent sur une approche probabiliste pour représenter l'incertitude actuelle et future des données climatiques dans les fichiers météorologiques. Ainsi, chaque donnée météorologique est considérée comme un paramètre incertain défini par une distribution de probabilité. Un échantillonnage est réalisé en utilisant la méthode de l'hypercube Latin⁸ (taille : 60 à 2400 variantes) puis les fichiers EPW sont générés et des simulations énergétiques sont lancées (Energyplus). Il leur a fallu plus de 200 ordinateurs de bureau et un temps de simulation très important pour effectuer les simulations pour chaque cas étudié.

Cette étude est très intéressante car elle a permis de mettre en évidence des écarts de performance énergétique dus au changement climatique. Cependant, les efforts numériques et les temps de calcul trop importants ne permettent pas l'utilisation d'une telle approche en phase de conception.

Dans notre travail, pour réduire le temps de calcul, nous proposons d'évaluer l'impact du changement climatique sur la performance à l'échelle annuelle et non pas horaire. La consommation annuelle est calculée sur la base des données météorologique annuelles fournies par MétéoFrance (DJU) et définies par une densité de probabilité, à variance croissante au fil du temps.

Une analyse de fiabilité est par la suite réalisée pour évaluer l'impact de la variabilité sur la fiabilité de la performance énergétique. Ainsi, nous proposons de nous baser sur une approche probabiliste pour vérifier que la probabilité de défaillance, qui correspond à la probabilité de dépassement du critère d'état limite (2.24), reste faible en dépit de la variabilité climatique croissante au fil du temps.

4.3 MODÉLISATION DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE

Au vu des exigences croissantes du niveau énergétique des bâtiments, il devient nécessaire de considérer l'impact des incertitudes de nature aléatoire associées au changement climatique. En règle générale, l'utilisation de la théorie des probabilités est un choix naturel lorsqu'il s'agit de modéliser les effets du hasard et par extension les incertitudes que l'on peut introduire dans les modèles.

Dans ce contexte, nous proposons deux méthodes probabilistes pour modéliser la variabilité climatique annuelle permettant d'intégrer l'incertitude en entrée des modèles de simulation pour une meilleure prévision du comportement thermique.

⁸ L'hypercube latin est un cas particulier de l'échantillonnage stratifié, dont le but est de réduire la variance en découpant l'espace des variables d'entrée, en sous-espaces disjoints, puis à échantillonner au sein de chacun de ces sous-espaces équiprobables. L'échantillonnage par hypercube latin présente l'avantage de couvrir uniformément l'intervalle de définition de chaque variable [118].

4.3.1 Variabilité linéairement croissante

En simulation, les données météorologiques doivent refléter le climat local. Le concept des Degrés-jours unifiés (DJU) étant le plus souvent utilisé en simulation à long terme, nous utilisons les températures annuelles locales fournies par MétéoFrance pour calculer les DJU moyens de la région étudiée. Les logiciels de simulation ayant besoin de données climatiques à long terme, nous proposons d'utiliser les prévisions du GIEC pour estimer la progression climatique de la région.

En fonction du scénario climatique considéré, nous estimons l'augmentation du degré jour annuel moyen sur la base des augmentations moyennes de $\Delta T(t)$. Les formules présentés en (4.2) permettent d'estimer les DJC et DJR moyens futurs.

$$\begin{cases} \text{DJC}(t_i) = \text{DJC}(t_{i-1}) - nb_C \times \Delta T(t_i) \\ \text{DJR}(t_i) = \text{DJR}(t_{i-1}) - nb_R \times \Delta T(t_i) \end{cases} \quad (4.2)$$

où $\text{DJC}(t_i)$ et $\text{DJR}(t_i)$ sont les degrés-jours de chauffe et de refroidissement moyens à l'année t_i qui dépendent des $\text{DJC}(t_{i-1})$ et $\text{DJR}(t_{i-1})$ de l'année précédente t_{i-1} , respectivement, nb_C et nb_R représentent le nombre de jours de chauffe et de refroidissement, respectivement ($nb_C = 232$ et $nb_R = 131$).

Au regard de la variabilité, dans cette première approche nous supposons que la dispersion de la moyenne est linéairement-croissante dans le temps autour des scénarios moyens calculés. La figure 4.5 présente l'évolution des DJU annuels dans le cas des trois scénarios considérés (A2, B1 et A1B). Chaque année, nous associons aux DJC et DJR moyens calculés (4.2), un intervalle de confiance basée sur les prévisions de la variabilité du scénario considéré. L'intervalle de confiance annuel augmente linéairement au fil du temps, jusqu'à atteindre la dispersion maximum du scénario identifié par le GIEC à 100 ans (t_{100}).

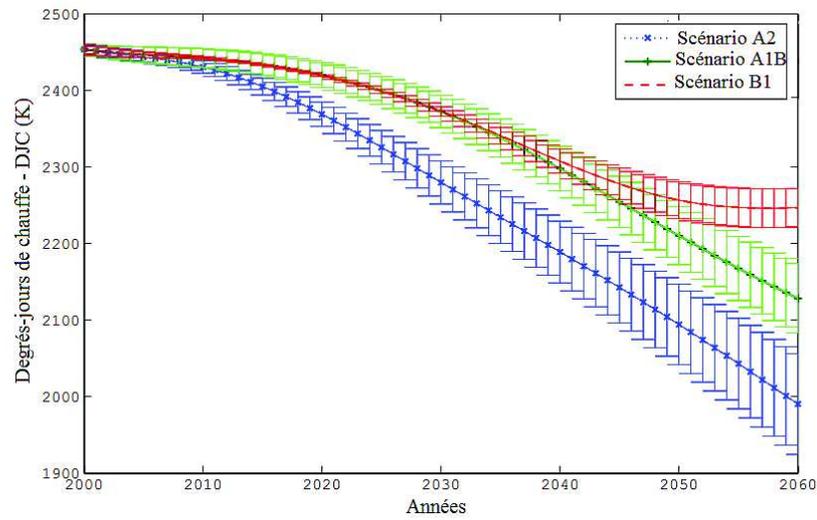
$$\sigma(t_i) = \sigma(t_0) + \frac{\sigma(t_{100}) - \sigma(t_0)}{t_{100}} t_i \quad (4.3)$$

où $\sigma(t_i)$ est l'écart-type à associer aux DJU moyens annuels estimés précédemment (4.2). $\sigma(t_0)$ et $\sigma(t_{100})$ sont les écarts-types minimum et maximum du scénario considéré.

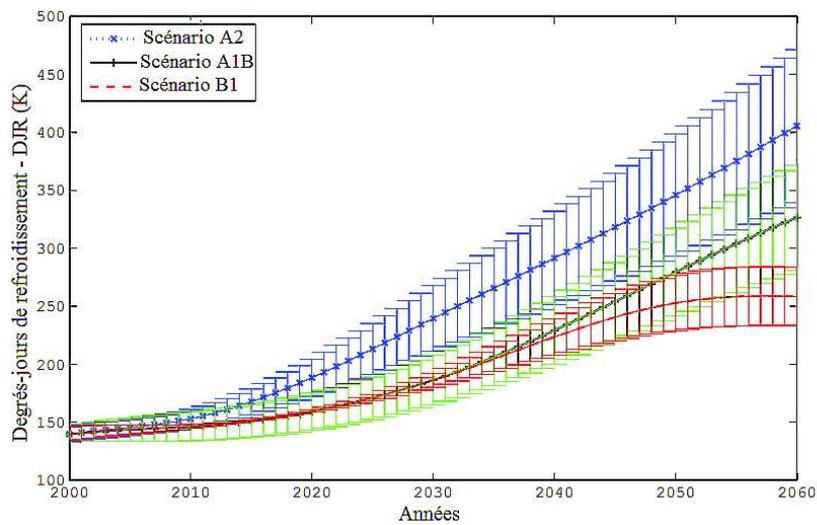
Au fil des années, le réchauffement climatique a tendance à induire des besoins croissants en refroidissement (Figure 4.5b) contrairement aux besoins en chauffage qui ont plutôt tendance à baisser (Figure 4.5a). Le scénario A2 (en bleu) décrit la progression du réchauffement climatique la plus pessimiste (plus de refroidissement et moins de chauffage), contrairement au scénario le plus optimiste B1 (en Rouge), qui lui correspond au scénario le plus froid (plus de chauffage et moins de refroidissement).

Pour évaluer l'impact de la dispersion climatique sur la fiabilité de la performance énergétique, nous considérons les valeurs annuelles DJC et DJR comme des variables aléatoires définies par une densité de probabilité normale, conformément aux estimations du GIEC, dont les moments statistiques sont les DJU annuels moyens et l'écart-type associé estimés sur la base du scénario climatique considéré. Toutefois, les valeurs de DJC et DJR étant toujours positives la loi log-normale peut également être utilisée.

L'intérêt de cette approche est que le calcul de la probabilité de défaillance de l'isolation est très efficace puisqu'il s'agit de variables aléatoires indépendantes.



(a) Degrés-Jour Chauffage (DJC)



(b) Degrés-Jour Refroidissement (DJR)

FIGURE 4.5: Evolution linéaire de l'intervalle de confiance pour différents scénarios climatiques (A2-A2B-B1) - ville de Clermont-Ferrand.

4.3.2 Variabilité générée par des processus stochastiques

Dans la réalité, il existe une autocorrélation temporelle des données climatiques. Pour tenir compte de cette autocorrélation, nous proposons dans cette section d'utiliser des processus aléatoires lors du traitement des variabilités temporelles du scénario climatique [119].

En conséquence, la modélisation par des variables aléatoires (sous-section 4.3.1) est remplacée par des processus stochastiques. L'utilisation de ce type d'approches pour modéliser l'incertitude permet d'intégrer la corrélation temporelle pour une modélisation plus fidèle de la réalité [120, 121]. Le scénario local, précédemment défini par les valeurs moyennes (DJU) et les intervalles de confiance associés, est représenté par un

processus stochastique non stationnaire, dont les paramètres statistiques sont définis comme suit :

- Moyenne : les DJU moyens sont relatifs à la région et le scénario climatique considéré. A l'instar de la première approche, on calcule les DJU annuels en se basant sur des données régionales de MétéoFrance et des projections de réchauffement proposées par le GIEC (Voir (4.2)).
- L'écart-type : il est croissant annuellement jusqu'à atteindre à 100 ans la dispersion maximale du scénario considéré (A2, A1B ou B1).
- Longueur d'autocorrélation : notée l , elle est un scalaire lorsque nous avons à faire à un processus à une dimension. Dans notre travail, nous adoptons une longueur d'autocorrélation de 5 ans.
- Autocorrélation des variables : La fonction d'autocorrélation adoptée est exponentielle comme suit :

$$\rho(t, t') = \exp\left(-\frac{t-t'}{l}\right) \quad (4.4)$$

Enfin, la représentation du processus consiste à remplacer une quantité aléatoire par un ensemble de variables aléatoires. Autrement dit, il nous faudra discrétiser notre processus $H(t)$ par une approximation $\widetilde{H}(t)$ définie par un ensemble fini de variables aléatoires $\xi_i(\theta), i = 1, \dots, n$:

$$H(t) \approx \widetilde{H}(t) \quad (4.5)$$

Différentes méthodes de discrétisation peuvent être utilisées. Le rapport de Sudret and Der Kiurighian (2000) [33] détaillent les différentes méthodes de discrétisation qu'elles soient discrètes ou fonctionnelles. Dans notre cas, nous utilisons la discrétisation de **Karhunen-Loève** [33], qui permet de représenter le processus en une partie déterministe ($\mu(t)$) et une partie aléatoire décomposée sur la base de valeurs propres λ_i et de fonctions propres $f_i(t)$ de la fonction d'autocovariance $C_{HH}(t, t') = \sigma(t)\sigma(t')\rho(t, t')$. Ces fonctions et valeurs propres sont la solution du problème suivant [33] :

$$\forall i = 1, \dots, \int_{\Omega} C_{HH}(t, t') \varphi_i(t') d\Omega_{t'} = \lambda_i \varphi_i(t') \quad (4.6)$$

Le noyau $C_{HH}(.,.)$ est borné, symétrique et défini positif. L'ensemble des $\{\varphi_i\}$ forme une base complète orthogonale de l'espace des fonctions carrées intégrables $L^2(\Omega)$. Les valeurs propres sont réelles, positives et en nombre fini. Le processus $H(.)$ peut alors être défini sur la base suivante :

$$H(t, \theta) = \mu(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} \xi_i(\theta) \varphi_i(t) \quad (4.7)$$

où $\xi_i(\theta), i = 1, \dots$ sont les coordonnées de la réalisation du processus aléatoire vis-à-vis de l'ensemble des fonctions déterministes φ_i .

En calculant $\text{Cov}[H(t), H(t')]$ (C.4) et en imposant l'égalité à $C_{HH}(t, t')$, nous avons :

$$E(\xi_k \xi_l) = \delta_{kl} \quad (\text{symbole de Kronecker}) \quad (4.8)$$

Cela signifie que la famille des $\{\xi_i\}_{i=1}^{\infty}$ forme un ensemble orthonormal de variables aléatoires en termes de produit scalaire. La discrétisation que nous venons de présenter vérifie les propriétés suivantes [33] :

- En l'absence de valeurs propres multiples (excepté éventuellement 0), il est possible de les classer en une suite décroissante convergente vers 0. En tronquant la série précédente (4.7) à un ordre M , l'approximation de Karhunen-Loève du processus s'écrit :

$$\tilde{H}(t, \theta) = \mu(t) + \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} \xi_i(\theta) \phi_i(t) \quad (4.9)$$

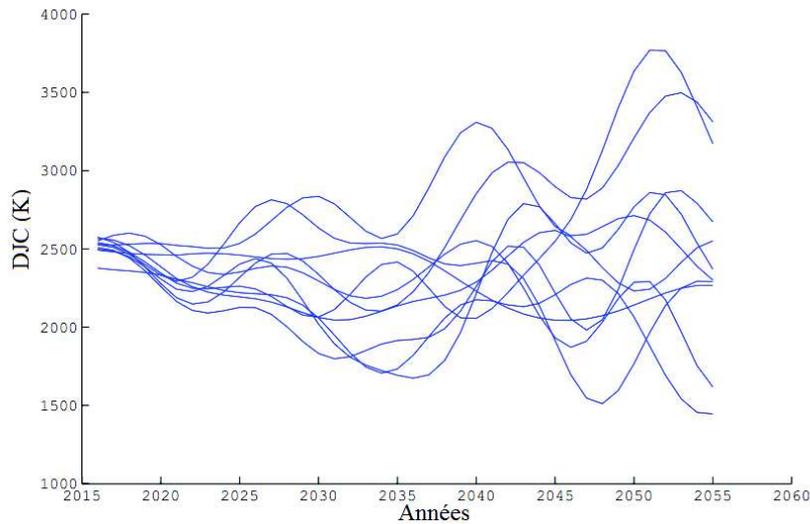
- La base des fonctions propres de la fonction d'autocovariance est optimale au sens des moindres carrés de l'erreur (intégrée sur Ω) due à la troncature à un ordre M .
- L'ensemble des variables aléatoires qui apparaissent dans l'équation (4.7) est orthonormal, c'est-à-dire qu'elles vérifient (4.8) si et seulement si les fonctions de base $\{\phi_i\}$ et les constantes λ_i sont des solutions du problème aux valeurs propres (4.6).
- Étant donné que les fonctions propres sont orthonormales, il est facile d'obtenir une expression de chaque variable aléatoire qui apparaît dans la série :

$$\xi_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \int_{\Omega} [H(t) - \mu(t)] \phi_i(t) dt \quad (4.10)$$

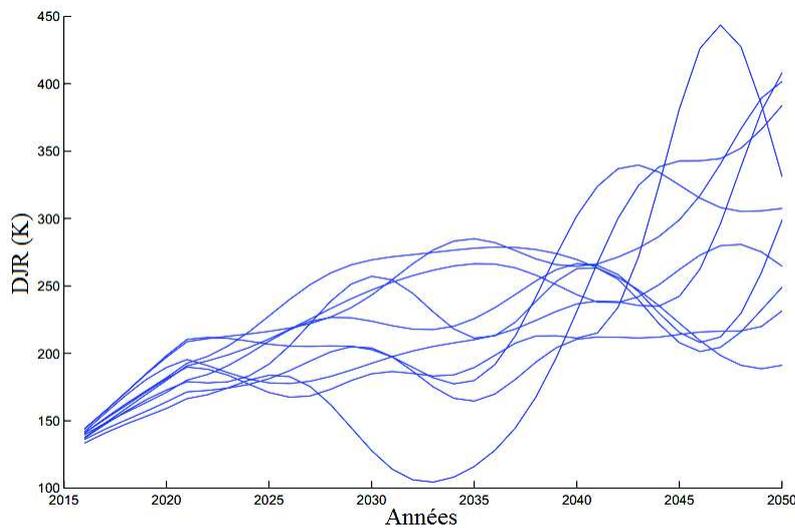
Dans ce cas, quand $H(\cdot)$ est un processus gaussien (représentant généralement le contexte naturel), chaque variable aléatoire ξ_i est une variable aléatoire gaussienne. Il s'ensuit que les $\{\xi_i\}_{i=1}^{\infty}$ forment un ensemble de variables aléatoires gaussiennes indépendantes. De plus, la discrétisation de Karhunen-Loève d'un processus gaussien converge quasiment toujours.

Une simulation d'ensemble comprenant plusieurs simulations fournit une vision probabiliste prenant en compte les incertitudes associées et la dépendance linéaire entre les variables annuelles. L'utilisation des simulations de MC permet de propager l'incertitude dans le modèle climatique.

La figure 4.6 présente une simulation de dix trajectoires aléatoires des DJC et DJR, dans le cas du scénario pessimiste A2. L'intérêt de cette approche est qu'elle offre une modélisation plus réaliste du phénomène temporel. Toutefois, des informations beaucoup plus précises sont nécessaires, surtout vis-à-vis de la longueur d'auto-corrélation à adopter selon le site géographique. Par ailleurs, le calcul des probabilités demande plus d'effort numérique en fonction de la précision souhaitée.



(a) Degrés-jour Chauffage (DJC)



(b) Degrés-jour refroidissement (DJR)

FIGURE 4.6: Simulations des processus stochastiques de DJC et DJR selon le scénario (A2) pour la ville de Clermont-Ferrand.

4.4 IMPACT DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

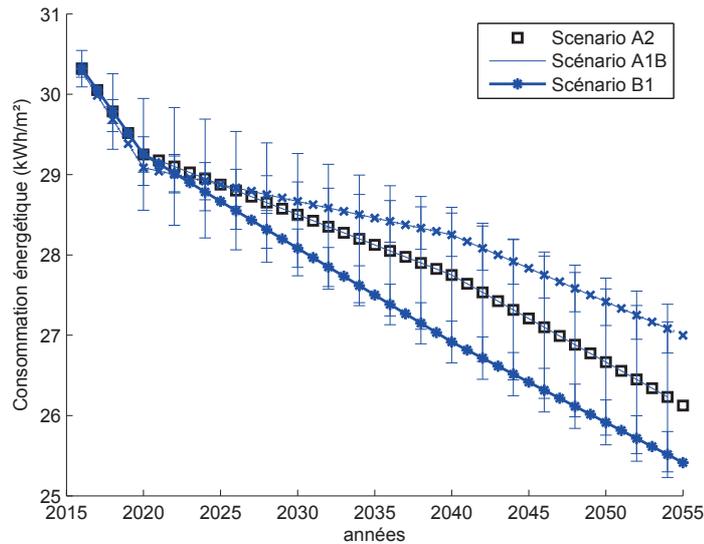
Nous proposons d'évaluer la fiabilité du mur étudié dans les chapitres 2 et 3 en tenant compte de l'impact du changement climatique. Comme précédemment, la performance de la façade isolée est considérée comme fiable lorsque les consommations énergétiques annuelles obtenues tout au long de la durée de vie permettent de vérifier les exigences réglementaires, en dépit des incertitudes croissantes dans le temps.

Le tableau 4.2 présente les modèles probabilistes des scénarios climatiques considérés, où les coefficients de variation (C.V) sont obtenus à partir des prévisions du GIEC [8]. La figure 4.7 présente l'évolution de la consommation énergétique calculée lorsque

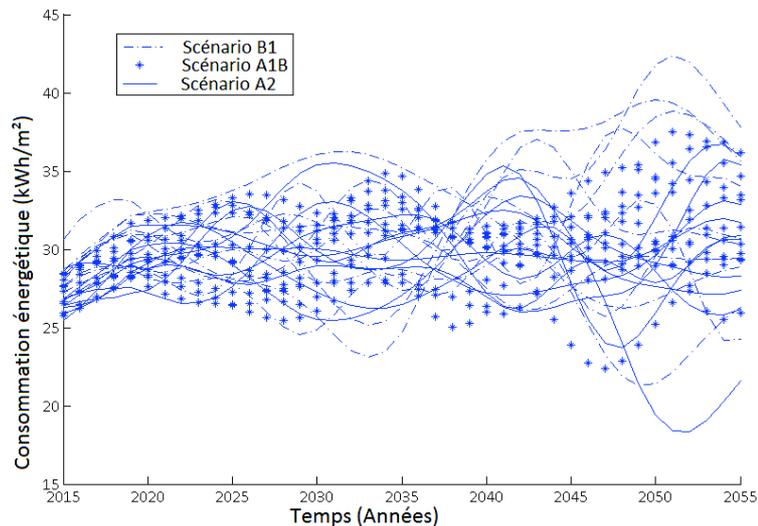
les DJU sont modélisés par des variables aléatoires avec écart-type croissant dans le temps (Figure 4.7a), et par processus stochastique (Figure 4.7b).

Scénario	C.V à t_0	C.V à t_{100}	Loi de distribution
Scénario A2	5%	44%	Log-Normale
Scénario A1B	5%	37%	Log-Normale
Scénario B1	5%	38%	Log-Normale

Tableau 4.2: Variables aléatoires : lois de distribution et paramètres statistiques associés.



(a) Variabilité linéaire.



(b) Variabilité générée par processus stochastiques.

FIGURE 4.7: Variabilité de la consommation énergétique par scénario climatique.

La façade simulée en considérant le scénario optimiste B1, génère la demande énergétique la plus importante. La raison est que le climat n'est pas très affecté par le ré-

chauffement climatique nécessitant des besoins en chauffage toujours aussi importants au fil des années. Lorsque les variables aléatoires n'étant pas dépendantes les unes des autres, nous générons chaque année un échantillon de valeurs, en fonction de la valeur moyenne et de l'écart-type de l'année, et calculons la consommation énergétique correspondante. La consommation moyenne et l'intervalle de confiance associé annuellement sont présentés sur la figure 4.7.

Dans le cas où nous tenons compte de la dépendance entre les valeurs annuelles des DJU, nous générons différentes trajectoires du climat et le comportement énergétique est alors évalué par trajectoire. La figure 4.7b présente, dans le cas des trois scénarios climatiques, l'évolution de la consommation énergétique par trajectoire, où nous constatons que la dispersion des trajectoires pour le scénario A2 est plus importante.

La figure 4.8 présente l'évolution de la fiabilité de l'isolation tout au long de la durée de vie. Elle est exprimée par la probabilité de défaillance de l'isolation par rapport au dépassement des exigences réglementaires et ce pour différents scénarios climatiques. Quel que soit le type de scénario étudié, nous constatons que la probabilité de défaillance de l'isolant augmente au fil du temps, car le degré d'incertitude liée aux prévisions climatiques augmente d'une année à l'autre. Cependant, les probabilités de défaillance P_f obtenues en considérant le scénario A2 sont les plus importantes, car les plus grandes variabilités sont attendues pour ce scénario. Nous remarquons également que le scénario B1 présente une forte évolution des probabilités de défaillance. Ceci est dû au fait que, ce scénario est le moins touché par le réchauffement climatique et par conséquent, de fortes consommations moyennes en chauffage sont attendues tout au long de la DDV. La prise en compte de la variation climatique entraîne de grandes dispersions des consommations qui se rapprochent des consommations maximales réglementaires.

La figures 4.8a et 4.8b présentent l'évolution de la probabilité de défaillance de l'isolation dans le cas où les incertitudes évoluent linéairement selon un modèle de variables aléatoires ou de processus stochastiques. Les probabilités de défaillance de l'isolation en présence du scénario pessimiste sont toujours les plus importantes, néanmoins, nous constatons que la variabilité linéaire donne des probabilités nettement plus importantes (de l'ordre de 10^{-2}) que l'analyse par processus stochastique (de l'ordre de 10^{-3}).

L'analyse de fiabilité donne des informations objectives sur l'impact des incertitudes climatiques sur la fiabilité de l'isolation. Cependant, les résultats dépendent non seulement des considérations climatiques mais aussi de la manière dont les incertitudes sont modélisées. A titre d'exemple, en fin de vie, la probabilité de défaillance obtenue pour le scénario A2 donne $P_f = 6 \times 10^{-2}$ avec des variables aléatoires mais seulement $P_f = 2 \times 10^{-3}$ avec les processus. En réalité, la différence des résultats est bien évidemment liée à la corrélation qui est considérée avec les processus. Dans ce sens, il est évident que les processus stochastiques modélisent de façon plus réaliste le comportement aléatoire du climat. Le modèle par variables aléatoires conduit à des estimations très pessimistes de la fiabilité, nécessitant un sur-dimensionnement de l'isolant. Cependant, il permet de considérer les incertitudes climatiques de façon simplifiée à faible coût de calcul, tout en donnant une borne supérieure de la probabilité de défaillance. Pour valider les résultats obtenus, il est nécessaire d'utiliser des données aussi précises que possible, car ils dépendent de la longueur d'autocorrélation considérée. Plus cette longueur diminue et tend vers zéro, plus nous nous rapprochons des résultats obtenus en considérant les DJU comme variables aléatoires indépendantes.

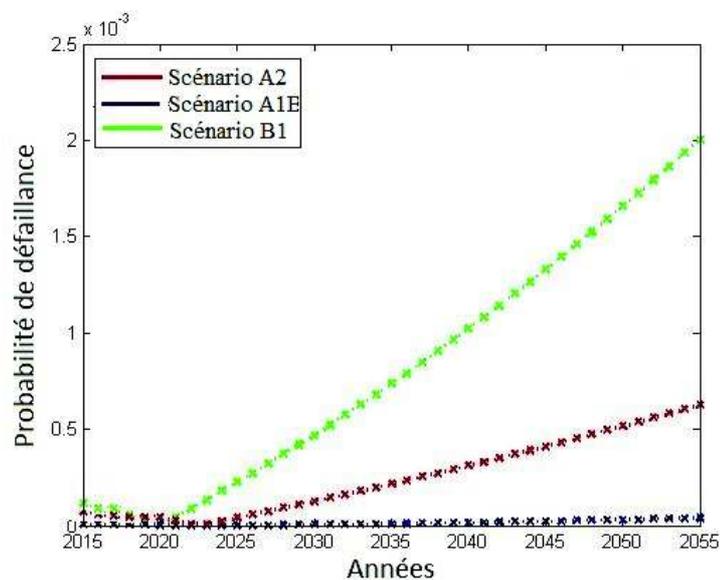
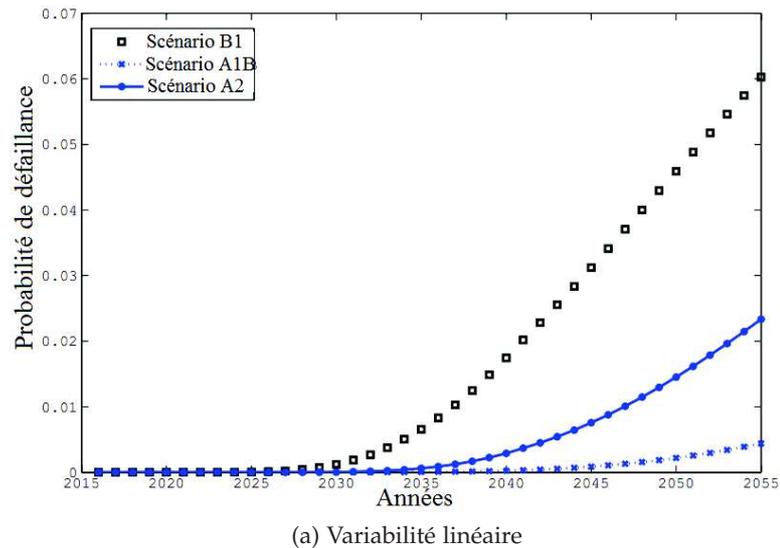


FIGURE 4.8: Evolution de la probabilité de défaillance de l'isolation d'un mur par scénario climatique.

Il est possible de se baser sur ces résultats pour justifier ces choix de conception. Pour cela, le maître d'ouvrage doit imposer une probabilité de défaillance cible à ne pas dépasser tout au long de la durée de vie, en considérant en plus de l'exigence énergétique, l'exigence du propriétaire en termes de confort et de budget d'investissement.

En fiabilité des structures vis-à-vis de l'état limite ultime (ELU), la probabilité de défaillance cible (P_{f0}) est généralement posée entre 10^{-3} et 10^{-7} en fonction des conséquences économiques, environnementales et surtout humaines que pourrait engendrer la défaillance structurale (Tableau 4.3). Toutefois, la défaillance d'une résistance thermique n'a pas de repercussions aussi importantes. La défaillance thermique engendrerait une perte énergétique, économique mais aussi une perte en confort de l'habitat, sans pour autant mettre en danger les vies humaines. Il s'agit donc de l'état limite de

service (ELS). Par conséquent, lors du choix de P_{f0} , il est nécessaire de tenir compte de l'exigence du propriétaire vis-à-vis du niveau de confort qu'il souhaite et de ses capacités d'investissement, en plus des exigences énergétiques imposées par la réglementation. A titre d'exemple, si notre choix constructif initial entraîne des P_f de 10^{-2}

Nb moyen de personnes mises en danger	Conséquences économiques		
	sans gravité	graves	très graves
petit ($< 0,1$)	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
moyen	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
grand (> 10)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

Tableau 4.3: Ordre de grandeur de probabilité cibles en construction [32]

en présence des différentes incertitudes, nous pourrions considérer que ces probabilités soient satisfaisantes vu qu'aucun impact sur la vie humaine n'est à déplorer. Toutefois, si l'exigence du propriétaire en terme de confort est importante et qu'il est en mesure d'investir suffisamment, des P_{f0} plus exigeantes peuvent être adoptées, entraînant des choix constructifs plus performants.

4.4.1 Impact des différentes sources d'incertitude sur la fiabilité d'une isolation

Dans cette section, nous comparons l'impact des incertitudes associées au climat et aux matériaux sur la fiabilité de la performance énergétique. Nous reprenons pour cela le mur illustré dans le chapitre 2 (section 2.5), isolé avec 8 cm de laine de verre et contenant un défaut de type "Ouverture", exposé au climat le plus susceptible d'arriver -Scénario A2.

La probabilité de défaillance du mur est calculée en considérant les cas suivants :

- l'incertitude sur le matériau seul : en considérant que la conductivité thermique du matériau est définie par une densité de probabilité de loi lognormale, de moyenne et écart type calculés grâce aux modèles (2.8) et (2.9), respectivement, et calibrés expérimentalement (chapitre 2).
- l'incertitude sur le matériau considéré affecté par une ouverture de 5 mm : la conductivité thermique est définie également par une densité de probabilité de loi lognormale, de moyenne calculée grâce au modèle analytique proposé en (3.1) et d'écart-type calculée grâce au modèle de variabilité du matériau (2.9).
- l'incertitude sur le climat : en considérant les données météorologiques de Clermont-Ferrand. Les valeurs de DJU sont considérées comme des variables aléatoires et traduisent le scénario de réchauffement climatique le plus pessimiste. En raison du manque de données sur la longueur d'autocorrélation et pour réduire le temps de calcul, nous considérons le modèle de variables aléatoires indépendantes avec des écarts-types linéairement croissants au cours du temps.
- En considérant toutes ces incertitudes en même temps.

La figure 4.9 présente l'évolution de la probabilité de défaillance tout au long de la durée de vie. De toute évidence, lorsque nous considérons toutes les sources d'incertitudes, nous constatons que la probabilité de défaillance du mur atteint des valeurs de l'ordre de 10^{-2} au bout d'une dizaine d'années. En regardant l'impact séparé de chaque source d'incertitude, nous constatons que :

- dans le cas de l'incertitude sur le matériau seul, il est généralement considéré en pratique que cette incertitude est insignifiante. L'analyse de fiabilité permet de justifier ce choix. En effet, les probabilités de défaillance sont très faibles tout au long de la durée de vie, ce qui permet d'affirmer que l'isolation reste tout de même performante en dépit de la variabilité de la performance thermique du matériau ;
- Dans le cas où l'incertitude liée à la mise en oeuvre est considérée, nous remarquons que les pertes en fiabilité sont non-négligeables. En effet, même un petit défaut entraînerait une augmentation significative de la probabilité de défaillance tout au long de la durée de vie ;
- les probabilités de défaillance annuelles évaluées en considérant la variabilité climatique sont les plus importantes, d'où la nécessité de maîtriser les incertitudes liées au climat.

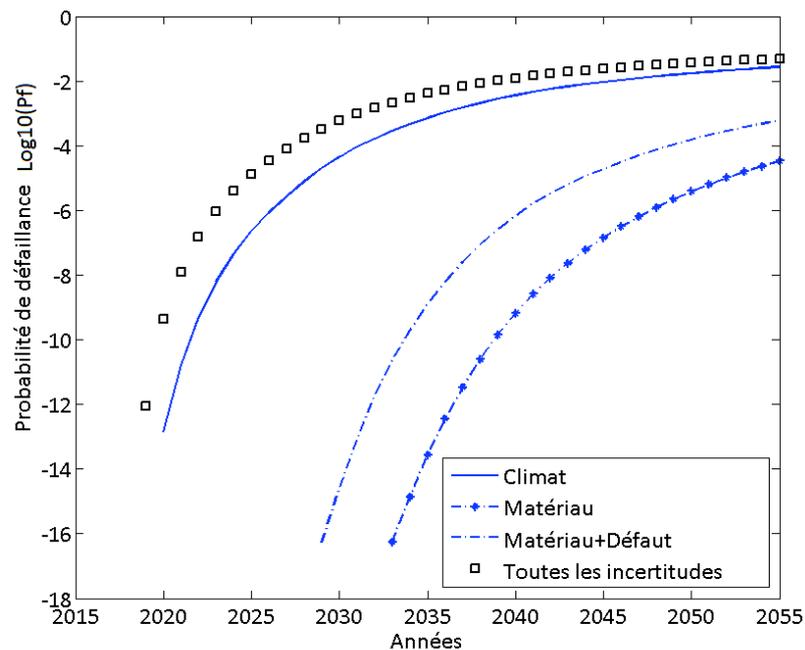


FIGURE 4.9: Probabilité de défaillance en fonction du type d'incertitude.

4.5 CONCLUSION

L'évolution du climat fait partie des paramètres les moins maîtrisés lors de la vision énergétique. Elle dépend de plusieurs facteurs incontrôlables liés à l'évolution démographique, technologique et économique, à l'évolution de l'intensité de l'activité humaine

(émissions de GES, etc). Au fil des années, l'incertitude sur la prévision climatique augmente, ce qui rend difficile le contrôle des consommations à long terme.

Dans ce chapitre, nous avons rappelé tout d'abord l'importance de considérer l'incertitude climatique lors de la simulation énergétique. Pour tenir compte de l'évolution avec le temps, nous avons comparé deux approches de modélisation de ce type d'incertitude. Les données météorologiques utilisées pour la simulation énergétique sont tout d'abord modélisées par des variables aléatoires avec un écart type linéairement croissant au cours du temps, et ensuite nous avons modélisé le climat par des processus stochastiques pour prendre en considération la dépendance du phénomène climatique.

En fonction du scénario climatique adopté, la consommation énergétique est estimée selon ces deux approches, où nous avons constaté que même si l'approche par processus stochastique fournissait des probabilités de défaillance plus réalistes, un manque de données vis-à-vis de la longueur d'autocorrélation ne nous permettait pas de valider les résultats. L'approche considérant les données météorologiques comme variables aléatoires indépendantes permettrait toutefois de définir une borne supérieure de la probabilité de défaillance.

Enfin, une étude comparative est ensuite menée pour identifier l'impact de chaque type d'incertitude sur la performance énergétique. Elle a permis de montrer l'impact prééminent de la variabilité associée au scénario climatique.

CHAPITRE V

OPTIMISATION DE LA CONCEPTION

5.1 INTRODUCTION

Nous avons montré dans les chapitres précédents que la variabilité du climat et de la mise en œuvre pouvait significativement affecter la fiabilité de la performance énergétique. Dans ce chapitre, nous considérons la méthodologie de conception elle-même. Une nouvelle formulation de la conception est proposée sur la base de la théorie de la fiabilité. Dans cette formulation, la conception optimale tient compte en plus des différents types d'incertitudes, de l'exigence du maître d'ouvrage vis-à-vis du niveau de la performance économique, énergétique et environnementale.

Par ailleurs, une nouvelle formulation de coût est proposée en considérant, non seulement les coûts conventionnels liés à l'énergie et l'investissement, mais aussi des coûts associés aux critères sociaux et environnementaux en relation avec l'isolation. Cette formulation fournit une évaluation plus réaliste des coûts de l'isolation, et permet d'améliorer le processus de décision vis-à-vis du choix de la conception.

5.2 ÉPAISSEUR ÉCONOMIQUE

En fonction de la performance du matériau utilisé pour l'isolation, une épaisseur doit être choisie de manière à satisfaire les exigences réglementaires relatives à la région géographique. Le concept d'*épaisseur économique* considère le coût initial du système d'isolation et l'économie d'énergie sur la durée de vie espérée. Cette valeur économique correspond au coût minimum sur tout le cycle de vie.

Il est bien connu que la transmission de chaleur diminue avec l'épaisseur d'isolation adoptée. Le choix le plus évident tendrait à adopter le matériau ayant la plus petite conductivité thermique associée à la plus grande épaisseur que le propriétaire pourrait se permettre de financer. Cependant, le taux de diminution de la consommation énergétique baisse rapidement avec l'épaisseur alors que le coût de l'isolation augmente linéairement en fonction de la quantité de matériau (Figure 5.1). Il existe alors un certain point au-delà duquel le gain en consommation énergétique n'est plus compensé par le coût supplémentaire du matériau et de son installation. En d'autres termes, il existe une épaisseur d'isolation optimale à laquelle le coût total d'investissement et de consommation serait minimal [122].

Dans toute l'Europe, l'évolution des réglementations a entraîné l'augmentation des épaisseurs utilisées au cours du temps. La figure 5.2 présente l'évolution des épaisseurs requises par pays entre 1982 et 1999. Il est intéressant de noter que dans certains pays,

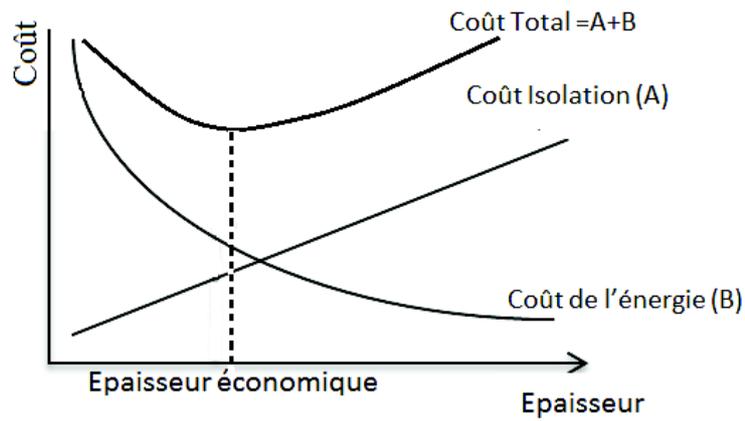


FIGURE 5.1: Épaisseur économique du matériau d'isolation.

notamment au nord de l'Europe, les exigences ont presque doublées en quinze ans, tandis que dans d'autres pays comme l'Italie ou la Belgique, les exigences sont restées inchangées.

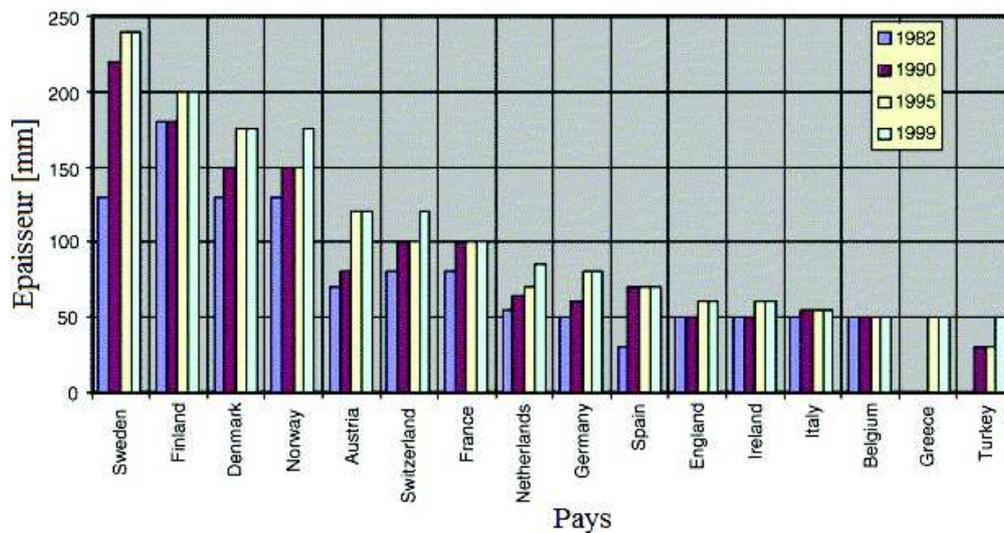


FIGURE 5.2: Evolution de l'épaisseur d'isolation typique des façades en Europe [123].

Dans la littérature, de nombreuses études s'intéressent à l'épaisseur économique à utiliser pour l'isolation et soulignent l'impact de différents facteurs sur la valeur de l'épaisseur économique à adopter, notamment :

- le type du bâtiment,
- sa fonction,
- son orientation [124, 125],
- sa forme [13],
- les matériaux de construction choisis,
- les conditions climatiques [13, 77, 126],
- les matériaux d'isolation et leurs caractéristiques [40, 124, 127],

- le type de combustible utilisé et son coût [41, 43, 66],
- le type et l'efficacité du système de climatisation [128].

Dans la plupart des études, les calculs effectués pour déterminer l'épaisseur d'isolation ont pour arguments, les charges de chauffage et de refroidissement, la durée de vie et les taux d'inflation et d'escompte. La majorité des études portent sur les matériaux d'isolation les plus utilisés en construction, à savoir les matériaux fibreux inorganiques (LDV, LDR) et les mousses organiques (EPS, Polystyrène extrudé (XPS)), qui représentent 60% et 27%, respectivement du marché de l'isolation [46].

Dans le cas particulier de l'isolation des façades, la plupart des travaux de recherche se basent sur le concept de l'épaisseur économique pour réduire l'usage de l'énergie et les émissions de GES [39, 42, 43]. Nous distinguons différents axes de recherche :

1. L'étude de l'impact de l'épaisseur économique sur la demande énergétique [13, 129]. Nous trouvons également des études qui évaluent en plus de la demande énergétique, l'impact sur l'environnement en termes d'émissions annuelles de CO₂ et SO₂ [39].
2. La détermination des épaisseurs optimales pour l'isolation des façades en fonction de différentes conditions climatiques [129, 130].
3. La détermination des épaisseurs optimales en fonction du matériau utilisé. A titre d'exemple, l'étude très complète proposée par Yu et al. (2009) [40] propose de comparer les épaisseurs optimales obtenues pour cinq types d'isolants (polystyrène expansé, polystyrène extrudé, mousse de polyuréthane, perlite et des mousses de chlorure de polyvinyle), dans le cas de quatre régions dans différentes zones climatiques de Chine. En termes de résultats, les épaisseurs obtenues varient beaucoup d'une région à l'autre, en fonction du climat de la région, de l'orientation du bâtiment et de la couleur de la façade. Par ailleurs, le polystyrène expansé a été le plus économique durant sa durée de vie et possède la plus faible période de retour sur investissement.
4. L'étude de l'influence de la position de la couche d'isolation sur la performance énergétique, soit en considérant qu'une seule couche d'isolation à différentes positions dans le mur [131], soit en découpant la couche d'isolation en plusieurs couches plus fines qui seraient distribuées dans le mur [132]. L'étude réalisée par Asan (2000) [133] a montré l'impact de la position de l'isolation dans le mur sur le décalage dans le temps des transferts de chaleur et les facteurs d'amortissement.

Alors que la littérature est assez vaste dans ce domaine, toutes les études sont basées sur des analyses déterministes qui ne considèrent pas les incertitudes liées aux paramètres d'entrée des modèles de simulation.

5.3 OPTIMISATION DE L'ÉPAISSEUR D'ISOLATION

Le meilleur dimensionnement doit pouvoir satisfaire un certain nombre de critères, tels que le coût, la fiabilité, la performance, la durabilité et la faisabilité. L'optimisation doit ainsi pouvoir concilier des exigences contradictoires.

5.3.1 Formulation du problème d'optimisation

L'optimisation est formulée par la recherche des paramètres de conception, qui minimisent une certaine fonction objectif et qui vérifient les contraintes de performances physiques, mécaniques et géométriques [31]. Le problème d'optimisation s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \min & C_{\text{tot}}(d) \\ \text{sous} & G_i(d, p) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \\ & h_j(d) \geq 0 \quad j = m + 1, \dots, n_h \end{cases} \quad (5.1)$$

où C_{tot} est la fonction objectif ou la fonction coût, d est le vecteur des variables d'optimisation, appelées aussi variables de décision, qui peuvent être des dimensions géométriques telles que l'épaisseur, des caractéristiques physiques et des paramètres contrôlant les propriétés de l'isolation, p est le vecteur des paramètres déterministes de l'isolation (i.e. propriétés thermo-physiques des matériaux, type de combustible utilisé, etc.), G_i sont les fonctions de performance appelées aussi règles de dimensionnement, et les h_j sont les fonctions de faisabilité géométrique et physique (bornes inférieures et supérieures des variables d'optimisation d).

Dans la littérature, la plupart des études d'optimisation de l'isolation utilisent une fonction objectif C_{tot} (5.1) qui n'est composée que des investissements, des frais courants et des recettes dues à l'énergie vendue [39, 43, 58].

5.3.2 Modèles de coût total

La méthode la plus utilisée pour le calcul du coût total du système d'isolation consiste en l'analyse du Coût du Cycle de Vie. Conventionnellement, le coût total tient compte du coût d'investissement C_{inv} , du coût lié à la consommation énergétique C_{enr} et éventuellement du coût d'exploitation et de maintenance [43, 64, 122]. Dans ce sens, la formulation classique du coût total est la suivante :

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{ad}} + C_{\text{enr}} \quad (5.2)$$

où C_{ad} est le coût additionnel lié à l'installation de l'isolation. En détaillant chaque terme nous obtenons :

$$C_{\text{tot}} = ep C_{\text{ins}} + C_{\text{ad}} + C_e E_c \text{ PWF} \quad (5.3)$$

où ep est l'épaisseur de l'isolation, C_{ins} est le coût du matériau d'isolation par unité de volume, C_e est le coût unitaire de l'énergie (e/kWh), E_c est la consommation énergétique annuelle (kWh), PWF^1 est le facteur d'actualisation, qui permet de ramener le montant des consommations énergétiques à sa valeur actuelle qui dépend du taux d'inflation i_r et du taux d'actualisation d_r comme suit [43, 122] :

$$\begin{cases} \text{PWF} = \left(\frac{1+i_r}{d_r-i_r} \right) \left[1 - \left(\frac{1+i_r}{1+d_r} \right)^{n_{\text{DDV}}} \right] & \text{si } d_r \neq i_r \\ \text{PWF} = \frac{n_{\text{DDV}}}{1+d_r} & \text{si } d_r = i_r \end{cases} \quad (5.4)$$

¹ PWF : Present Worth Factor

Cette méthode a été utilisée par de nombreux auteurs pour définir les niveaux optimaux de performance [43, 64, 122, 134, 135, 136]. A partir des expressions (5.4) et (5.3), nous observons que l'épaisseur économique dépend de la quantité de matériau utilisée, du coût de l'énergie, de la durée de vie de l'isolant, de l'efficacité du système de chauffage et de refroidissement et des taux d'inflation et d'actualisation.

Certains auteurs ont voulu tenir compte en plus de ces facteurs, la vapeur condensée dans le bâtiment. Ils ont utilisé pour cela des calculs dits thermo-économiques ou exergo-économiques. La méthode d'optimisation considère ainsi la fonction objectif (5.2), avec le coût lié à l'énergie calculé par l'expression [43, 137, 138] :

$$C_{\text{enr}} = C_f \frac{Ex_{\text{perte,Q}} + Ex_d}{Ex_F - Ex_{\text{perte,S}}} \quad (5.5)$$

où C_f est le coût unitaire du combustible (€/kg), $Ex_{\text{pertes,Q}}$ est la perte d'exergie² due au transfert thermique, Ex_d est la destruction d'exergie³ due à la condensation de vapeur, Ex_F est l'exergie du combustible, $Ex_{\text{perte,S}}$ est la perte d'exergie due aux gaz de combustion, déterminée en appliquant les deux lois de la thermodynamique à un processus de combustion complet. Les autres équations d'exergie sont données comme suit :

$$Ex_{\text{perte,Q}} = \frac{86,4 \text{ DJU}}{(R + \frac{ep}{\lambda})\eta} \quad (5.6)$$

$$Ex_d = m_c [(h_i - h_e) - T_e (s_i - s_e)] \quad (5.7)$$

$$Ex_F = (1 - \frac{T_{rt}}{T_{cc}}) Q_f \quad (5.8)$$

où m_c est le taux massique de condensation, h_i et h_e sont les enthalpies [kJ/kg] de l'environnement intérieure et extérieure, respectivement, T_e , T_{cc} et T_{rt} sont les températures de l'espace extérieur, de l'espace de combustion et du circuit de chauffe, s_i s_e sont les entropies intérieure et extérieure, respectivement, Q_f est la teneur énergétique du combustible.

Pour déterminer l'épaisseur optimale, il existe d'autres modèles économiques, tel que le modèle basé sur la période de revient, qui représente la période d'amortissement de l'investissement qui consiste à estimer la période de retour sur investissement en utilisant une épaisseur spécifique en la comparant à une épaisseur de référence. L'épaisseur de référence peut être imposée à zéro de sorte que la période de retour sur investissement est comparée à des conditions où il n'y a pas d'isolation [43].

Par ailleurs, certains travaux utilisent la méthode "P₁ - P₂" [41, 43, 66, 139] qui permet de calculer les économies nettes d'énergie. La valeur P₁ représente l'énergie consommée lors du cycle de vie, qui est une fonction du taux d'actualisation et d'inflation ainsi que de la DDV. Elle est calculée comme suit :

$$P_1 = \sum_{j=1}^{DDV} \frac{(1+i)^{(j-1)}}{(1+d)^j} \quad (5.9)$$

2 Les pertes d'exergie [kJ/m²] sont produites par l'exergie du combustible. La chaleur se transfère d'un espace chaud à un espace froid. Les pertes de chaleur produites lors de ce transfert de chaleur induisent des pertes d'exergie.

3 La destruction d'exergie est provoquée par le mouvement de l'air des endroits à haute pression vers les endroits à basse pression.

Tandis que P_2 représente le ratio des dépenses encourues pendant le cycle de vie, calculé par :

$$P_2 = D + (1 - D)P_1 + M_s P_1 - \frac{R_v}{(1 + d)^{DDV}} \quad (5.10)$$

où D est le ratio de l'acompte sur l'investissement initial, M_s est le ratio des coûts divers de la première année sur l'investissement initial, R_v est le ratio entre la valeur de revente, à la fin de la période économique, et l'investissement initial. Cette méthode est généralement utilisée pour montrer l'effet du prix de l'énergie sur le coût global dans la DDV du système.

Il est également possible de calculer l'épaisseur optimale de l'isolation en dérivant l'équation du coût total en considérant les coûts liés au chauffage C_C et au refroidissement C_R , respectivement. Ces derniers sont calculés grâce au concept des Degree-jours, comme suit :

$$C_C = C_{ins} ep + \frac{86400 \text{ DJC } C_f \text{ PWF}}{(R + \frac{ep}{\lambda}) H_u \eta} \quad (5.11)$$

et le coût lié aux besoins de refroidissement C_R sont :

$$C_R = C_{ins} ep + \frac{86400 \text{ DJR } C_f \text{ PWF}}{(R + \frac{ep}{\lambda}) \text{COP}} \quad (5.12)$$

où H_u est la valeur calorifique du combustible, η est l'efficacité du système de chauffage et COP est le coefficient de performance du système de refroidissement. La dérivée de l'équation du coût total, représentant la somme des coûts (5.11) et (5.12), est mise égale à zéro. L'épaisseur optimal (ep_{opt}) est alors obtenue comme suit [43, 140] :

$$ep_{opt} = \left(\frac{86400 \text{ PWF} \left(\frac{C_e \text{ DJC}}{\eta H_u} + \frac{C_e \text{ DJR}}{\text{COP}} \right) \lambda}{C_{ins}} \right)^{\frac{1}{2}} - R \lambda \quad (5.13)$$

Comme nous pouvons le constater, c'est souvent la logique de rentabilité financière qui détermine l'épaisseur d'isolant à mettre en place. Si une logique de rentabilité écologique était prise en compte, la lutte contre le CO_2 nous pousserait vers une isolation bien plus importante où dans le cas échéant, à un choix différent de matériaux à utiliser.

5.4 INTÉGRATION DES COÛTS INDIRECTS

Alors que la fonction objectif (5.3) est largement utilisée, il semblerait que l'isolation thermique dans un bâtiment affecte d'autres paramètres liés à l'environnement et à d'autres facteurs socio-économiques tels que l'espace de vie et le confort. La non prise en compte de ces paramètres peut engendrer des sur-coûts à court et à long termes.

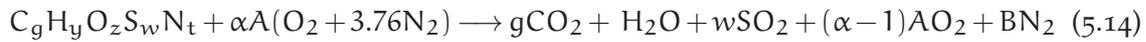
Par conséquent, nous proposons un nouveau modèle de coût permettant de répondre aux besoins de conception, en considérant trois coûts additionnels liés à la pollution, l'espace de vie occupé et le confort des habitants.

5.4.1 Impact Environnemental

La production et la consommation d'énergie sont responsables d'émission de CO₂ et de particules qui contribuent à la baisse rapide de la qualité de l'air dans les villes. Des études telles que celle de Quah and Boon (2003) [141] ont rapporté que le risque de décès prématurés dans les zones hautement polluées était 26% plus élevé que dans les zones moins polluées. Pour cette raison, une taxe de carbone est imposée depuis peu aux gros secteurs polluants pour les amener à réduire leur consommation énergétique.

La valeur de cette taxe de carbone varie d'un pays à l'autre. Elle dépend de l'énergie fossile utilisée et de la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère. A l'heure actuelle, le secteur du bâtiment n'est pas encore concerné et seuls les industriels sont obligés de payer cette taxe. Toutefois, comme le secteur du bâtiment est l'un des plus gros secteurs polluant, intégrer ce coût dans la fonction objectif permet d'intégrer une logique écologique en plus de l'objectif de rentabilité économique initial.

Ozel (2012) [122] et Dombayci (2007) [39] ont détaillé la fonction reliant la consommation à la pollution. La formulation chimique décrit la combustion :



où A et B sont obtenues à partir des formules du bilan d'oxygène. Dans l'équation (5.14), le taux de CO₂ émis par la combustion d'un kg de combustible peut être calculé comme suit :

$$M_{CO_2} = \frac{44g E_C}{M H_u} \quad (5.15)$$

où g est la quantité de carbone, M est le nombre de moles⁴ de combustible, H_u est la valeur calorifique et E_C est la consommation totale annuelle. Nous proposons ainsi d'intégrer le coût relatif à l'impact environnemental comme suit :

$$C_{CO_2} = \begin{cases} E_C \times C_{taxe/kWh} \\ \text{ou :} \\ M_{CO_2} \times C_{taxe/tonne} \end{cases} \quad (5.16)$$

où C_{CO₂} est le coût lié à la pollution, E_C est la consommation énergétique totale, et C_{taxe/kWh} est la valeur de la taxe de carbone fournie par kWh d'énergie consommée. Nous pouvons également utiliser la valeur de la taxe de carbone C_{taxe/tonne} estimée par tonne de CO₂ émise, avec M_{CO₂} la quantité de CO₂ émise dans l'air, déterminée grâce à l'équation (5.15).

5.4.2 Confort thermique

Alors que l'isolation doit être amortie par les frais d'exploitation, elle doit également assurer le confort thermique de l'occupant, pour répondre aux besoins sociétaux. Ce confort représente une préoccupation sociétale puisqu'il s'agit d'un indicateur de la qualité de vie du citoyen. En pratique, les réglementations actuelles ont du mal à qualifier le confort des occupants. C'est tout le paradoxe de l'isolation qui tente d'adapter à des critères techniques, une perception subjective telle que le confort.

⁴ Une mole est la quantité de matière contenant 6.02×10^{23} entités (molécules, atomes ou ions).

Dans la littérature, le confort thermique, défini dans le chapitre 1 (sous-section 1.4.5), a été étudié dans le but d'élaborer des modèles, des indices et des normes [25, 142]. L'actuelle norme relative au confort thermique ISO7730 se base sur le modèle *Fanger-PMV-PPD* (1.19) qui est largement utilisé et accepté par la communauté du bâtiment pour l'évaluation du confort thermique. Il permet de définir trois zones de confort comme l'indique le tableau 5.1.

L'avantage d'utiliser cet indice réside dans le fait que le calcul du vote moyen prévisible PMV est basé sur l'équation du bilan thermique complet (i.e. quand le bilan thermique est nul, la thermoneutralité sensorielle est garantie). Pour l'établissement d'une condition jugée en moyenne thermoneutre, il suffit d'utiliser cet outil (PMV) et d'y appliquer les paramètres d'ambiance ou de les ajuster jusqu'à ce que le PMV soit minimal, pour s'assurer de la thermoneutralité sensorielle [26].

Zone de confort	PPD	bornes du PMV	Environnement
Zone 1	< 6	$-0,2 < PMV < 0,2$	Légèrement Chaud/Froid
Zone 2	< 10	$-0,5 < PMV < 0,5$	Moyenne chaud/Froid
Zone 3	< 15	$-0,7 < PMV < 0,7$	Chaud/Froid

Tableau 5.1: Zones de confort en se basant sur l'indice PPD proposé par *Fanger-ISO7730* [26].

Il existe un autre modèle dans la littérature, qui est également très utilisé. Le résultat de ce modèle n'est pas donné en termes de sensation, mais en terme de risque d'inconfort. Il s'appuie sur deux principes essentiels :

- pour un métabolisme donné et pour un isolement thermique connu, il existe une distribution idéale des températures locales, telle que le bilan thermique global soit nul ; ainsi, à $PMV = 0$, on obtient une distribution de température qui ne génère pas d'inconfort.
- les températures de peau varient du fait des échanges imposés par l'environnement thermique.

Par analogie avec les probabilités, le résultat final est donné en **indice de risque d'inconfort - IRI** en % :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Zone 1 : } IRI < 80\% & \text{a priori, pas de risque d'inconfort;} \\ \text{Zone 2 : } 80 \leq IRI \leq 100\% & \text{le risque d'inconfort n'est pas négligeable;} \\ \text{Zone 3 : } IRI > 100\% & \text{l'inconfort sera déclaré.} \end{array} \right. \quad (5.17)$$

Quel que soit le modèle utilisé, nous proposons de considérer un coût lié au risque d'inconfort, en fonction de la zone où l'on se trouve. A titre d'exemple, si l'indice IRI d'un logement est estimé à $IRI < 80\%$, on peut considérer que l'épaisseur d'isolation adoptée est satisfaisante. Toutefois, si l'IRI est supérieur à 80% des surconsommations énergétiques sont attendues, parce que la sensation d'inconfort va induire des besoins en chauffage ou en refroidissement additionnels. L'épaisseur d'isolation utilisée est alors considérée insuffisante.

Ainsi, en fonction de la zone d'inconfort considérée, un certain coût énergétique supplémentaire est à prévoir. Pour estimer ce coût par zone, nous proposons d'associer à chaque zone une épaisseur d'isolation additionnelle nécessaire à assurer la thermoneutralité sensorielle. Ces épaisseurs dépendent de la région climatique et seraient basées sur le jugement d'experts ou sur des analyses de sensibilité. A titre d'exemple, pour la région de Clermont-Ferrand, on estime que l'épaisseur d'isolation typique de $e_p = 10$ cm fournit un indice d'inconfort $80 \leq \text{IRI} \leq 100\%$, et que pour atteindre la zone 1, $\Delta e_p = 2$ cm d'isolation en plus serait nécessaire, pour éviter d'avoir des surconsommations énergétiques. Par conséquent, pour calculer le coût lié à l'inconfort, nous calculons la consommation énergétique relative à Δe_p , qui va représenter les besoins énergétiques additionnels requis pour atteindre un $\text{IRI} < 80\%$.

$$C_{\text{Conf}} = \begin{cases} C_e \times (E_C(\text{Z1}) - E_C(\text{Z2})) \times \text{PWF} \\ \text{avec :} \\ E_C(\text{Z1}) = \left(\frac{86400 \left(\frac{\lambda}{e_p + \Delta e_p} \right) \text{DJC}}{\eta_s \text{Hu}} \right) + \left(\frac{86400 \left(\frac{\lambda}{e_p + \Delta e_p} \right) \text{DJR}}{\text{COP Hu}} \right) \\ E_C(\text{Z2}) = \left(\frac{86400 \left(\frac{\lambda}{e_p} \right) \text{DJC}}{\eta_s \text{Hu}} \right) + \left(\frac{86400 \left(\frac{\lambda}{e_p} \right) \text{DJR}}{\text{COP Hu}} \right) \end{cases} \quad (5.18)$$

En résumé, le coût du confort C_{Conf} correspond au coût de la consommation énergétique additionnelle nécessaire pour atteindre la zone de confort.

5.4.3 Perte en surface d'habitation

Améliorer les performances énergétiques d'un logement influence fortement le prix de vente. En général, les vendeurs de logements énergivores doivent concéder à quelques rabais par rapport à ce qui se fait le plus fréquemment en termes de performance énergétique. A l'opposé, les biens immobiliers qui sont plus performants que la moyenne peuvent rapidement prendre jusqu'à 30% de leur valeur [143].

D'un autre côté, l'isolation provoque une perte en surface d'habitation qui représente un coût non négligeable. Ce paramètre n'intervient que financièrement, contrairement aux coûts présentés ci-dessus qui ont un impact certain sur la qualité de vie. Ce coût intervient principalement lors de la vente du logement et uniquement dans le cas des logements isolés par l'intérieur.

L'AIE estime que l'isolation par l'extérieur est deux fois plus performante que l'isolation par l'intérieur [144] alors que les professionnels estiment que 90% des propriétaires préfèrent isoler par l'intérieur pour des raisons pratiques et financières. En France, l'isolation par l'intérieur est largement préférée car elle n'interfère pas avec la façade extérieure et est généralement associée à de faibles coûts d'installation. Le CSTB affirme qu'en moyenne 7% de la surface habitable est perdue par l'isolation de l'intérieur. Kolaitis et al. (2013) [145] estime des pertes allant de 5 à 15 cm par mur en fonction de la région.

A la revente du logement, ce coût paraît comme une perte économique importante, puisque la surface du logement est réduite par l'isolation. Ceci nous amène à le considérer lors de l'évaluation du coût total de l'isolation sur sa durée de vie. Par conséquent,

nous considérons ce coût proportionnel à la surface perdue selon la valeur du logement :

$$C_P = \left(\frac{ep L_{ins}}{A} \right) \times C_{m^2/logt} \quad (5.19)$$

où C_P représente la perte en valeur du logement, qui dépend de l'épaisseur de l'isolation ep , de la longueur du mur $L = 1$ m, de la surface d'habitation affectée A (1 m^2) et de la valeur du m^2 dépendant de la région. Le tableau 5.2 donne le prix du m^2 pour huit villes Françaises.

Ville	$C_{m^2/logt}$ pour 1 m^2 Appartement	$C_{m^2/logt}$ pour 1 m^2 Maison individuelle
Paris	7748 €	7847 €
Nantes	2586 €	2831 €
Lyon	3194 €	3542 €
Nice	3765 €	4420 €
Clermont Ferrand	1693 €	1413 €
Strasbourg	2517 €	2602 €
Lille	2558 €	2047 €
Marseille	2437 €	3088 €

Tableau 5.2: Prix de l'immobilier au m^2 pour différentes villes de France [146].

5.4.4 Formulation de la nouvelle fonction objectif

La nouvelle formulation de la fonction objectif additionne les coûts présentés ci-dessus à la formulation classique du coût total, afin de fournir une meilleure estimation du coût total de l'isolation sur sa durée de vie. Notre modèle prend alors la forme suivante [147] :

$$C_{tot} = C_{inv} + C_{ad} + C_{enr} + C_{Conf} + C_{CO_2} + C_P \quad (5.20)$$

où C_{inv} est le prix de l'isolation utilisée, C_{ad} est le coût de pose et d'installation, qui dépend de la quantité d'isolation à poser (i.e. plus l'épaisseur à installer est importante, plus le temps et la technique de pose sont significatifs), C_{enr} est le coût de l'énergie, C_{Conf} est le coût additionnel pour atteindre le confort thermique, C_{CO_2} est le coût lié à la pollution et C_P est le coût lié à la perte en surface d'habitation.

Une pose d'isolation importante nécessiterait un investissement important et une perte conséquente en surface d'habitation mais elle limiterait en contre partie les dépenses énergétiques et les dégradations environnementales. Au contraire, une faible isolation induirait de possibles zones d'inconfort et moins de bénéfices pendant la phase d'exploitation. Cette formulation permet d'intégrer les coûts indirects pour une estimation plus réaliste du coût total de l'isolation tout au long de sa durée de vie.

5.5 CONCEPTION BASÉE SUR LA FIABILITÉ

La méthode d'optimisation déterministe permet d'obtenir l'épaisseur d'isolation économique. Néanmoins, la performance, le coût de revient ainsi que la période de recouvrement de l'investissement ne peuvent pas être garantis, en raison de la présence d'incertitudes sur le matériau, la mise en œuvre et le climat. Il est par conséquent indispensable de considérer l'incertitude sur les données d'entrée pour étudier leur impact sur les résultats de simulation en sortie et ainsi sur les décisions qui en découlent.

Pour des conceptions plus réalistes, nous proposons d'utiliser une méthodologie d'optimisation basée sur la fiabilité (RBDO - Reliability-based design optimization) [31, 147, 148]. Cette optimisation consiste à trouver la valeur de l'épaisseur qui minimise le coût total sous contrainte de fiabilité.

La formulation mathématique de l'optimisation basée sur la fiabilité s'écrit :

$$\begin{cases} \min & E[C_{\text{tot}}(d, p, X)] \\ \text{sous} & P_f(d, X) \leq P_{f0} \\ & G_j(d) \geq 0 \quad j = 1, \dots, m \end{cases} \quad (5.21)$$

où $E[\cdot]$ représente l'opérateur d'espérance mathématique, C_{tot} représente la fonction objectif, d est le vecteur des variables de conception, X est le vecteur des variables aléatoires, p est le vecteur des paramètres déterministes de l'isolation, P_f est la probabilité de défaillance de l'isolation, P_{f0} est la probabilité de défaillance maximum à ne pas dépasser, et G_i sont les contraintes déterministes.

Les facteurs socio-économiques et environnementaux sont considérés à travers l'utilisation de la nouvelle formulation de coût (5.20), et la contrainte de fiabilité permet de vérifier que la fiabilité de l'isolation reste inférieure à l'exigence minimum de fiabilité en dépit des différentes incertitudes.

La valeur de P_{f0} représente le risque maximum acceptable par le propriétaire ou le maître d'ouvrage. En fiabilité structurale des constructions civiles, des valeurs de probabilité de défaillance (P_{f0}) sont proposées selon certaines situations en construction. Elles nous indiquent l'ordre de grandeur des probabilités cibles (Tableau 4.3). Toutefois, en thermique du bâtiment les risques étant moins importants, les probabilités de défaillance admissibles peuvent être moins exigeantes.

L'organigramme présenté sur la figure 5.3 montre les différentes étapes de l'optimisation. La première étape consiste à identifier les paramètres de conception ; nous nous intéressons ici à l'épaisseur de l'isolation. La deuxième étape consiste à collecter les informations disponibles sur les données du modèle de simulation. Cette étape est la plus importante mais aussi la plus délicate, car c'est à l'issue de cette étape que les modèles probabilistes sont définis.

La procédure d'optimisation permet ensuite de trouver le meilleur compromis entre les différents coûts. L'analyse de fiabilité est ensuite lancée pour vérifier la fiabilité de l'isolation à l'optimum proposé ; si P_f est inférieure à la probabilité admissible P_{f0} alors la solution est acceptée, sinon la solution optimale doit correspondre à l'épaisseur assurant la fiabilité minimale exigée (Figure 5.4).

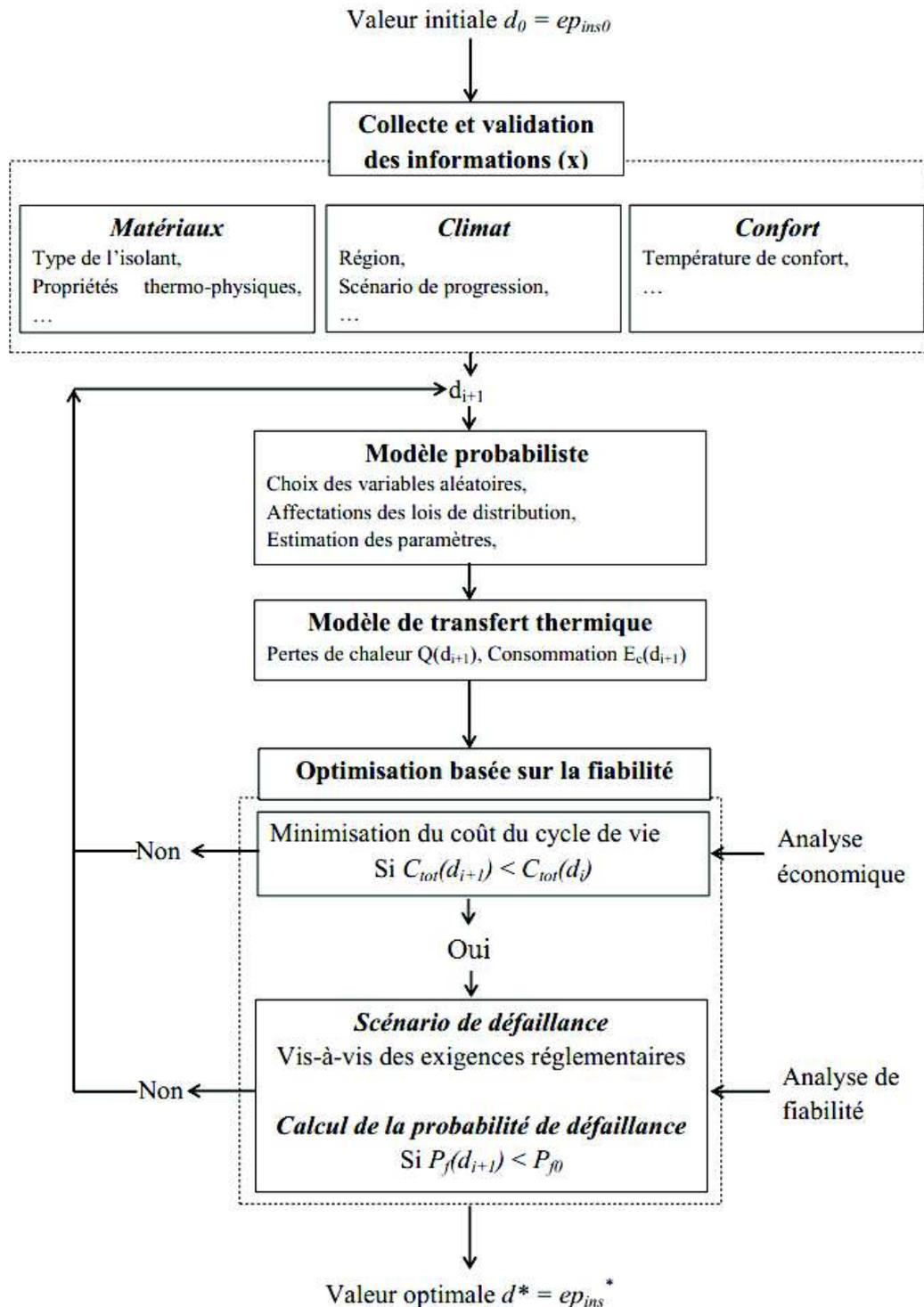


FIGURE 5.3: Vue globale modulaire de l'approche utilisée pour la conception.

L'avantage de cette formulation est qu'elle permet de maîtriser l'influence des incertitudes sur le coût total. En d'autres termes, elle permet de piloter la recherche de l'optimum par le contrôle des variables dont l'impact sur le coût total est significatif ; les variables présentant de grandes incertitudes sont pénalisées indépendamment de leur rôle physique.

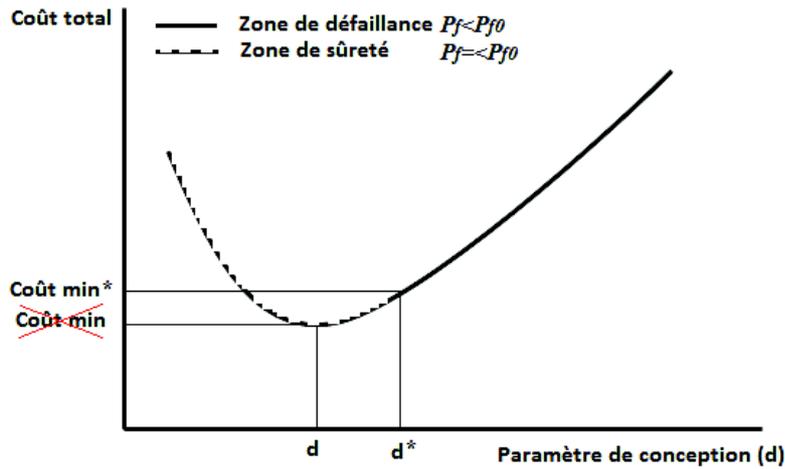


FIGURE 5.4: Conception optimales avec ou sans contrainte de fiabilité.

5.6 ETUDE PARAMÉTRIQUE

La résolution du système d'optimisation présenté ci-dessus, fait intervenir de nombreux paramètres. Nous proposons dans cette section d'étudier tout d'abord, l'impact des incertitudes sur l'épaisseur optimale de l'isolant. Nous comparons ensuite l'impact du choix de la fonction objectif sur l'épaisseur optimale avant d'étudier le rôle de chaque coût indirect séparément.

5.6.1 Impact des incertitudes

Dans un premier temps, nous nous intéressons à quantifier l'effet des incertitudes sur l'épaisseur économique. Une étude paramétrique est menée pour montrer l'effet des différents degrés d'incertitude sur les résultats de simulation.

Considérons deux murs, l'un isolé par l'intérieur (ITI) et l'autre par l'extérieur (ETI) (Figure 5.5). Ces deux murs sont composés de 20 cm de parpaing, de 1,4 cm d'enduit extérieur et de 1,5 cm d'enduit intérieur. Pour l'isolation, nous utilisons de la laine de verre (Tableau 5.3).

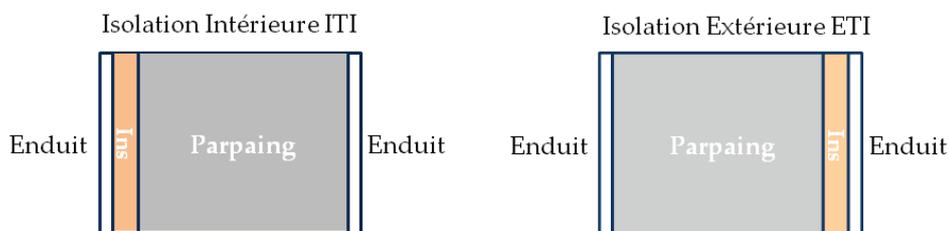


FIGURE 5.5: Agencement des différentes couches dans des murs isolés par l'intérieur (ITI) et par l'extérieur (ETI), respectivement.

Paramètre	Caractéristique		
Conductivités	$\lambda_{\text{Parpaing}}$	1,600 W/mK	Parpaing (0,2 m)
	λ_{Isolant}	0,044 W/mK	Laine de verre (ep)
	$\lambda_{\text{End,Int}}$	0,250 W/mK	Enduit intérieur (0,014 cm)
	$\lambda_{\text{End,Ext}}$	0,400 W/mK	Enduit extérieur (0,015 cm)
Caractéristiques systèmes	η	0,85	
	COP	3,5	
DJC	Nantes	2124,8 K	
	Clermont Ferrand	2488,6 K	
	Marseille	1343,2 K	
DJR	Nantes	101,5 K	
	Clermont Ferrand	119,8 K	
	Marseille	756,5 K	
DDV	20 ans		

Tableau 5.3: Paramètres associés aux matériaux, au climat et au système énergétique.

Dans un premier temps, pour illustrer l'impact du type d'isolation sur la performance énergétique, nous supposons que l'épaisseur de l'isolation est égale à 8 cm, la variabilité de la conductivité thermique du matériau est considérée selon une distribution lognormale. Pour différents coefficients de variation de la conductivité, nous présentons dans le tableau 5.4 les consommations énergétiques annuelles obtenues pour trois régions de France.

λ		C.V		5%		10%		15%		20%	
Région	E_C	μ	C.V(%)	μ	C.V(%)	μ	C.V (%)	μ	C.V (%)	μ	C.V (%)
Nantes	ITI	85,31	0,50	85,31	0,97	85,31	1,53	85,31	2,06		
	ETI	77,5	0,51	77,56	1,03	77,57	1,53	77,57	2,04		
Clermont-F	ITI	99,93	0,49	99,93	0,98	99,93	1,55	99,93	2,01		
	ETI	90,85	0,5	90,85	1,001	90,85	1,58	90,85	2,14		
Marseille	ITI	60,60	0,5	60,60	0,98	60,60	1,46	60,60	2,04		
	ETI	56,09	0,52	56,09	0,98	56,09	1,48	56,09	1,94		

Tableau 5.4: Impact du degré d'incertitude associé à λ sur la consommation énergétique annuelle ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$).

Sans surprise, nous constatons que les consommations sont nettement plus importantes dans les régions froides (Clermont-Ferrand et Nantes), tandis qu'elles sont plus faibles en région méditerranéenne quel que soit le type d'isolation. Les isolations par l'intérieur sont supposées consommer un peu plus que les isolations par l'extérieur en raison des différents PT, que nous supposons ici égaux à 10% [149].

Le type d'isolation joue un rôle très important et bien que le type d'isolation détermine en grande partie la performance de l'isolation, nous constatons que la consommation énergétique est affectée de la même manière par les incertitudes. A titre d'exemple,

dans le cas de la région nantaise, le coefficient de variation observée sur la consommation énergétique passe de 0,5% à 2% pour des incertitudes sur λ allant de 5% à 20%, quel que soit le type d'isolation considéré. Schématiquement, la figure 5.6 présente l'évolution de l'incertitude sur la consommation énergétique en fonction du coefficient de variation de la conductivité dans le cas d'un mur ETI, en région nantaise. La courbe centrale représente la consommation moyenne, qui reste quasiment constante quel que soit le degré d'incertitude étant donné que la valeur nominale de la conductivité est considérée constante.

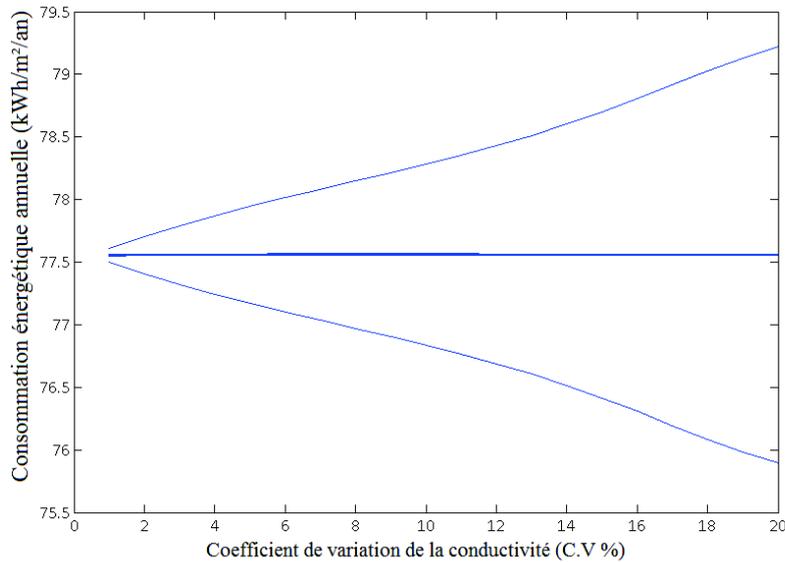


FIGURE 5.6: Dispersion de la consommation en fonction du coefficient de variation de λ .

Pour montrer l'impact des incertitudes sur l'épaisseur optimale, nous proposons de considérer l'isolation la plus pénalisante (ITI) dans le cas de la région la plus froide (Clermont-Ferrand). Le tableau 5.5 présente les épaisseurs optimales préconisées pour des probabilités de défaillance cibles $P_{f0} = 10^{-2}$ dans le cas où l'on considère une conductivité thermique à différents coefficients de variation. Nous pouvons constater que 5% d'incertitude sur la performance thermique de l'isolant nécessiterait 2,7% d'isolation de plus que l'épaisseur type (10 cm). Cependant, plus le degré d'incertitude augmente plus l'épaisseur optimale augmente. Par exemple, si 20% d'incertitude sur λ est attendue, l'épaisseur économique optimale permettant de vérifier les exigences de fiabilité, serait 42% plus importante que l'épaisseur typique, d'où l'importance de considérer les incertitudes lors du processus de décision.

C.V.	5%	10%	15%	20%
ep (cm)	10,3	11,5	12,8	14,2

Tableau 5.5: Épaisseur économique à adopter en fonction du degré d'incertitude sur la conductivité thermique.

5.6.2 Impact des coûts indirects

Dans ce qui suit, nous étudions l'impact des coûts indirect que nous proposons de considérer dans la nouvelle formulation de la fonction objectif. Le tableau 5.7 présente les coûts d'isolation obtenus en considérant d'une part la fonction objectif classique (5.3) et d'autre part la nouvelle formulation de la fonction objectif proposée en (5.20).

Coûts	Valeur	Unités	Ref	
C_{ins}	10	€/m ² pour ep = 10cm	Valeurs du marché	
$C_{installation}$	32,25	€ pour ep = 10cm	Valeurs du marché	
$C_{Maind'oeuvre}$	97,8	€ pour ep = 10cm	Valeurs du marché	
C_e	0,1202	€/kWh	[150]	
$C_{m^2/logt}$	Nantes	2586	€/m ²	[146]
	Clermont-F.	1693	€/m ²	[146]
	Marseille	2437	€/m ²	[146]
$C_{taxe/kWh}$	0,02	€/kWh	[150]	
DDV	20	ans		
i_r	3	%	[64]	
d_r	3	%	[64]	

Tableau 5.6: Données utilisées pour l'évaluation économique de la fonction objectif.

Pour un mur isolé avec 8 cm d'épaisseur, nous observons qu'en fonction de la région, lorsque nous utilisons la formulation économique classique, les coûts les plus élevés sont en toute logique obtenus en régions froides en raison du besoin en chauffage, qui est plus important. Cependant, la considération des coûts indirects montre des résultats différents. En effet, pour la même isolation, la région de Clermont-Ferrand (plus froide) reviendrait finalement moins chère qu'ailleurs. La raison en est que, le prix du m² à Clermont-Ferrand est nettement moins cher que dans les autres régions considérées.

Le type d'isolation considéré joue également un rôle significatif sur le coût total de l'isolation. A titre d'exemple, à Nantes, la nouvelle formulation donne un coût de l'isolation par l'intérieur 86% plus cher que la formulation classique alors que, l'ETI est seulement 12% plus cher. Ceci est dû au fait que l'isolation par l'intérieur est associée à des risques d'inconfort et à des pertes en espace de vie mais aussi à des pertes de chaleur par PT, qui induisent des sur-consommations énergétiques et de ce fait plus de pollution. A l'opposé, l'isolation par l'extérieur n'induit pas de pertes par PT et implique donc moins de consommation énergétique, moins de pollution et aucune perte en surface d'habitation. La figure 5.7 présente la portion de chaque coût dans la fonction du coût total de l'isolation. Les coûts représentés en bleu foncé (C_{ad}) représentent la somme de tous les coûts liés à l'achat des matériaux de construction, à l'achat des matériaux d'isolation, au prix de la pose et au prix de la mise en oeuvre. Ainsi, nous pouvons mieux observer l'impact des coûts indirects en fonction de la région où est construit le bâtiment. Nous remarquons tout d'abord, que le coût le plus influent est la perte en surface d'habitation, notamment, dans les régions où le prix du m² est important telles que Nantes ou

	Type d'Isolation	Coût Classique €/m ² /20ans	Coût-nouvelle formulation €/m ² /20ans
Nantes	ITI	294,20	547,26
	ETI	352,76	395,67
Clermont Ferrand	ITI	312,14	495,35
	ETI	369,46	413,85
Marseille	ITI	263,83	504,44
	ETI	324,55	366,96

Tableau 5.7: Comparaison entre les coûts d'isolation en fonction de la formulation économique utilisée.

Marseille. Le coût lié à la pollution et au confort sont bien évidemment observés dans les régions les plus froides, car elles nécessitent plus d'énergie pour atteindre la zone de confort, induisant automatiquement beaucoup plus d'émissions. Comme prévu, les prix liés à la consommation énergétique sont plus importants en régions froides. Pour

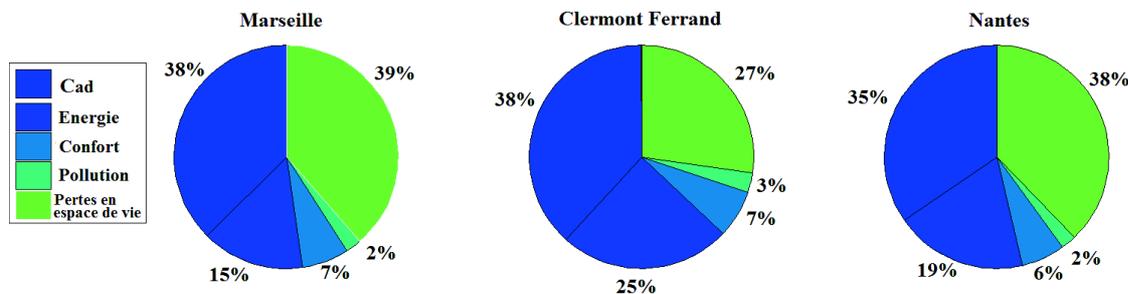


FIGURE 5.7: Décomposition du coût total en considérant la nouvelle formulation par région.

avoir une idée sur le temps de retour sur investissement, le tableau 5.8 donne les différentes périodes pour amortir l'investissement dans le cas d'une isolation par l'intérieur. Les résultats obtenus en considérant uniquement les coûts conventionnels concordent avec les prévisions des acteurs du bâtiment, qui l'estiment à 5 ans environ. Toutefois, la considération des coûts indirects fait quasiment doubler les périodes d'amortissement. Par ailleurs, nous pouvons constater qu'en région nantaise, la période d'amortissement est la plus importante suivie de celle obtenue pour Marseille. La raison est que ces deux régions sont associées à des prix de logement importants.

Période de récupération	ITI	
	Classique	Nouveau modèle
Nantes	4	11
Clermont Ferrand	4	9
Marseille	4	10

Tableau 5.8: Périodes de récupération (années) en fonction des coûts estimés.

5.6.3 Impact de l'exigence de fiabilité P_{f0}

Pour illustrer l'impact de la contrainte de fiabilité sur l'épaisseur optimale, nous proposons d'évaluer l'épaisseur économique pour différents niveaux de fiabilité cible. Le tableau 5.9 présente les résultats obtenus dans le cas d'un mur isolé par l'intérieur avec la LDV. Les incertitudes considérées sont liées aux propriétés thermophysiques du matériau et à la présence d'un défaut de type écrasement. La conductivité est alors définie par une loi de probabilité lognormale dont les moments sont calculés grâce aux modèles analytiques proposés et calibrés expérimentalement (i.e. la moyenne de la conductivité est calculée par le modèle (3.4) alors que l'écart-type est déterminé par le modèle (2.9) $\lambda \sim \text{LN}(\mu = 0,044, \text{C.V} = 9,47\%)$).

P_{f0}	$e_{p\text{Classique}}$ (cm)	$e_{p\text{Nouveaumodèle}}$ (cm)
10^{-1}	3,8	13,3
10^{-2}	4,9	13,3
10^{-3}	5,9	13,3
10^{-4}	6,8	13,3

Tableau 5.9: Épaisseur d'isolation à adopter en fonction de la fonction objectif utilisée.

Ces résultats montrent qu'en utilisant une formulation quelconque de coût, la contrainte de fiabilité pilote la recherche de l'épaisseur optimale (Figure 5.4). Dans un premier temps, nous observons que les épaisseurs obtenues grâce à la formulation classique sont très éloignées de celles obtenues en utilisant la nouvelle fonction de coût.

Dans le cas où l'on utiliserait la fonction conventionnelle, une probabilité $P_{f0} = 10^{-2}$ induirait une épaisseur économique de l'ordre de 5 cm alors qu'une contrainte de fiabilité plus exigeante $P_{f0} = 10^{-3}$ obligerait 20% d'isolation additionnelle. Par ailleurs, nous constatons que dans ce cas, l'épaisseur optimale n'appartient pas à la zone de sûreté. Ainsi, à chaque fois que nous modifions le niveau d'exigence, nous obtenons une épaisseur économique qui vérifie la nouvelle exigence de fiabilité.

A l'opposé, en utilisant la formulation contenant les coûts indirects, nous observons que l'épaisseur optimale correspond au minimum de la courbe obtenue, car l'optimum appartient à la zone de sûreté. Ces résultats sont intéressants puisqu'ils correspondent aux prédictions du CSTB, qui soulignent qu'il est aujourd'hui nécessaire de doubler l'isolation pour atteindre les objectifs réglementaires actuels [151].

Dans le cas où différents scénarios climatiques sont considérés, la figure 5.8 présente l'évolution de l'épaisseur d'isolation en fonction de l'exigence en fiabilité et le type de scénario climatique considéré.

Comme nous pouvons le constater, l'épaisseur de l'isolation optimale diminue lorsque le niveau d'exigence diminue (i.e. probabilité de défaillance admissible plus élevée). A titre d'exemple, pour des probabilités de défaillance inférieures à 10^{-4} , environ 12 cm d'isolant est nécessaire, alors qu'à faible exigence de fiabilité $P_{f0} = 0,32$ seulement 5 cm suffirait.

Une autre observation intéressante concerne les résultats obtenus lorsque la probabilité de défaillance admissible est importante. Dans ce cas, l'exigence en fiabilité n'est

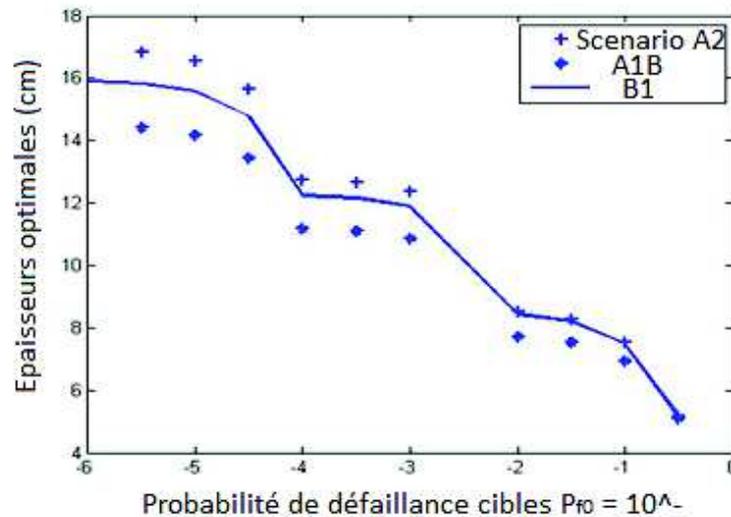


FIGURE 5.8: Épaisseur économique nécessaire en fonction de l'exigence en fiabilité.

pas très sévère ce qui donne quasiment les mêmes épaisseurs optimales pour tous les scénarios climatiques. Alors que les optimums relatifs aux différents scénarios tendent à s'écarter lorsque l'exigence devient plus importante.

En résumé, nous pouvons observer que l'épaisseur d'isolation optimale est très sensible aux incertitudes et aux coûts indirects considérés, notamment la perte en surface d'habitation, d'où l'importance de considérer des formulations plus précises de la fonction objectif. Par ailleurs, la contrainte de fiabilité imposée permet d'assurer la fiabilité de la conception en dépit des incertitudes dans le système. L'avantage de cette formulation de conception réside dans le fait que la conception optimale est orientée vers le respect des exigences réglementaires en termes d'énergie, mais aussi des exigences économiques, environnementales et sociales.

5.7 ISOLATION DES FAÇADES : ÉPAISSEUR ÉCONOMIQUE SOUS CONTRAINTE DE FIABILITÉ

Nous proposons à présent de montrer à travers cette application, l'impact de chaque type d'incertitude sur l'épaisseur optimale à utiliser. La méthodologie de conception et la nouvelle formulation de coût proposées ci-dessus sont utilisées dans le cas de l'étude d'un mur de façade présenté en figure 5.9.

Ce mur est composé d'une couche de parpaing, d'un enduit extérieur et intérieur. L'isolation est faite par l'intérieur (ITI) et le mur se trouve en région clermontoise. Les tableaux 5.10 et 5.11 rassemblent les valeurs nécessaires pour les calculs énergétiques et économiques, respectivement.

Nous commençons par étudier la variation de la conception optimale, lorsque nous considérons la variabilité de la performance de l'enveloppe, liée d'une part à l'isolant lui-même et d'autre part, à la qualité de la mise en oeuvre. Ensuite, nous présenterons l'impact des incertitudes liées au climat sur la conception à adopter avant de finir par étudier l'impact de l'ensemble de ces incertitudes sur la conception optimale.

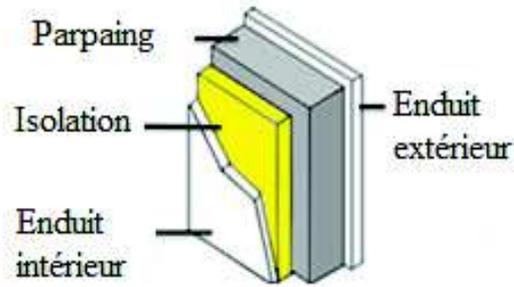


FIGURE 5.9: Structure du mur de façade étudié.

Paramètres	Valeurs	
Matériaux	Epaisseurs	Conductivités thermiques
Parpaing	20 cm	1.60 W/mK
Enduit intérieur	1.4 cm	0.40 W/mK
Enduit extérieur	1.5 cm	0.25 W/mK
Cepmax	70	kWh/m ² /an
Electricité		
COP	3.5	
η_s	0.85	
DDV	20	ans

Tableau 5.10: Paramètres nécessaires au calcul de la consommation énergétique.

Paramètre		Valeur
Isolant	C_i	10 € pour 10cm
Energie	C_e	0.1202 e/kWh
Prix m ²	$C_{m^2/\log t}$	1693 e/m ²
Taxe de Carbone	$C_{taxe/kWh}$	0.02 e/kWh
Coût additionnel	Oeuvre	94.04 €
C_{ad}	Ouvrier	11.46 €
	Travaux préparatoires	3.65 €
Taux d'intérêt	i_r	4%
Taux d'inflation	d_r	5%

Tableau 5.11: Paramètres nécessaires au calcul économique.

5.7.1 Impact du type de matériau utilisé

La résistance thermique de l'enveloppe dépend principalement de la qualité des isolants utilisés (chapitre 2). Nous nous intéressons ici à l'impact de la variabilité des

propriétés thermo-physiques des matériaux (Figure 5.10) à court terme liée aux conditions de fabrication, de stockage et de transport, et à long terme liée au vieillissement du matériau.

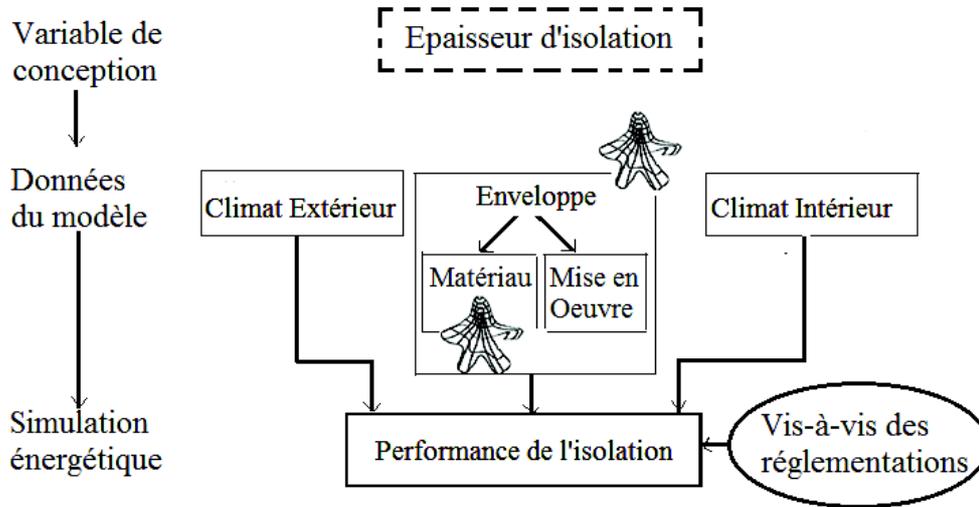


FIGURE 5.10: Evaluation de la performance énergétique en considérant les incertitudes sur les propriétés isolantes.

Dans le cas où nous considérons le polystyrène et la laine de verre, la figure 5.11 présente l'évolution de la conductivité thermique dans les cas où les propriétés thermiques sont constantes et lorsqu'elles sont dégradées.

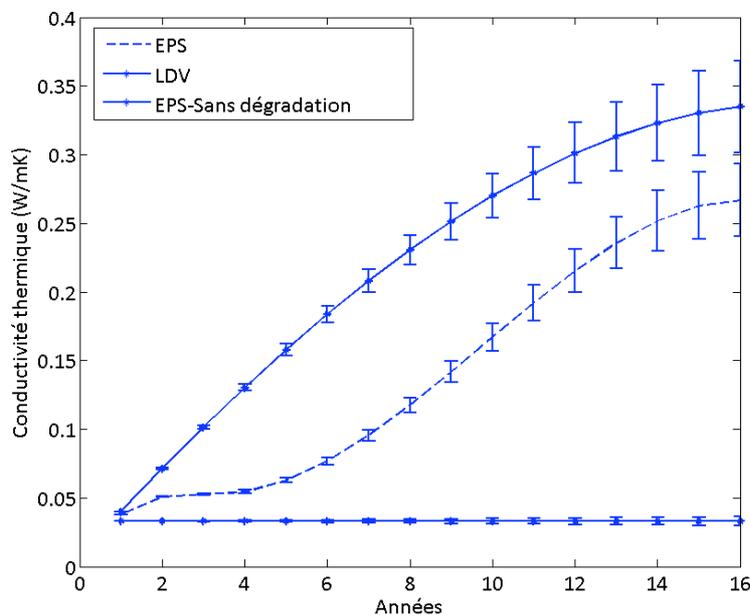


FIGURE 5.11: Dégradation de l'isolation en fonction du type de matériau.

La baisse de la résistance thermique entraîne des besoins additionnels en énergie. La figure 5.12a présente l'évolution des consommations énergétiques dans le cas du matériau intact (courbe en noir) ou dégradé (courbe bleu pour le polystyrène et courbe verte pour la laine de verre).

Les consommations attendues pour chaque type de dégradation sont comparées à la consommation maximum autorisée par la RT2012, soit C_{epmax} pour la région considéré. Lorsque le matériau garde ses propriétés thermique, les consommations respectent le seuil imposé par la réglementation. Alors que, lorsque l'isolant se dégrade, les consommations augmentent jusqu'à ne plus respecter C_{epmax} .

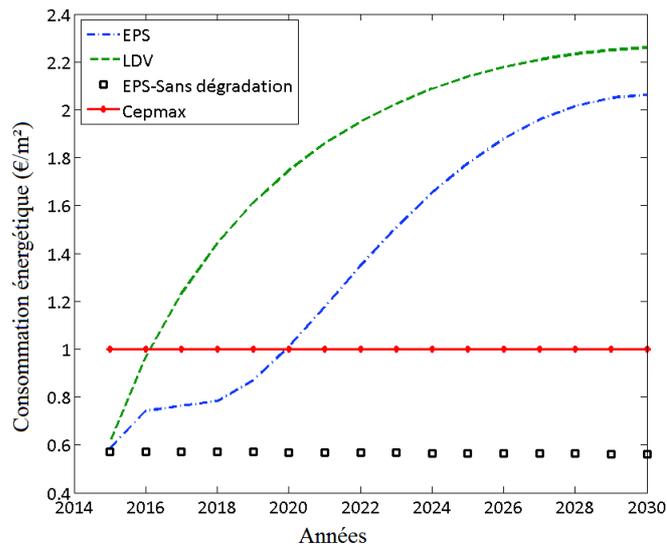
L'utilisation de matériaux denses avec de faibles taux de dégradation permet de garder les consommations acceptables pendant 5 à 6 années supplémentaires. Des matériaux tels que la laine de verre se dégradent plus ou moins vite en fonction de la nature de l'environnement (humidité) et peuvent ainsi atteindre les limites réglementaires assez rapidement. La figure 5.12b compare l'évolution des consommations énergétiques obtenues dans le cas des différents matériaux étudiés en chapitre 2. La dégradation des matériaux denses étant plus lente que les matériaux fibreux entraînent un respect des réglementations plus longtemps, même si leur performance initiale est inférieure à celle des matériaux fibreux.

Le tableau 5.12 indique les épaisseurs optimales en fonction du type de matériau pour une contrainte de fiabilité $P_f \leq 10^{-2}$. L'incertitude associée à chaque matériau est calculée sur la base des coefficients présentés dans le tableau 2.10. Nous constatons que dans le cas des deux matériaux fibreux étudiés (LDV, LDR), l'épaisseur à adopter correspond à 10 cm, et cela bien que leurs conductivités thermiques soient différentes. Ce constat est lié d'une part, à la variabilité plus importante de la conductivité des matériaux et d'autre part, à la vitesse de dégradation qui est également importante avec ce type de matériaux. A l'opposé, des épaisseurs moins importantes sont requises dans le cas des matériaux denses.

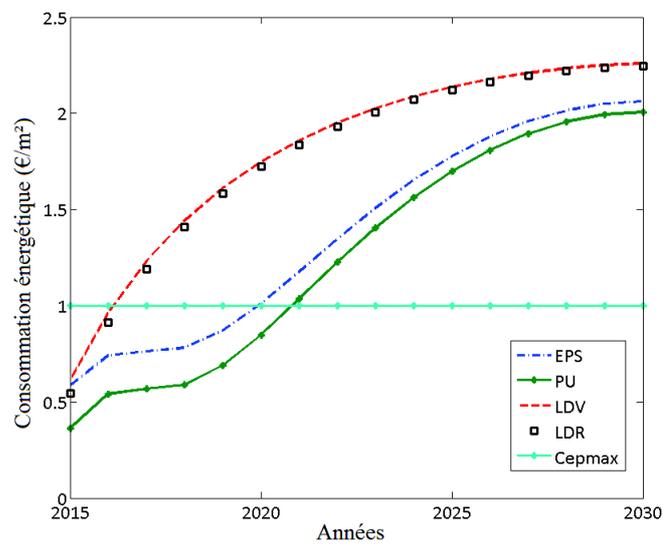
Matériau	Conductivité moyenne (W/mK)	Épaisseur optimale (cm)	
		10^{-2}	Adoptée
LDV	0.040	11.9	> 10
LDR	0.035	11.4	> 10
EPS	0.038	10.5	> 10
PU	0.022	7.2	8

Tableau 5.12: Épaisseurs optimales en utilisant la nouvelle formulation de coût.

En termes de coûts, le tableau 5.13 compare les coûts de revient de l'isolation en considérant la nouvelle formulation de coût proposée (5.20) et la formulation classique (5.3) comprenant uniquement les coûts liés à l'investissement et à l'énergie. Nous pouvons remarquer qu'en considérant les coûts additionnels, l'isolation est 3 à 4 fois plus coûteuse que ce que l'on pourrait prévoir en ne considérant que les coûts conventionnels.



(a) Influence de la dégradation.



(b) Influence du type de matériau.

FIGURE 5.12: Influence du type de matériau sur l'évolution de la consommation énergétique.

Matériau	Épaisseur optimale (cm)	Coût total	
		Nouveau	Classique
LDV	11.91	1182.43	327.81
LDR	11.45	1190.18	328.92
EPS	10.51	1036.19	296.12
PU	7.15	1166.73	296.10

Tableau 5.13: Coût total de l'isolation.

5.7.2 Impact des défauts de mise en œuvre

Nous proposons à présent de montrer l'impact des défauts de mise en oeuvre sur le choix de conception optimal (Figure 5.13).

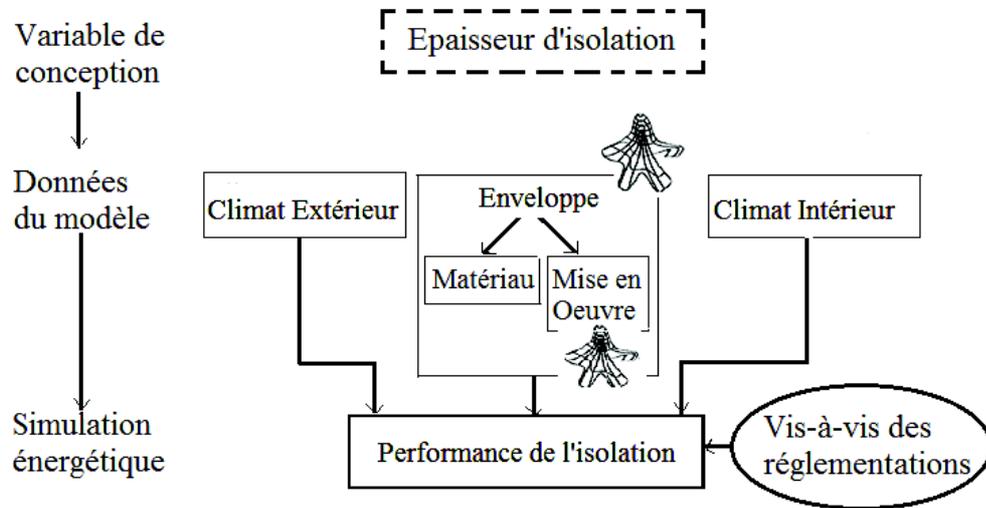
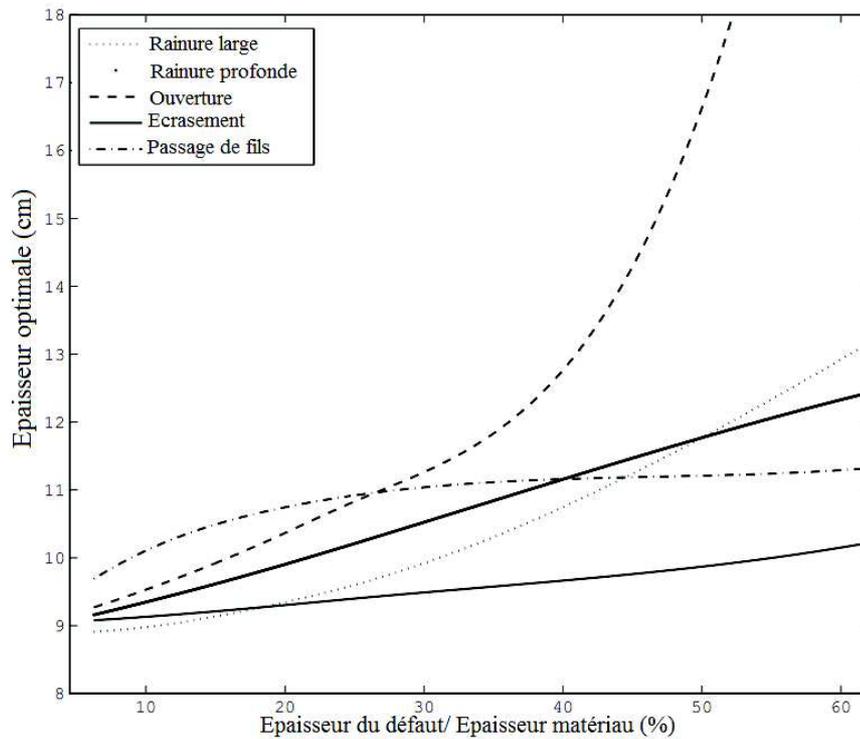


FIGURE 5.13: Evaluation de la performance énergétique en considérant la variabilité de la mise en œuvre propriétés isolantes.

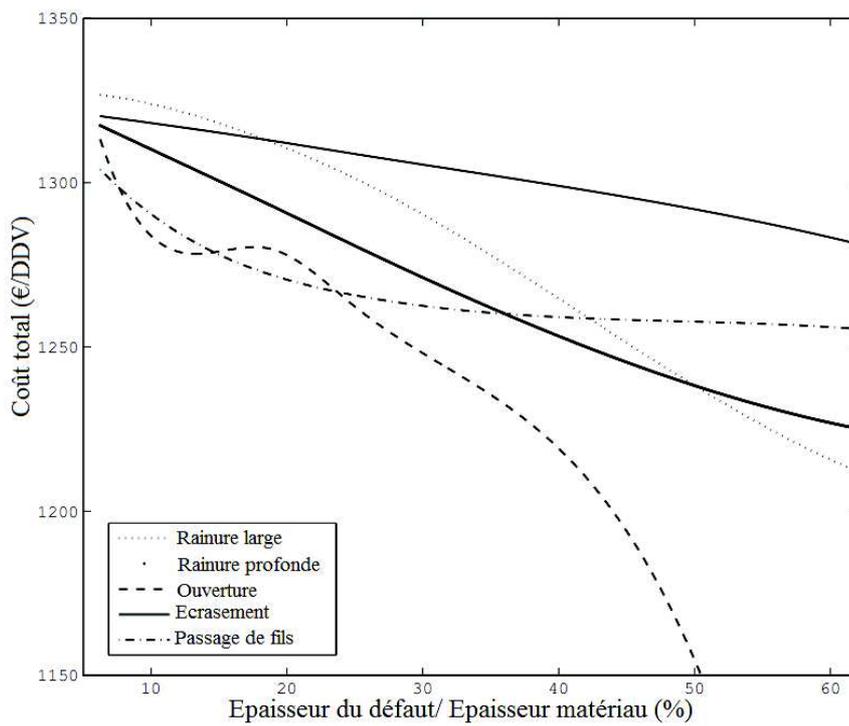
La figure 5.14 présente les différentes épaisseurs optimales requises en fonction de la taille du défaut présent dans le matériau (Figure 5.14a), d'une part, et les coûts associés (Figure 5.14b), d'autre part. En règle générale, plus le défaut est important, plus l'épaisseur nécessaire pour respecter les exigences est importante. Les "ouvertures" sont en tête des défauts les plus pénalisants, suivies de près par le "passage de fils" et les "rainures profondes".

Nous proposons de varier le volume du défaut présent dans le matériau en variant l'épaisseur du défaut. Ainsi, nous représentons sur la figure le ratio volume du défaut par rapport au volume total par le ratio épaisseur du défaut/épaisseur de l'isolant. Pour un défaut représentant 10% de l'épaisseur de l'isolant, environ 10 cm sont nécessaires si le défaut est un passage de fils, contre 9,5 dans le cas de l'ouverture et 9,3 pour la rainure. A ce niveau, l'écrasement partiel et le trou d'air associé au passage de fils, font que le matériau est beaucoup plus impacté que l'ouverture. Cette tendance change assez vite : lorsque le défaut atteint 30%, la présence d'un passage de fil nécessite un isolant d'au moins 11 cm, contre 11,5 cm dans le cas de l'ouverture.

Sur la figure 5.14b, nous observons que plus la quantité de défaut est importante, plus l'épaisseur optimale nécessaire pour assurer la fiabilité de l'isolation augmente. Parallèlement, l'augmentation de l'épaisseur d'isolation entraîne des économies financières, malgré l'importance du défaut. En effet, l'importance de l'épaisseur optimale augmente la résistance de l'isolation sur tout le mur en plus de palier les pertes de chaleur au niveau du défaut. A titre d'exemple, si l'ouverture représente 10% du volume de défaut, l'épaisseur optimale nécessite 18% d'isolant en plus pour palier les pertes de chaleur provoqués par le défaut, toutefois, nous constatons que le coût de revient de



(a) Épaisseur optimale fonction de la taille du défaut.



(b) Coût total associé.

FIGURE 5.14: Influence de la présence de défaut sur l'épaisseur optimale à utiliser.

l'isolation est 2% inférieur au coût d'une isolation sans défaut (en ne considérant que les coûts énergétiques et d'isolation).

5.7.3 Impact du scénario climatique

Nous étudions à présent l'impact de différents scénarios climatiques sur la conception optimale à adopter (Figure 5.15). La figure 5.16a présente pour l'évolution de la

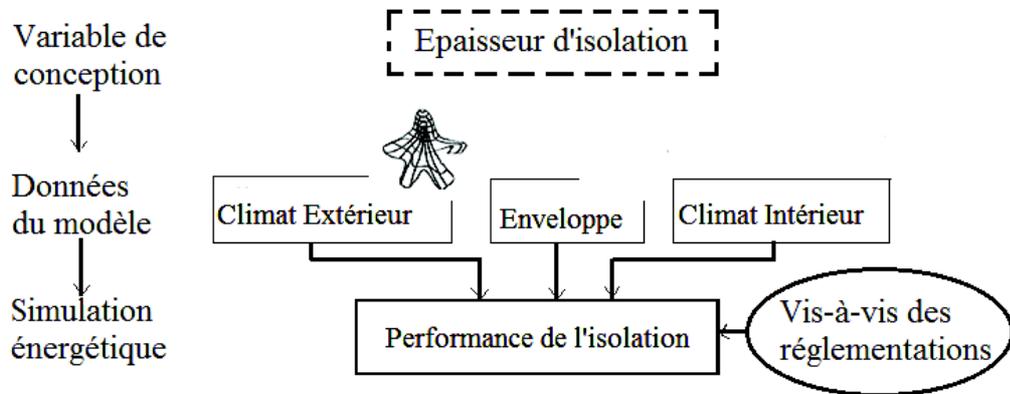


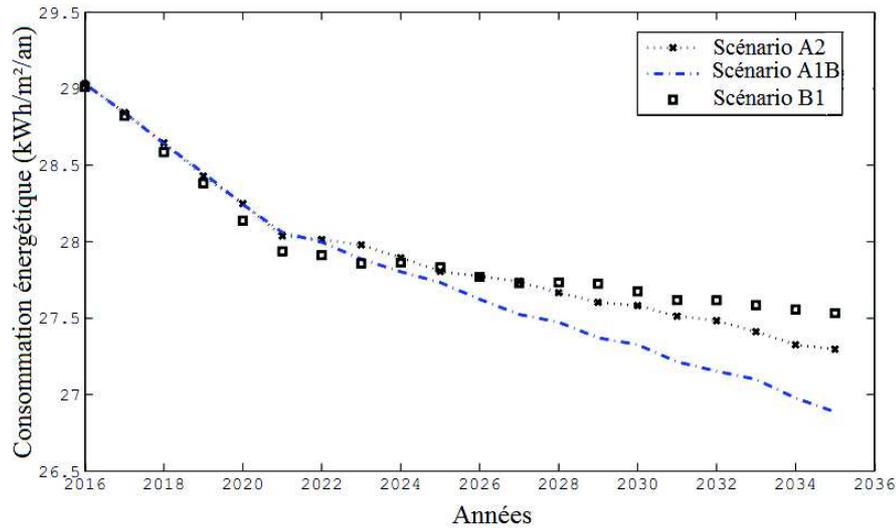
FIGURE 5.15: Evaluation de la performance énergétique en fonction du scénario climatique considéré.

consommation énergétique pour différents scénarios climatiques (voir chapitre 4). La figure 5.16a présente l'incertitude sur la consommation énergétique annuelle à laquelle on pourrait s'attendre, sous le seul effet de la variabilité climatique.

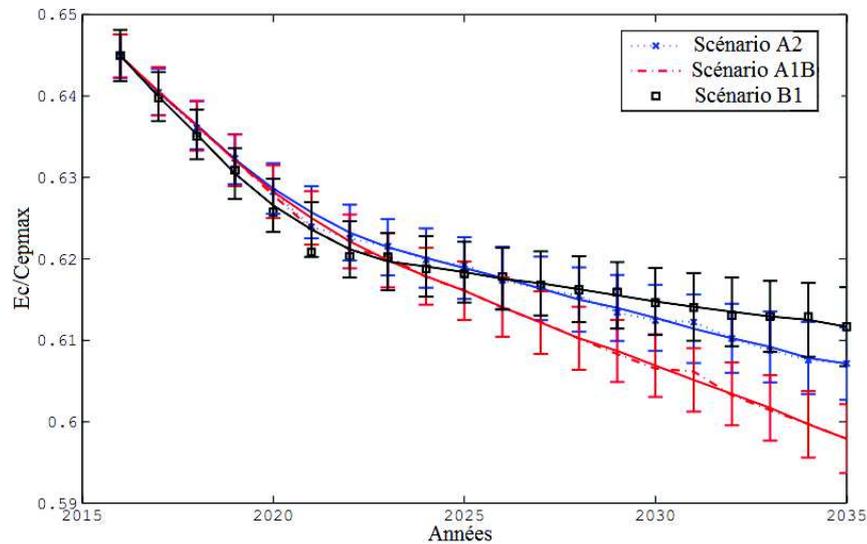
Nous pouvons remarquer que les consommations sont supérieures avec le scénario le plus optimiste B1. Ce scénario étant le plus froid, nécessiterait des besoins en chauffage plus importants que les autres. Les différents climatologues confirment que la tendance actuelle liée au réchauffement climatique suit le scénario pessimiste (A2). Les consommations associées à ce scénario sont également importantes en raison des charges de refroidissement qui sont plus importantes. En termes de conception, nous trouvons l'épaisseur optimale la plus importante à utiliser avec le scénario A2 dû aux incertitudes pour ce scénario (Tableau 5.14). Par ailleurs, nous constatons que quel que soit le scénario climatique, la prise en compte de l'aspect environnemental et sociétal de l'isolation fait apparaître des sur-coûts indirects non négligeables.

Scénario Climatique	Épaisseur optimale (cm)	Coût total	
		Nouveau	Classique
A2	9.96	1069.55	300.50
A1B	9.80	1064.36	300.82
B1	9.93	1072.90	301.03

Tableau 5.14: Coûts optimaux de l'isolation en fonction du scénario climatique considéré.



(a) Consommation moyenne.



(b) Influence des incertitudes.

FIGURE 5.16: Influence du scénario climatique sur la consommation énergétique.

5.7.4 Prise en compte de toutes les incertitudes

Nous présentons à présent l'impact des différentes incertitudes précédentes sur la performance énergétique (Figure 5.17). La figure 5.18 présente l'évolution des consommations énergétiques dans le cas du mur isolé avec 8 cm de polystyrène sous le scénario moyen A2 (DJU Moyennes uniquement). Les courbes présentent séparément l'influence des différentes incertitudes associées aux matériaux, au climat et à la présence de rainure de 2 cm de profondeur.

Nous remarquons tout d'abord, que la qualité du matériau a un impact certain sur les consommations énergétiques. Lorsque le matériau ne présente pas de défaut, l'évolution de la consommation énergétique augmente régulièrement, puisqu'elle ne dépend que du taux de vieillissement de l'isolant. Pendant quelques années, l'épaisseur

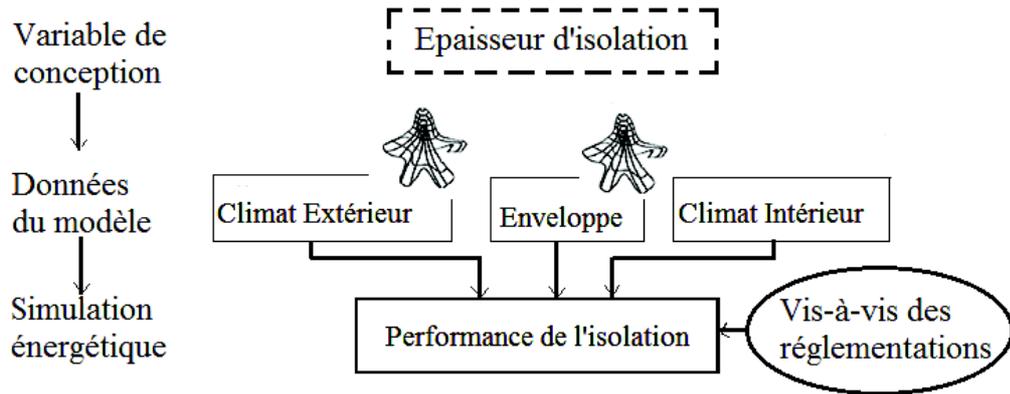


FIGURE 5.17: Evaluation de la performance énergétique.

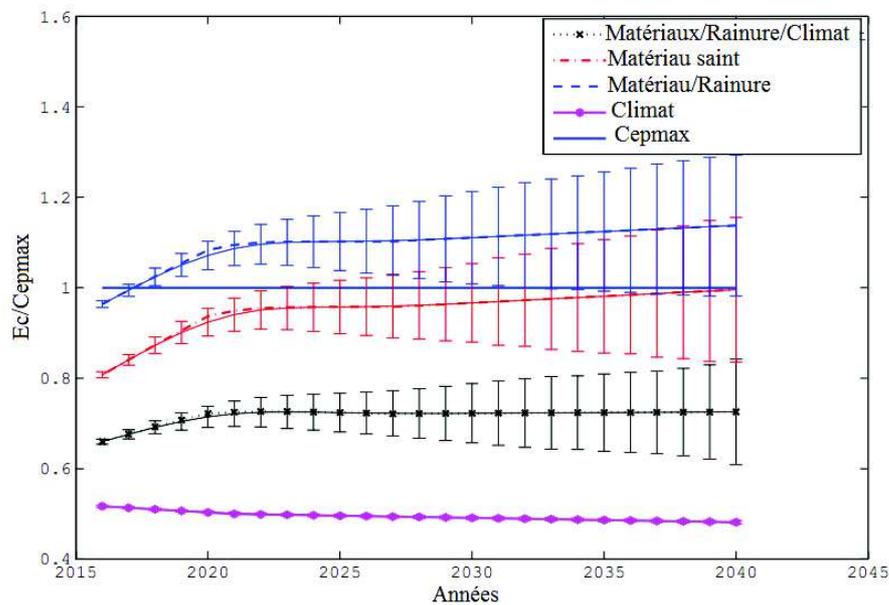


FIGURE 5.18: Evolution de la consommation énergétique par type d'incertitude considérée.

de 8 cm semble vérifier l'exigence Cepmax. Néanmoins au bout de 15 ans, l'incertitude sur les consommations indique que le risque de dépassement de la limite autorisée est non négligeable.

La présence du défaut montre néanmoins que la consommation maximum imposée n'est plus vérifiée au bout de 4 ans. Ce qui justifie le choix d'une épaisseur optimale supérieure à 10,5 cm (Figure 5.14a).

Jusqu'à présent, la consommation énergétique calculée ne considère pas la variabilité du climat. Toutefois, la considération du réchauffement climatique fait qu'en dépit de la dégradation du matériau, l'environnement intérieur nécessite moins d'énergie en raison de l'augmentation des températures extérieures (courbe noire). La figure 5.19 présente l'évolution des consommations à long terme. Nous observons clairement l'impact du changement climatique. Deux tendances se distinguent. La première présente une

diminution du besoin énergétique en raison de l'augmentation des températures hivernales entraînant moins de besoins en chauffage. La deuxième consiste en l'augmentation des charges dues au refroidissement de façon peu significative. Tandis que la seconde tendance traduit cette fois le net besoin en consommation liée au refroidissement.

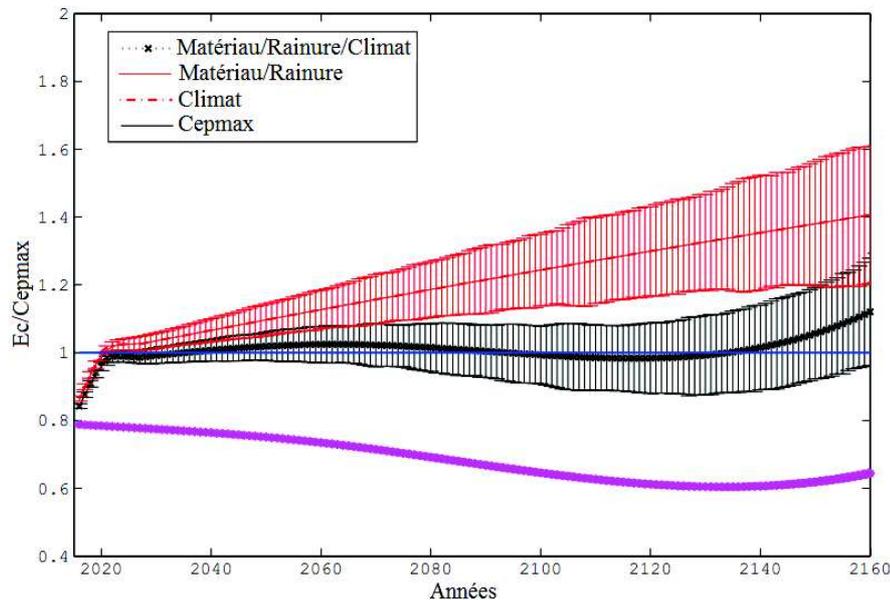


FIGURE 5.19: Evolution de la consommation énergétique par types d'incertitude considérée sur une centaine d'années.

Les résultats obtenus dans cette application soulignent l'importance de considérer les différentes incertitudes lors de la conception pour une meilleure maîtrise des consommations à long terme. La méthodologie de conception proposée se base sur des contraintes de fiabilité, nous pouvons néanmoins introduire des contraintes en termes de budget, ou de limite de polluants.

5.8 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre est d'intégrer l'impact des incertitudes liées aux propriétés des matériaux isolants dans le processus de conception. Le choix des matériaux et de l'épaisseur peuvent avoir de multiples effets sur la consommation énergétique du bâtiment au cours des différentes phases du cycle de vie.

Nous avons proposé dans ce chapitre une nouvelle formulation du problème de conception de l'isolation qui permet de fournir des épaisseurs d'isolation optimales en intégrant les incertitudes associées aux paramètres d'entrée à travers l'introduction d'une contrainte de fiabilité. Par ailleurs, différents facteurs socio-économiques sont considérés pour l'élaboration d'une nouvelle formulation qui tiendrait compte en plus des coûts liés à l'investissement et à la consommation, des coûts indirects en relation avec l'isolation, notamment la perte en confort, la pollution et la perte en surface habitable.

Une étude technico-économique a permis d'étudier l'impact de chaque coût additionnel sur le résultat d'optimisation et a souligné notamment l'impact du coût lié à la perte en surface d'habitation lorsque l'on considère le coût à long terme de l'isolation. La nouvelle méthodologie de conception basée sur la fiabilité permet de prendre en considération les facteurs socio-économiques et environnementaux en plus des paramètres liés aux matériaux, au climat, au taux d'escompte et d'inflation. La prise en compte des incertitudes lors du processus de décision, grâce à l'intégration de la contrainte de fiabilité, permet de garantir la sûreté de la conception, en limitant les risques de déviation de la performance dûs aux variabilités.

L'étude de l'isolation d'une façade nous a permis de montrer que la prise en compte des incertitudes conduit à des valeurs de conception nettement supérieures à celles des conceptions classiques généralement utilisées. Par ailleurs, la considération des possibles pertes en confort, de la pollution et de la perte en surface d'isolation engendrées par la pose d'isolation, donnait des coûts totaux atteignant parfois le triple des prévisions classiques. Enfin, la présence de défauts dans l'isolant nécessite en toute logique, des épaisseurs optimales beaucoup plus importantes. Ceci conduit contre toute attente à des économies financières dues au fait qu'en plus de palier les pertes au niveau du défaut, tout le panneau se retrouvait plus résistant (épaisseur plus importante).

CONCLUSION GÉNÉRALE

La prise en compte des incertitudes dans la conception des systèmes d'isolation représente aujourd'hui une nécessité économique, énergétique, environnementale et sociale. L'un des principaux objectifs de cette thèse a été de démontrer l'importance du rôle des différentes sources d'incertitudes dans l'évaluation de la performance énergétique des isolants, afin de les intégrer dans les processus de simulation, d'optimisation et de décision.

PRINCIPALES CONTRIBUTIONS

A l'heure actuelle, il est encore difficile de maîtriser les consommations énergétiques dans le bâtiment, étant donné que la conception des isolations se base sur les résultats de simulations, qui intègrent des données variables et incertaines. Les écarts de performance observés dans la réalité traduisent le besoin d'améliorer le processus de décision en phase de conception. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la qualité des données injectées dans les modèles de simulation, vis-à-vis de l'enveloppe et du climat, dans le but de déterminer leur impact sur la performance énergétique effective.

Les principales contributions peuvent être résumées comme suit :

- Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la performance des matériaux isolants utilisés en France. L'objectif étant de vérifier que leur performance réelle correspondait bien à celle prédite par le fabricant. Une étude expérimentale a permis de caractériser l'incertitude associée à chaque type d'isolant.

Les résultats obtenus ont montré que l'écart de performance obtenu avec les matériaux fibreux est plus important que celui avec les matériaux denses et synthétiques. A long terme, ces matériaux sont susceptibles de se dégrader plus fortement, entraînant une incertitude croissante au cours de leur durée de vie. Ces résultats ont également permis de calibrer le modèle analytique pour l'estimation des incertitudes sur la conductivité thermique.

- Pour qu'une isolation soit performante, la continuité de l'isolation doit être assurée afin de limiter les fuites de chaleur à travers la paroi. La deuxième partie de ce travail est consacrée à l'impact des défauts de mise en œuvre sur la performance de l'isolation. L'étude de quatre types de défauts usuels a permis de développer le concept d'isolation équivalente, qui propose de substituer, lors des simulations, la conductivité initiale par une valeur équivalente traduisant la résistance globale de l'isolant avec le défaut. Des modèles analytiques sont proposés pour exprimer cette conductivité équivalente en fonction du type et de la taille du défaut.

Ces résultats ont permis de mettre en évidence l'impact de chaque type de défaut sur la performance de l'isolation. Nous avons également pu démontrer le rôle néfaste de certains défauts, tels que les ouvertures entre les panneaux.

- La troisième source d'incertitude étudiée dans ce travail concerne la variabilité climatique. Nous avons considéré les différentes variabilités climatiques proposées par le GIEC, afin d'étudier leur impact sur la performance de l'isolation à long terme.

Deux approches sont considérées pour modéliser la variabilité climatique lors de la simulation : il s'agit des modélisations par des variables aléatoires et par des processus stochastiques. La modélisation de la variabilité climatique en générant des processus stochastiques s'est avérée plus réaliste, mais elle est très consommatrice en temps de calcul et nécessite des données plus complètes et plus précises. Nos résultats ont montré que l'utilisation des variables aléatoires permet de considérer, de façon simplifiée, les incertitudes climatiques à moindre coût de calcul, mais elle surestime la variabilité climatique prévoyant ainsi des pertes en fiabilité de l'isolation plus importantes que celles dans le cas des processus aléatoires.

- Enfin, la recherche du dimensionnement optimal des structures représente un défi réel en présence d'incertitudes. Les variabilités relatives au comportement à court et à long terme (dégradation des matériaux, singularités, conditions environnementales, etc) doivent être prises en compte dans la méthodologie de conception.

Dans ce sens, nous proposons d'intégrer la contrainte de fiabilité dans le processus de conception. Une optimisation pilotée par la fiabilité permet d'obtenir le dimensionnement optimal, tout en garantissant un niveau de fiabilité cible pendant toute la durée de vie, en dépit des incertitudes et des surcoûts éventuels. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'impact de chaque paramètre incertain sur la conception optimale. Nous avons également trouvé que pour des exigences de fiabilité moyennes, environ 50% d'isolation en plus est requise.

Par ailleurs, nous avons proposé d'améliorer la fonction coût en y intégrant des coûts indirects associés à l'isolation. De par le niveau des exigences actuelles, il est nécessaire de prendre en considération les différentes contraintes économiques, écologiques et sociales lors du choix de la conception. En conséquence, la formulation du coût de l'isolant doit intégrer les coûts additionnels liés à la pollution, à la perte en surface habitable et aux coûts liés au manque de confort. Une étude économique a permis de montrer, qu'en fonction de la région et du type d'isolation, le coût du cycle de vie d'une isolation peut varier du simple au triple.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Ce travail a permis d'identifier plusieurs pistes de recherche :

- En phase de conception, il est très difficile d'estimer la qualité de la mise en œuvre que l'on pourrait avoir sur le chantier. Des études de thermographie in-situ sur différents chantiers permettraient de fournir des valeurs normalisées de la conductivité effective et de l'incertitude associée, pour les besoins de simulation.

- A l'heure actuelle, la taxe de carbone ne s'applique pas encore au secteur du bâtiment. Il serait intéressant de considérer l'optimisation multicritère pour intégrer les contraintes écologiques liées à la pollution, en termes de quantité admissible d'émissions de gaz à effet de serre.
- Enfin, pour pouvoir assurer la qualité de la conception, toutes les sources d'incertitudes doivent être considérées. Dans ce travail, les sources thermo-physiques et climatiques ont été quantifiées et intégrées au processus de conception. Toutefois, il serait important de prendre en compte les incertitudes associées au comportement de l'habitant vis-à-vis de l'habitat et des systèmes énergétiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement, Janvier 2014.
- [2] Schneider. *Le livre blanc de l'efficacité énergétique*. Schneider electric France, 2010.
- [3] I-A. Macdonald. *Quantifying the effects of Uncertainty in Building Simulation*. PhD thesis, Université de Strathclyde, 2002.
- [4] A. Costa, M. Keane, J. Torrens, and C. Edward. Building operation and energy performance : Monitoring, analysis and optimisation toolkit. *Applied Energy*, 101 : 310–316, 2013.
- [5] URL www.observatoire-electricite.fr/La-consommation-d-energie-en-320.
- [6] URL <http://jeunes.edf.com/article/l-epuisement-des-ressources>, 239.
- [7] Agence Internationale de l'énergie. World energy outlook 2012. Technical report, 2012.
- [8] GIEC-Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat. Climate change 2007 : impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group to the forth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Technical report, Cambridge university press., 2007.
- [9] O. Sidler. La rénovation thermique des bâtiments en france : Enjeux et stratégie. Technical report, ENERTECH, 2012.
- [10] G. Loison. *L'isolation thermique : Faire des économies tout en respectant l'environnement*. 2011.
- [11] C. Spitz. *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2012.
- [12] S. Attia, E. Gratia, A. De Herde, and J-L.M. Hensen. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49 :2–15, 2012.
- [13] R. Pacheco, J. Ordonez, and G. Martinez. Energy efficient design of building : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 :3559–3573, 2012.
- [14] W.L. Oberkampf, S.M. DeLand, B.M. Rutherford, K.V. Diegert, and K.F. Alvin. Error and uncertainty in modeling and simulation. *Reliability Engineering and System Safety*, 75 :333–357, 2002.
- [15] C.J. Hopfe and J-L.M. Hensen. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy and Buildings*, 43 :2798–2805, 2011.

- [16] Y. Lu, Z. Huang, and T. Zhang. Method and case study of quantitative uncertainty analysis in building energy consumption inventories. *Energy and Buildings*, 57 : 193–198, 2013.
- [17] S. De Wit and G. Augenbroe. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy and Buildings*, 34 :951–958, 2002.
- [18] P. De Wilde and W. Tian. Management of the thermal performance risks in buildings subjected to climate change. *Building and Environment*, 55 :1–7, 2012.
- [19] URL www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/.
- [20] M. Manfren, N. Aste, and R. Moshksar. Calibration and uncertainty analysis for computer models- a meta-model based approach for integrated building energy simulation. *Applied Energy*, 103 :627–641, 2013.
- [21] F. Ascione, F. Rossi, and G.P. Vanoli. Energy retrofit of historical buildings : theoretical and experimental investigations for the modeling of reliable performance scenarios. *Energy and Buildings*, 43 :1925–1936, 2011.
- [22] Y. Heo, R. Choudhary, and G.A. Augenbroe. Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty. *Energy and Buildings*, 47 :550–560, 2012.
- [23] R. El Diasty. Effect of thermal anomalies and dimensional instability on building envelopes performance. *Construction and Building Materials*, 2, 1988.
- [24] C. Cremona. *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2003.
- [25] N. Djongyang, R. Tchinda, and D. Njomo. Thermal confort : A review paper. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14 :2626–2640, 2010.
- [26] En iso 7730 :2005. ergonomics of thermal environment- analytical determination and interpretation of thermal comfort criteria.
- [27] T. De Meester, A-F. Marique, A. De Herde, and S. Reiter. Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of europe. *Energy and Buildings*, 57 :313–323, 2013.
- [28] T. Zaraket. *Stochastic activity-based approach of occupant-related energy coconsumption residential buildings*. PhD thesis, Ecole centrale Paris, 2014.
- [29] M. Bonte, F. Thellier, and B. Lartigue. Impact of occupant's on energybuilding performance and thermal sensation. *Energy and Buildings*, 76 :219–227, 2014.
- [30] X60-520 : Prévisions des caractéristiques de fiabilité, maintenabilité et disponibilité.
- [31] Y. Aoues. *Optimisation fiabiliste de la conception et de la maintenance des structures*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont II, 2008.
- [32] M. Lemaire. *Fiabilité des structures : couplage mécano-fiabiliste statique*. Hermes Science, 2005.
- [33] B. Sudret and A. Der Kiurighian. Stochastic finite element methods and reliability. Technical report, University of California, Berkley, 2000.

- [34] W.; Raphael. *Etude fiabiliste du fluage des structures en béton armé et précontraint*. PhD thesis, Ecole centrale de Paris, 2002.
- [35] J. Baroth, F. Schoefs, and D. Breysse. *Fiabilité des ouvrages : sûreté, variabilité, maintenance, sécurité*. Hermes, 2011.
- [36] D. Castro-Lacouture, J.A. Sefair, L. Florez, and A.L Medaglia. Optimization model for the selection of materials using a leed-based green building rating system in colombia. *Building and Environment*, 44 :1162–1170, 2009.
- [37] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, and L. Luo. A review of potential materials for thermal energy storage in building application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18 :327–349, 2013.
- [38] N. Morel and E. Gnansounou. *Energétique du bâtiment - cours*. Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne., 2009.
- [39] O.A. Dombayci. The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings. *Building and Environment*, 42 :3855–3859, 2007.
- [40] J. Yu, C. Yang, L. Tian, and D. Liao. A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of china. *Applied Energy*, 86 :2520–2529, 2009.
- [41] A. Ucar and F. Balo. Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls. *Renewable Energy*, 35 :83–98, 2010.
- [42] T.M.I. Mahlia and A. Iqbal. Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in maldives. *Energy*, 35 :2242–2250, 2010.
- [43] O. Kaynakli. A review of the economical and optimum thermal insulation thicknesss for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 : 425–425, 2012.
- [44] M.J. Tenpierik and E. Hasselaar. Reflective multi-foil insulation for buildings : A review. *Energy and Buildings*, 56 :233–243, 2013.
- [45] M.A. Medina. On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels. *Energy and Buildings*, 40 :438–444, 2008.
- [46] F. Dominguez-Munoz, B. Anderson, J.M. Cejudo-Lopez, and A. Carrilo-Andrès. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. *Energy and Buildings*, 42 :2159–2168, 2010.
- [47] D. Hernot and G. Porcher. *Thermique appliquée aux Bâtiments*. Les éditions parisiennes, 1984.
- [48] J. Berger, S. Guernouti, M. Woloszyn, and C. Buhe. Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation. *Building Engineering*, 3 :1–15, 2015.
- [49] M. Hall and A. David. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, 29(4) :740–747, 2009.

- [50] A. Abdou and I. Budaiwi. The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content. *Construction and Building Materials*, 43 :533–544, 2013.
- [51] C. Teodosiu, R. Hohota, G. Rusaouën, , and M. Woloszyn. Numerical prediction of indoor air humidity and its effect on indoor environment. *Building and Environment*, 38 :655–664, 2003.
- [52] M. Woloszyn-Vallon. *Modélisation hygro-thermo-aeraulique des bâtiments multizones- Proposition d'une stratégie de résolution du système couplé*. PhD thesis, INSA de Lyon, 1999.
- [53] CSTB. Transfert d'humidité à travers les parois - évaluer les risques de condensation. Technical report, CSTB, 2009.
- [54] J. Straube and F. Burnett. Overview of hygrothermal analysis methods, astm manual 40- moisture analysis and condensation control in building envelopes., 2001.
- [55] M. Fortes and M.R. Okos. *Advances in Drying : Drying theories : their bases and limitations as applied to foods and grains*. Hemisphere Washington,D.C., 1980.
- [56] Z. Pavlik and R. Cerny. Experimental assessment of hygrothermal performance of an interior thermal insulation system using a laboratory technique simulating on-site conditions. *Energy and Buildings*, 40 :673–678, 2008.
- [57] URL <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10179>.
- [58] M.A. Aktacir, O. Buyukalaca, and T. Yilmaz. Life cycle cost analysis for constant-air-volume and variable-air-volume air-conditioning systems. *Applied Energy*, 83 : 606–627, 2006.
- [59] B.P. Jelle. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions- properties, requirement and possibilities. *Energy and Buildings*, 43 :2549– 2563, 2011.
- [60] A. Karamanos, S. Hadjarakou, and A.M. Papadopoulos. The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone. *Energy and Buildings*, 40 : 1402–1411, 2008.
- [61] L.F. Cabeza, A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, and I. Fernandez. Experimental study on the performance of insulation materials in mediterranean construction. *Energy and Buildings*, 42 :31–55, 2010.
- [62] M. Guizzardi, D. Derome, R. Vonbank, and J. Carmeliet. Hygrothermal behavior of a mmassi wall with interior insulation during wetting. *Building and Environment*, 89 :59–71, 2015.
- [63] M.S. Sodha, S.C. Kaushik, G.N. Tiwari, I.C. Goyal, M.A.S. Malik, and A.K. Khatri. Optimum distribution of insulation inside and outside the roof. *Building and Environment*, 14 :47–52, 1979.
- [64] S.A. Al Sanea and M.F Zedan. Improving thermal performance of buildings wall by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass. *Applied Energy*, 88 :3113–3124, 2011.

- [65] M.A. Eben Saleh. Impact of thermal insulation location on buildings in hot dry climates. *The solar and wind technologies*, 7 :393–406, 1990.
- [66] A. Bolatturk. Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in turkey. *Applied thermal engineering*, 26 :1301–1309, 2006.
- [67] O. Kaynakli. A study of residential heating energy requirement and optimum insulation thickness. *Renewable Energy*, 33 :1164–1172, 2008.
- [68] S. Burhenne, O. Tsvetkova, D. Jacob, G.P. Henze, and A. Wagner. Uncertainty quantification for combined building performance and cost-benefit analyses. *Building and Environment*, 62 :143–154, 2013.
- [69] Iso 8320 ; thermal insulation- determination of steady-state thermal resistance and related properties guarded hot plate apparatus. s.i. : Iso 8302, 08 1991.
- [70] VISULOG : *Monitoring, control and data acquisition software. Version F.18(6,18,0,0). Copyright 2003-2005 AOIP. All Rights reserved.*
- [71] F. Asdrubali, G. Baldinelli, and F. Bianchi. A quantitative method to evaluate thermal bridges in buildings. *Applied Energy*, 97 :365–373, 2012.
- [72] P.A. Fokaides and S.A. Kalogirou. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (u-value) in building envelope. *Applied Energy*, 88 :4358–4365, 2011.
- [73] *Exttech instruments- InfraRed Thermometer- User Manual.* FLIR Company.
- [74] M. Ozel and K. Pihtili. Investigation of effect of wall on window areas (in turkish). *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23 :655–662, 2008.
- [75] L. Guan. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. *Building and Environment*, 44 :793–800, 2009.
- [76] URL www.abcclim.net/degres-jours-dju.html.
- [77] K. Comakli and B. Yüksel. Optimum insulation thickness of external walls for energy savings. *Applied thermal engineering*, 23 :473–479., 2003.
- [78] Réglementation thermique 2005-fascicule 5/5 : Ponts thermique.
- [79] Iso 10211 : 2007 thermal bridges in building construction- international standards, 2007.
- [80] A. Bras, F. Gonçalves, and P. Faustino. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling : Thermal performance and cost evaluation. *Energy and Buildings*, 72 :296–308, 2014.
- [81] G. Mao and G. Johannesson. Dynamic calculation of thermal bridges. *Energy and buildings*, 26 :233–240, 1997.
- [82] S. Hassid. Thermal bridges across multilayer walls : a simplified approach. *Building and Environment*, 25 :143–159, 1990.
- [83] S. Hassid. Thermal bridges in homogeneous walls : a simplified approach. *Building and Environment*, 24 :259–264, 1989.

- [84] G. Evola, G. Margani, and L. Marletta. Uncertainty quantification for combined building performance and cost-benefit analyses. *Energy and Buildings*, 43 :2385–2393, 2011.
- [85] J. Kosny and J.E. Christian. Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls. *Energy and Buildings*, 22 :157–163, 1995.
- [86] O.A. Abdou and K.S. Murali. The effect of air cells and mortar joints on the thermal resistance of concrete masonry walls. *Energy and buildings*, 21 :111–119, 1994.
- [87] S.A. Al Sanea. Finite-volume thermal analysis of building roof under two dimensional periodic conditions. *Building and Environment*, 38 :1039–1049, 2003.
- [88] T. Taylor, J. Counsell, and S. Gill. Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building facades. *Energy and Buildings*, 76 :130–142, 2014.
- [89] J. Quinten and V. Feldheim. Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes : Review of existing methods, application and new mixed method. *Energy and Buildings*, page In press, 2015.
- [90] M. Gorgolewski. Developing a simplified method of calculating u-values in light steel framing. *Building and Environment*, 42 :230–236, 2007.
- [91] S. Dilmac, A. Guner, F. Senkal, and S. Kartal. Simple method for calculation of heat loss through floor/beam-wall intersections according to iso 9164. *Energy Convers Manage*, 48 :826–835, 2007.
- [92] M. Hoffman and B. Schwartz. Computation of steady and time-dependent temperature distribution for building elements : a general three-dimensional solution. *Building and Environment*, 15 :62–72, 1980.
- [93] B. Larbi. Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings. *Energy and Buildings*, 37 :945–951, 2005.
- [94] S. Wei, F-C. Wang, F. Qun-BO, and M. Zhuang. Effect of defects on the effective thermal conductivity of thermal barrier coatings. *Applied Mathematical modelling*, 36 :1995–2002, 2012.
- [95] K. Martin, C. Escudero, A. Erkoreka, I. Flores, and J. Sala. Equivalent well method for dynamic characterisation of thermal bridges. *Energy and Buildings*, 55 :704–714, 2012.
- [96] T. Kalamees. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in estonia. *Building and Environment*, 42 :2369–2377, 2007.
- [97] M. Fox, D. Coley, S. Goodhew, and P. De Wilde. Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40 :296–310, 2014.
- [98] N. Ahzahar, N.A. Karim, S.H. Hassan, and J. Eman. A study of contribution factors to building failures and defects in construction industry. *Procedia Engineering*, 20 :249–255, 2011.

- [99] N.L. Othman, M. Jaafar, W.M. Wan Harun, and F. Ibrahim. A case study on moisture problems and building defects. *Procedia Social and Behavior Sciences*, 170 : 27–36, 2015.
- [100] Réglementation thermique 2005-fascicule 2/5 : Matériaux.
- [101] I.a.A.E. Ansys, *Ansys release 14.0 UP 20111024. Copyright 2011 SAS IP ; Inc. All rights reserved.*
- [102] A. Aïssani, A. Chateaneuf, J-P. Fontaine, and Ph. Audebert. Quantification of workmanship insulation defects and their impact on the thermal performance of building facades. *Applied Energy*, page (In press), 2015.
- [103] P. De Wilde and D. Coley. The implications of a changing climate for buildings (editorial article). *Building and Environment*, 55 :1–7, 2011.
- [104] A. Roetzel and A. Tsangrassoulis. Implication of climate change on comfort and energy performance in offices. *Building and Environment*, 57 :349–361, 2012.
- [105] M.F. Jentsch, A.S. Bahaj, and P.A.B. James. Climate change future proofing of buildings- generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, 40(12) :2148–2168, 2008.
- [106] Y.H. Yau and S. Hasbi. A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the topics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18 :430–440, 2013.
- [107] K. Liso. Integrated approach to risk management of future climate change impacts. *Building Research & Information*, pages 1–10, 2006.
- [108] R. Zmeureanu and G. Renaud. Estimation of potential impact of climate change on the heating energy use of existing houses. *Energy Policy*, 36(1) :303–310, 2008.
- [109] M. Camilleri, R. Jaques, and N. Isaacs. Impacts of climate change on building performance in new zealand. *Building Research and Information*, 29(6) :440–450, 2001.
- [110] T. Frank. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in switzerland. *Energy and Buildings*, 37(11) :1175–1185, 2005.
- [111] M. Christenson, H. Manz, and D. Gyalistras. Climate warwarm impact on degree-days and building energy demand in switzerland. *Energy Conversion and Management*, 47(6) :671–686, 2006.
- [112] D.P. Jenkins, Y. Liu, and A.D. Peacock. Climat and internal factors affecting future uk office heating and cooling energy consumptions. *Energy and Buildings*, 40(5) : 874–881, 2008.
- [113] W. Tian and P. De Wilde. Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections : A uk case study. *Automation in construction*, 20 :1096–1109, 2011.
- [114] P. De Wilde and W. Tian. Predicting the performance of an office under climate change : A study of metrics, sensitivity and zonal resolution. *Energy and Buildings*, 42 :1674–1684, 2010.

- [115] A.L.S. Chan. Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in hong kong. *Energy and Buildings*, 43 :2860–2868, 2011.
- [116] S. Fatichi, V.Y. Ivanov, and E. Caporali. Simulation of future climate scenarios with a weather generator. *Advances in Water resources*, 34 :448–467, 2011.
- [117] Région limousin. Schéma régional climat air energie du limousin -atelier d'adaptation compte rendu. Technical report, GDF, HYDR087, Chambre régionale d'agriculture, . . . , 2011.
- [118] S. Varet. *Développement de méthodes statistiques pour la prédiction d'un gabarit de signature infrarouge*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2010.
- [119] A. Aïssani, A. Chateauneuf, and J-P. Fontaine. Reliability based design optimization of insulation systems considering climate change and workmanship. In T. (Ed). Haukaas, editor, *Proceedings of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12), Vancouver, Canada July 12-15*, 2015.
- [120] O. Bahn, A. Haurie, and R. Malhamé. A stochastic control for model for optimal timing of climate policies. *Automatica*, 44 :1545–1558, 2008.
- [121] Z. Lin and M.B. Beck. Accounting for structural error and uncertainty in a model : An approach based on model parameters as stochastic processes. *Environmental Modelling and software*, 27-28 :97–111, 2012.
- [122] M. Ozel. Cost analysis for optimum thickness and environmental impacts of different insulation materials. *Energy and Buildings*, 49 :552–559, 2012.
- [123] A.M. Papadopoulos. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37 :77–86, 2005.
- [124] M.J. Al-khawaja. Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation. *Applied thermal engineering*, 24 :2601–2610, 2004.
- [125] F.A. Ansari, A.S. Mokhtar, K.A. Abbas, and Adam. Simple approach for building cooling load estimation. *American journal of environmental science*, 3 :209–212, 2005.
- [126] N. Sisman, E. Kahya, N. Aras, and H. Aras. Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for turkey's different degree-day regions. *Energy Policy*, 35 :5151–5155, 2007.
- [127] C.K. Cheung, R.J. Fuller, and M.B. Luther. Energy efficient envelope design for high rise apartments. *Energy and Buildings*, 37 :37–48, 2005.
- [128] N. Daouas, Z. Hassen, and H. Ben Aissia. Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in tunisia. *Applied Thermal Engineering*, 30 :319–326, 2010.
- [129] B. Farhanieh and S. Sattari. Simulation off energy saving in iranian buildings using intergrative modemodel for insulation. *Renewable Energy*, 31 :417–425, 2006.
- [130] M.J. Al Khawaja. Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation. *Applied Thermal Engineering*, 24 :2601–2610, 2004.

- [131] M. Bojic, F. yik, and P. Sat. Influence of thermal insulation position in building envelope on the space cooling of high-rise residential buidlings in hong-kong. *Energy and Buildings*, 33 :569–581, 2001.
- [132] D.E.M. Bond, W.W. Clark, and M. Kimber. Configuring wall layers for improved insulation performance. *Applied Energy*, 112 :235–245, 2013.
- [133] H. Asan. Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *Energy and Buildings*, 32 : 197–203, 2000.
- [134] M. Hamdy, A. Hasan, and K. Siren. a multistage optimization method for cost optimal and nearly zero energy building solutions in line with the epbd- recast 2010. *Energy and Buildings*, 56 :189–203, 2013.
- [135] S.P. Corgnati, E. Fabrizio, M. Filippi, and V. Monetti. Reference buildings for cost optimal analysis. method of definition and application. *Applied Energy*, 102 : 983–993, 2013.
- [136] J. Yoon, E. Lee, and M. Krarti. Optimization of korean crop storage insulation systems. *Energy convers manage*, 40 :13–21, 1999.
- [137] A. Ucar. Thermoeconomic analysis method for optimization of insulation thickness for the four different climatic regions of turkey. *Energy*, 35 :1854–1864, 2010.
- [138] O. Arslan and R. Kose. Thermoeconomic optimization of insulation thickness considering condensed vapor in buildings. *Renewable Energy*, 35 :83–98, 2010.
- [139] M. Kayfeci, A. Keçebas, and E. Gedik. Determination of optimum insulation thickness of external walls with two different methods in cooling applications. *Applied thermal engineering*, 50 :217–224, 2013.
- [140] T.M.I. Mahlia, B.N. Taufiq, Ismail, and H.H. Masjuki. Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall. *Energy and Buildings*, 39 :182–187, 2007.
- [141] E. Quah and T.L. Boon. The economic cost of particulate air pollution on health in singapore. *Journal of Asian Economics*, 14 :72–90, 2003.
- [142] S. Carlucci and L. Pagliano. A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy and Buildings*, 53 : 194–205, 2012.
- [143] URL www.immobilier-danger.com/Faut-il-faire-des-travaux-pour-738.html.
- [144] Agence Internationale de l'énergie (AIE). Promoting energy efficiency investments : case studies in the residential sector. information paper. Technical report, 2008.
- [145] D.I. Kolaitis, E. Malliotakis, D.A. Kontogeogos, I. Mandilaras, D.I. Katsourinis, and M.A. Founti. Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retretrofit of residential buildings. *Energy and Buildings*, 64 :123–131, 2013.
- [146] URL www.meilleursagents.com/prix-immobilier/#estimates.

- [147] A. Aïssani, A. Chateaneuf, J-P. Fontaine, and Ph. Audebert. Cost model for optimum thicknesses of insulated walls considering indirect impacts and uncertainties. *Energy and Buildings*, 84 :21–32, 2014.
- [148] P. Breitkopf and R.F Coelho. *Multidisciplinary Design Optimization in Computational Mechanics*. ISTE Ltd and Wiley & sons, Inc, 2010.
- [149] URL mediakiosque.univ-pau.fr/avccourseaccess?id=3157.
- [150] URL <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2012/1065/prix-gaz-lelectricite-france-lunion-europeenne-2012.html>.
- [151] URL <http://rugc15.univ-pau.fr/live/vid%C3%A9o>.
- [152] F. Asdrubali and G. Baldinelli. Thermal transmittance measurements with the hot box method : calibration, experimental procedures and uncertainty analysis of three different approaches. *Energy and buildings*, 43(7) :1618–1626, 2011.
- [153] A.M. Hasofer and N.C. Lind. Exact and invariant second moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 100(1) :111–121, 1974.
- [154] A. Aïssani. *Modélisation et Simulation*. OPU- Numéro d'édition 4889, opu edition, 2007.
- [155] J. Ahmad. *Analyse modale des structures avec incertitudes par la méthode des éléments finis stochastiques spectrales*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, 2009.

ANNEXES

MÉTHODES DE CARACTÉRISATION

a.1 CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer les propriétés thermiques des matériaux, en particulier la conductivité et la diffusivité thermique. Ces méthodes sont classées en deux catégories :

1. **méthodes en régime permanent** : dans ce cas, le temps n'est pas considéré ; le rapport entre la différence de température et la quantité de chaleur qui traverse l'échantillon est directement mesuré.
2. **méthodes en régime transitoire** : ces méthodes prennent en considération le facteur temps et sont très rapides mais donnent des résultats moins précis.

a.1.1 Boîtes chaudes (Hot Box measurements) :

Ces boîtes chaudes sont considérées comme des outils de mesure fiables. L'échantillon est placé entre deux chambres maintenues à différentes températures de façon à assurer des conditions stationnaires. La résistance de l'échantillon est alors obtenue en mesurant la puissance nécessaire pour garder la chambre chaude à température constante (Figure A.1) [152]. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet l'intrusion d'autres flux de chaleur à travers les différentes surfaces.

a.1.2 Méthode de la plaque chaude gardée

C'est une méthode de mesure en régime stationnaire de la conductivité thermique des matériaux. Le principe de cette méthode est illustré sur la figure A.2. Les plaques extérieures sont réalisées en matériau très conducteur et sont maintenues à des températures constantes par circulation d'un fluide issu d'un bain thermostat. Une plaque chauffante délivre une puissance de chauffe uniforme et constante qui est transmise aux plaques extérieures à travers les échantillons.

La zone de garde est utilisée pour éviter les fuites latérales et sa température est réglée de telle sorte que sa température soit identique à celle de la partie centrale qui représente la zone de mesure.

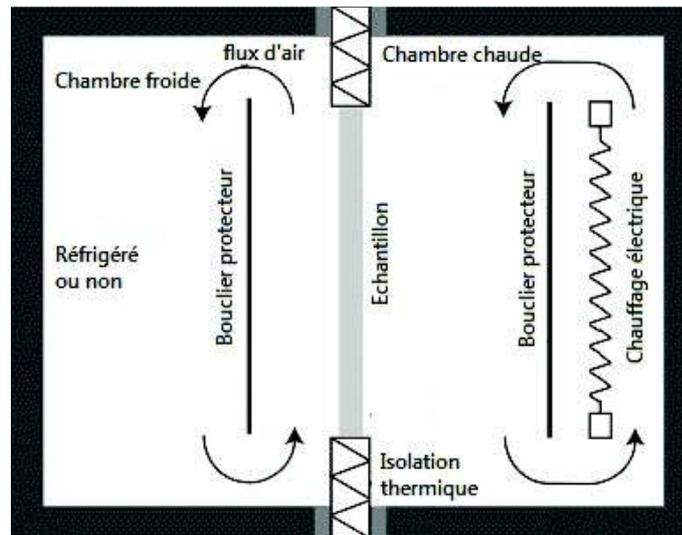


FIGURE A.1: Principe de la chambre chaude (Hot box) [44]

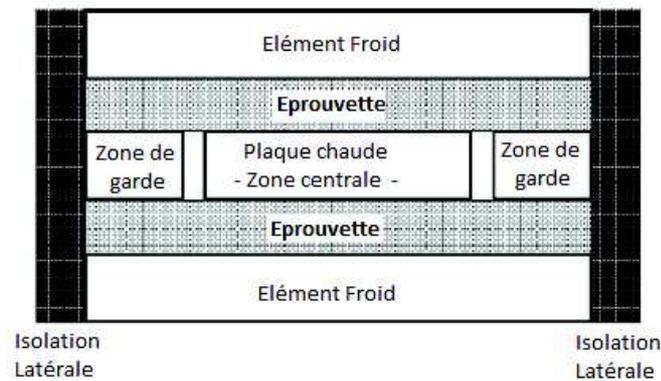


FIGURE A.2: Principe de la méthode de la plaque chaude gardée.

Des thermocouples sont placés sur les deux faces des échantillons pour mesurer les écarts de température. La conductivité thermique s'en déduit par la formule suivante :

$$\lambda = \frac{e\varphi_0}{S(\delta T \downarrow - \delta T \uparrow)} \quad (\text{A.1})$$

où S est la surface de la plaque chauffante, e est l'épaisseur de l'échantillon, φ_0 est le flux transmis à la zone centrale de la plaque chaude et $\delta T \downarrow$, $\delta T \uparrow$ sont les écarts de température sur l'échantillon en bas et en haut. Cette méthode est également considérée comme très fiable et donne d'excellents résultats avec moins de 3% d'incertitudes à l'état sec [46].

a.1.3 Méthode du fil chaud

C'est l'une des méthodes les plus utilisées en régime transitoire. Elle permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif, comme illustré sur la figure A.3.

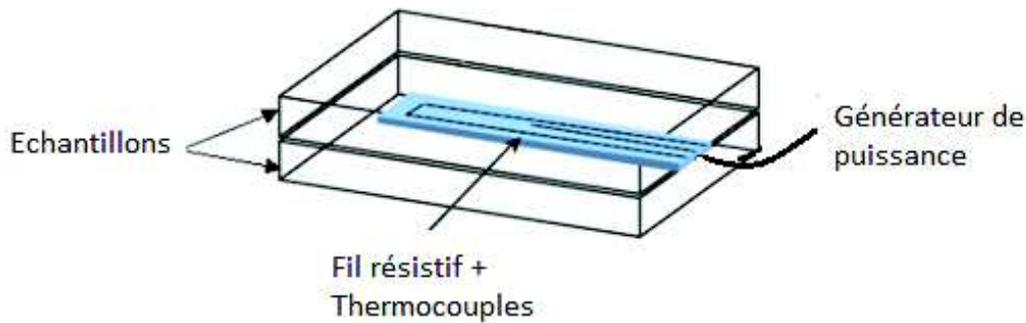


FIGURE A.3: Principe de la méthode du fil chaud.

a.1.4 Méthode de la tige chaude

La technique de la tige chaude est analogue à la méthode du « *fil chaud* », si ce n'est qu'elle est préconisée pour de gros volumes de matériau à caractériser.

a.1.5 Méthode de l'anneau chaud

Cette méthode permet de mesurer à la fois la conductivité thermique et d'estimer la diffusivité thermique du matériau. Elle suit le même mode opératoire que la méthode du fil chaud à la différence d'utiliser un anneau chauffant au lieu d'un fil.

a.1.6 Méthode du ruban chaud

Le ruban chaud correspond à une géométrie intermédiaire entre celle du fil chaud, celle du plan chaud et celle du plan chaud utilisé pour la mesure de l'effusivité des matériaux¹. Un ruban chaud peut tout simplement être obtenu avec une bande métallique résistive insérée entre les deux échantillons à caractériser (Figure A.4).

Le suivi de la température est effectué à l'aide de :

- soit la mesure locale de la température au centre du ruban ;
- soit la mesure de la température moyenne du ruban par la mesure de la résistance du ruban.

¹ La méthode du plan chaud est une méthode généralement utilisée pour la mesure de l'effusivité des matériaux. Une source thermique sous forme d'une nappe chauffante apporte l'énergie nécessaire pour perturber le matériau. La mesure de la température est effectuée dans le même plan, grâce à des thermocouples

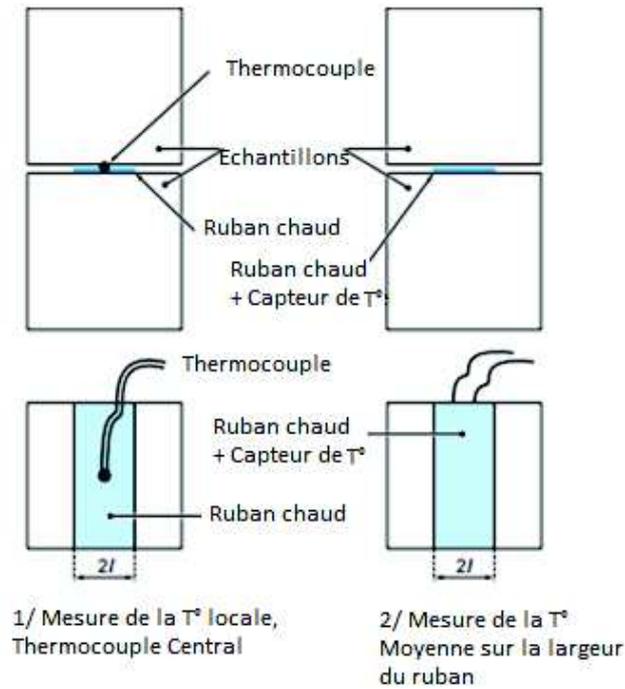


FIGURE A.4: Principe de la méthode du Ruban chaud.

a.1.7 Méthode Flash

Il s'agit d'une méthode de mesure en régime transitoire. On envoie sur une des faces d'un échantillon parallélépipédique un flux lumineux de forte puissance pendant un temps très court. Un thermocouple en contact avec la face arrière permet d'enregistrer l'élévation de la température à partir du moment où la face avant a reçu le flash (Figure A.5).

Flash : Eclairement très bref de la surface par des lampes à forte puissance

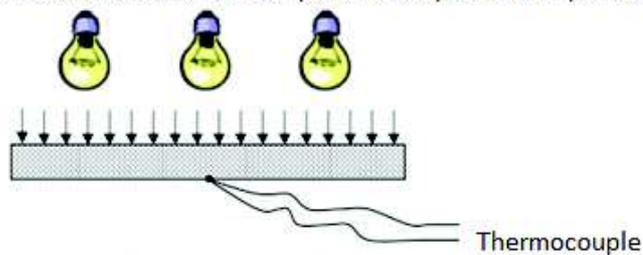


FIGURE A.5: Principe de la méthode Flash.

a.1.8 Méthode de la tri-couche

La méthode de la tri-couche permet l'estimation de la conductivité thermique des matériaux isolants très légers. Le dispositif expérimental en figure A.6 est constitué

d'un échantillon cylindrique du matériau à caractériser, inséré entre deux disques de laiton de même épaisseur et de même rayon. Deux thermocouples sont fixés sur la face extérieure de chaque disque en laiton. Le disque inférieur est en contact direct avec une résistance chauffante plane circulaire de même diamètre, placée sur un bloc isolant. On applique un flux d'une durée de quelques secondes à la résistance chauffante puis on relève les évolutions des températures $T_1(t)$ et $T_2(t)$ des deux disques en laiton.

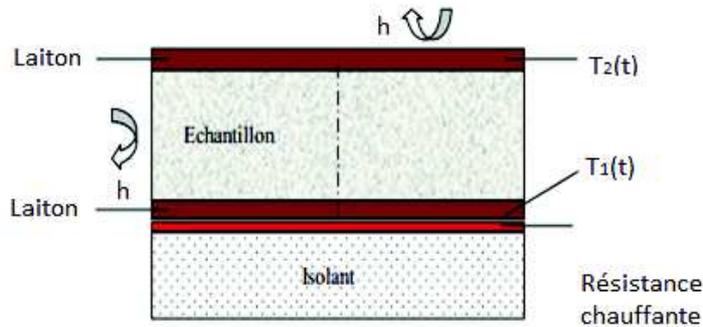


FIGURE A.6: Dispositif expérimental de la méthode de la Tri-Couches.

a.2 COEFFICIENT D'ÉCHANGE

Le coefficient d'échange h traduit de manière empirique les échanges de chaleur entre l'objet solide et le fluide extérieur. Il est cependant difficile de donner des valeurs de h car celles-ci varient fortement en fonction de la géométrie, du fluide et du type de convection. On distingue :

- la convection naturelle/libre : dans ce cas, la convection du fluide est mise en mouvement sous l'effet des différences de température à la surface d'échange uniquement ;
- la convection forcée : dans ce cas, le mouvement du fluide est induit par une source extérieure (présence d'un ventilateur, une pompe, etc).

La figure A.7 résume les différents types d'écoulement. Dans tous les cas, h est déduit du nombre de Nusselt Nu . Le flux de chaleur est donné par :

$$\frac{dQ}{dt} = h (T_{Mur} - T_{\infty}) dS \quad (A.2)$$

où $\frac{dQ}{dt}$ est le flux thermique en (W), h le coefficient d'échange (W/m^2K), $T_{Mur} - T_{\infty}$ est la différence de température entre la surface du mur T_{Mur} et le fluide T_{∞} , et S est la surface d'échange.

Le tableau A.1 présente les différents paramètres nécessaires au calcul de h en fonction du type d'écoulement.

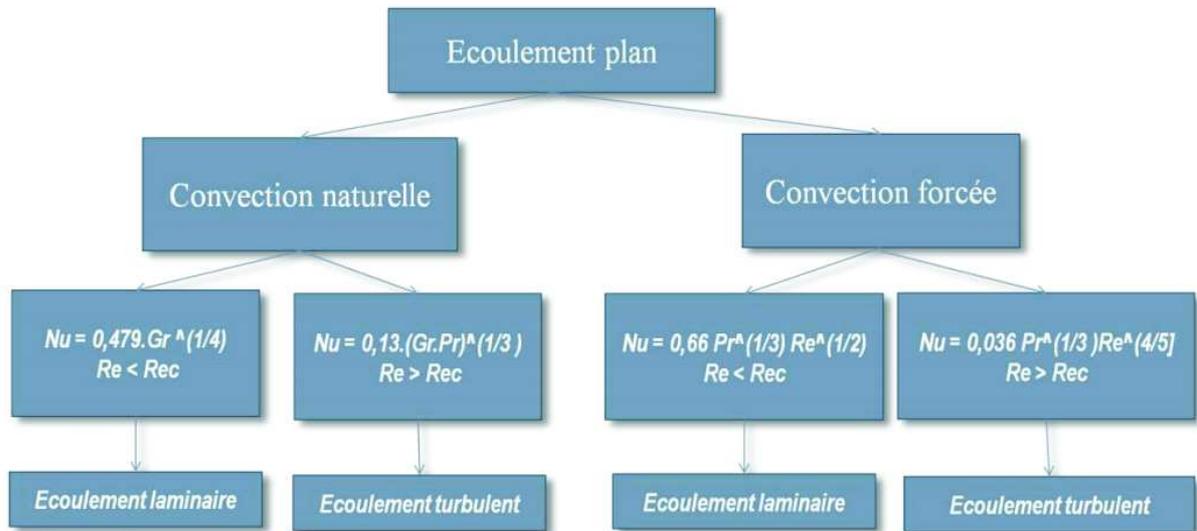


FIGURE A.7: Types de convection.

Paramètre	Coefficient	Formule
Nombre de Reynolds	Re	$\frac{V \times L}{\nu}$
Nombre de Reynolds Critique (Cas d'écoulement plan)	Re_c	3000
Nombre de Nusselt	Nu	$\frac{h \times d}{\lambda}$
Nombre de Grashof	Gr	$\frac{g \times d^2 \times \beta \times \Delta T}{\nu^2}$
Nombre de Prandtl	Pr	$\frac{\mu \times C_p}{\lambda}$
Vitesse de l'air [m/s]	V	
Chaleur spécifique de l'air [J/kg K]	C_p	
Conductivité thermique de l'air [W/mK]	λ	
Viscosité dynamique de l'air [kg/ms]	μ	
Viscosité cinématique de l'air [m ² /s]	ν	
Masse volumique de l'air [kg/m ³]	ρ	
Facteur de dilatation volumique de l'air [1 °K]	β	
Accélération de la pesanteur [m/s ²]	g	
Dimension caractéristique [m]	d	

Tableau A.1: Données thermo-physiques pour le calcul de h .

Annexe B

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous présentons dans cette annexe les résultats expérimentaux des analyses thermiques réalisées sur les isolants sains et défectueux, Par ailleurs, pour chaque lot étudié, la fonction de répartition de la conductivité thermique est comparée avec celle de la loi normale et log-normale.

b.1 MATÉRIAUX SAINS

b.1.1 Laine de Verre

b.1.1.1 Panneaux de 10 cm d'épaisseur

Laine de Verre 100 mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	111,3	25,32	0,045
2	110,6	20,64	0,040
3	112,2	24,54	0,038
4	107,8	24,52	0,038
5	110,9	21,62	0,039
6	110,5	20,52	0,038
7	106,9	23,12	0,039
Moyenne	110,03	22,43	0,0396
Écart-Type	1,932	2,285	0,00251
C.V.(%)	1,756	10,189	6,34
Données fabricant	100 mm	Inconnue	0,04

b.1.1.2 Panneaux de 7,5cm d'épaisseur

Laine de Verre 75mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	64,6	16,93	0,033
2	74,9	14,24	0,036
3	77,1	17,04	0,035
4	76,6	16,86	0,035
Moyenne	73,4	16,27	0,03475
Écart-Type	4,917824722	1,1723	0,0011
C.V.(%)	6,7	7,21	3,14
Données fabricant	75	Inconnue	0,032

b.1.1.3 Panneaux de 4,5cm d'épaisseur

Laine de Verre 45mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	49,0	16,59	0,048
2	50,7	18,45	0,046
3	48,35	17,39	0,050
4	46,8	19,01	0,050
5	49,5	19,95	0,050
Moyenne	48,87	18,278	0,0488
Écart-Type	1,29	1,1831	0,0016
C.V.(%)	2,64	6,47	3,28
Données fabricant	45	Inconnue	0,036

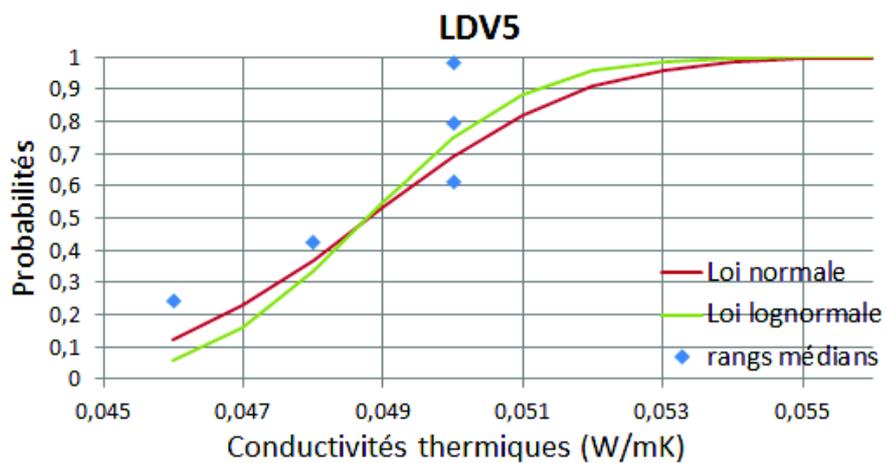
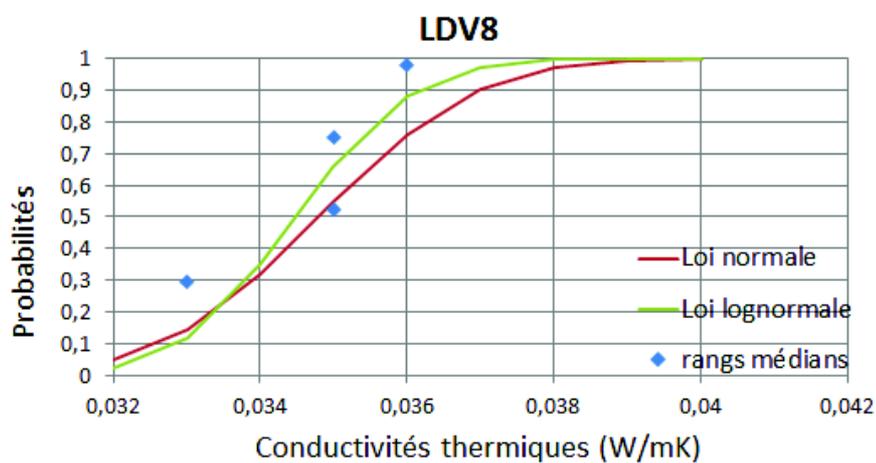
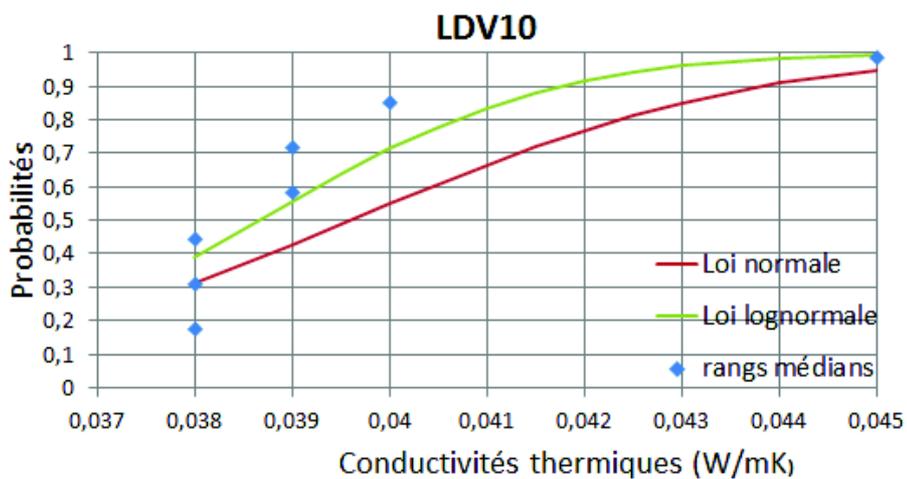


FIGURE B.1: Identification de la loi de distribution dans le cas de la laine de verre.

b.1.2 Polystyrène**b.1.2.1 Panneaux de 10cm d'épaisseur :**

Polystyrène 100 mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	99,5	12,71	0,049
2	99,5	12,72	0,045
3	99,3	12,76	0,045
4	100	12,8	0,039
5	99	12,82	0,039
6	99,5	12,83	0,044
7	99,25	12,86	0,044
Moyenne	99,44	12,78	0,044
Ecart-Type	0,3092	0,057	0,0035
C.V.(%)	0,31	0,45	8,15
Données fabricant	100	14	0,0385

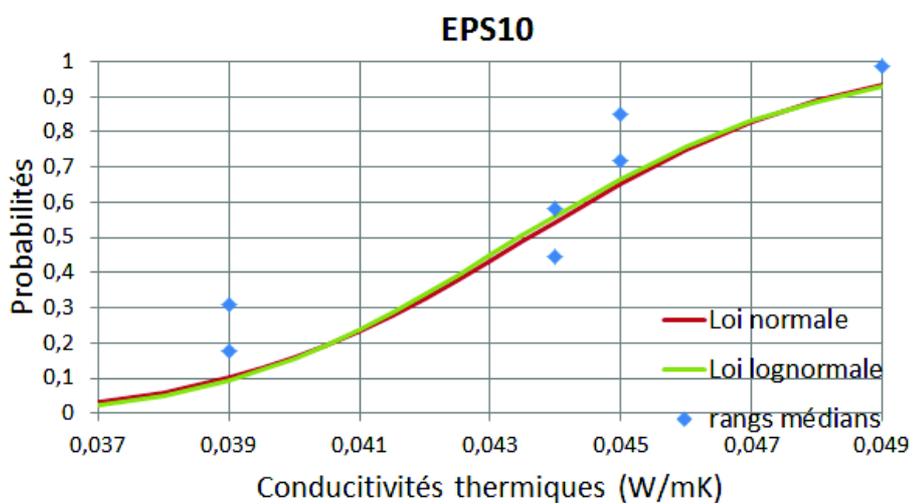
b.1.2.2 Panneaux de 5cm d'épaisseur

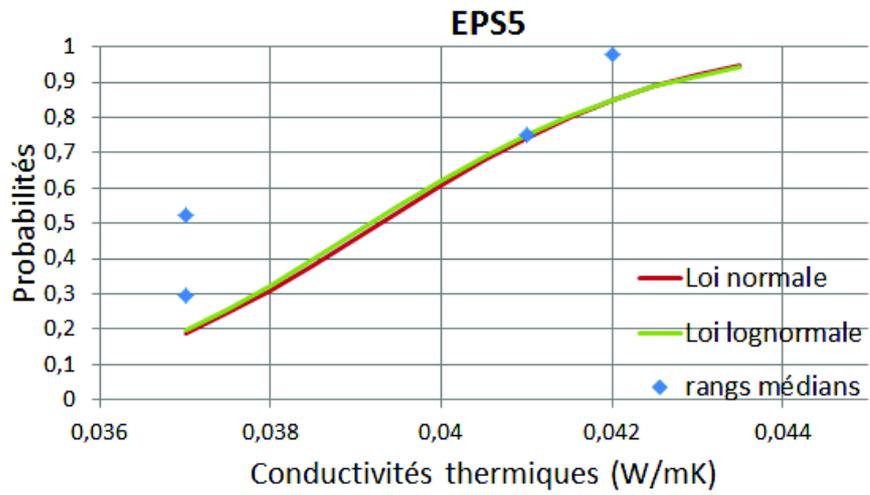
Polystyrène 50 mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique kg/m ³	Conductivité thermique [W/mK]
1	48,9	10,72	0,037
2	49,1	10,13	0,042
3	48,9	10,74	0,037
4	49,3	10,37	0,041
Moyenne	49,05	10,49	0,039
Ecart-Type	0,1915	0,294	0,0027
C.V.(%)	0,39	2,8	6,700
Données fabricant	50	Inconnue	0,036

b.1.2.3 Panneaux de 3cm d'épaisseur**b.1.2.4 Panneaux de 2cm d'épaisseur**

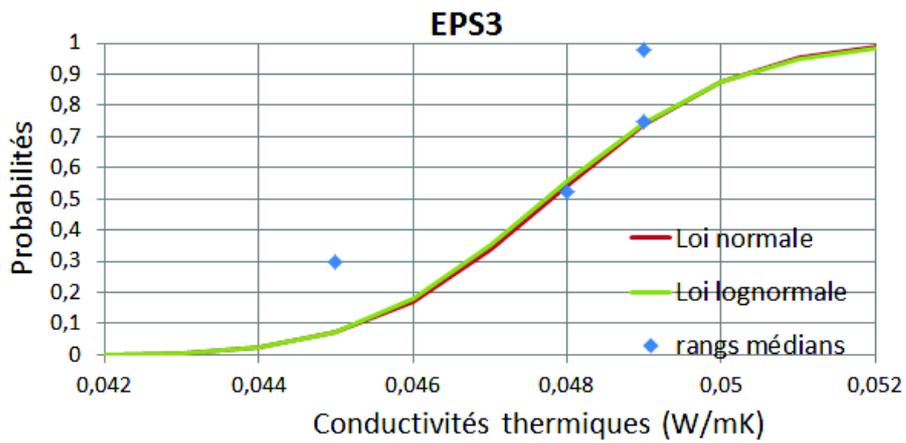
Polystyrène 30 mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	29,7	14,7	0,047
2	29,4	14,8	0,048
3	29,7	14,7	0,047
4	29,4	14,8	0,049
Moyenne	29,55	14,75	0,048
Ecart-Type	0,173	0,0577	0,0019
C.V.(%)	0,586	0,3914	3,96
Données fabricant	30	Inconnue	0,04

Polystyrène 20 mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	19,6	15,6	0,064
2	19,4	15,7	0,055
3	19,7	15,4	0,065
4	19,3	15,8	0,06
Moyenne	19,5	15,62	0,06
Ecart-Type	0,1826	0,171	0,004
C.V.(%)	0,94	1,093	7,032
Données fabricant	20	Inconnue	0,04

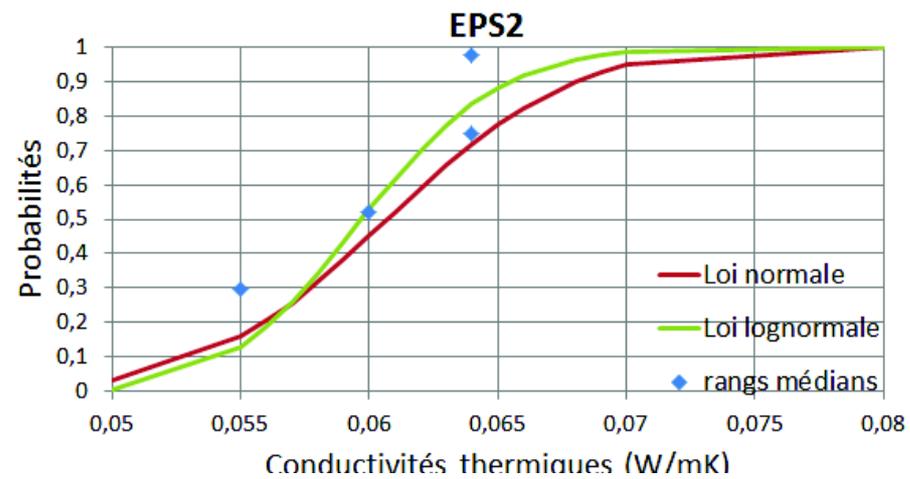




(b) EPS₅



(c) EPS₃



(d) EPS₂

FIGURE B.o: Identification de la loi de distribution dans le cas du Polystyrène.

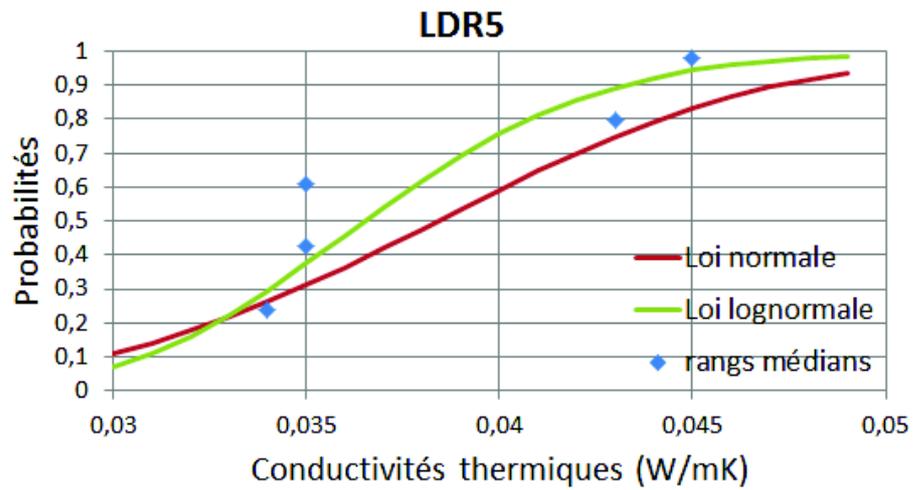
b.1.3 Laine de Roche

b.1.3.1 Panneaux de 5cm d'épaisseur

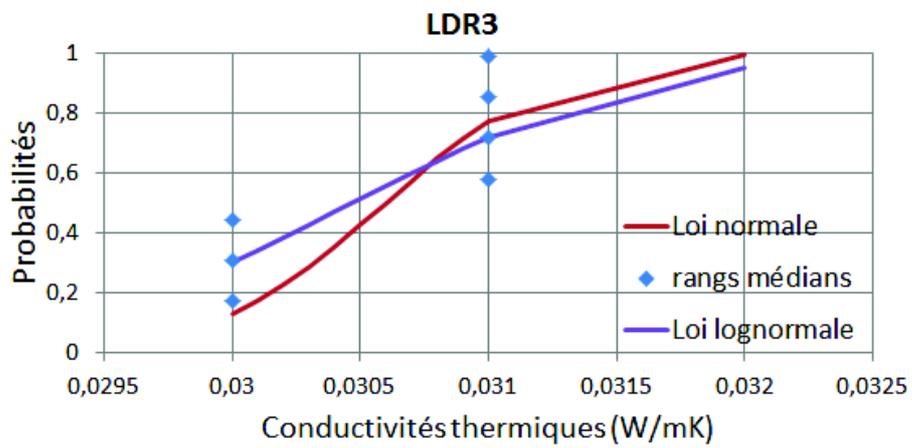
Laine de Roche 50 mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	57,5	62,48	0,035
2	56,8	55,56	0,034
3	58,2	60,23	0,035
4	57	55,7	0,045
5	57,8	54,31	0,043
Moyenne	57,46	57,66	0,0384
Ecart-Type	0,512	3,14	0,0046
C.V. (%)	0,801	5,45	12,06
Données fabricant	55	Inconnu	0,0354

b.1.3.2 Panneaux de 3cm d'épaisseur

Laine de Roche 30 mm	Épaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	28,4	37,011	0,030
2	28,5	37,013	0,031
3	29,6	37,056	0,031
4	28,7	39,107	0,031
5	28,8	39,641	0,03
6	29,5	41,29	0,03
7	29,3	41,36	0,031
Moyenne	28,97	38,92	0,0306
Ecart-Type	0,489	1,95	0,0005
C.V. (%)	1,687	5,02	1,75
Données fabricant	30	Inconnue	0,035



(a) LDR₅



(b) LDR₃

FIGURE B.1: Identification de la loi de distribution dans le cas de la laine de verre.

b.1.4 Polyuréthane

Polyuréthane 40 mm	Epaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1	39,2	28,54	0,024
2	39,6	29,47	0,023
3	39,5	29,84	0,025
4	39,7	29,8	0,026
5	39,3	29,14	0,027
Moyenne	39,46	29,36	0,025
Ecart-Type	0,185	0,48	0,0014
C.V.(%)	0,47	1,64	5,66
Données fabricant	40	33	0,022

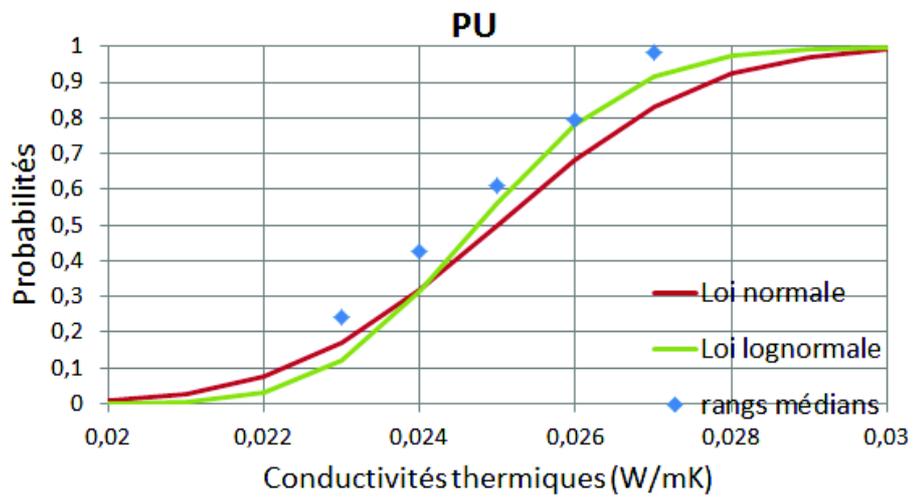


FIGURE B.2: Identification de la loi de distribution dans le cas du polyuréthane.

b.2 ISOLANTS DÉFECTUEUX

b.2.1 Rainures

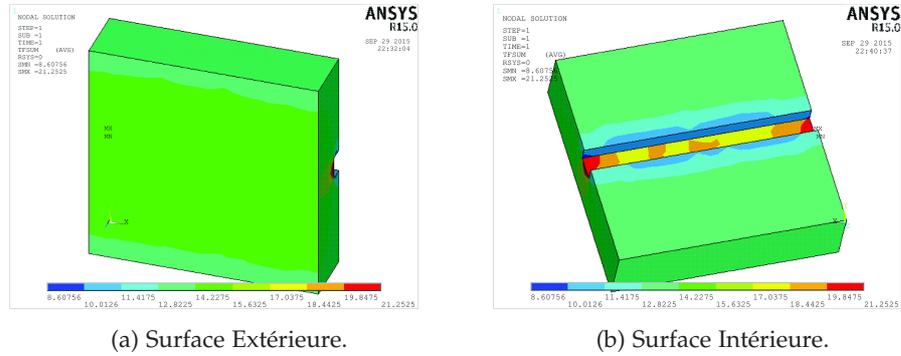


FIGURE B.3: Flux de chaleur à travers un échantillon d'épaisseur 8cm / Rainure $w_d = 3\text{cm} \times t_d = 2\text{cm}$.

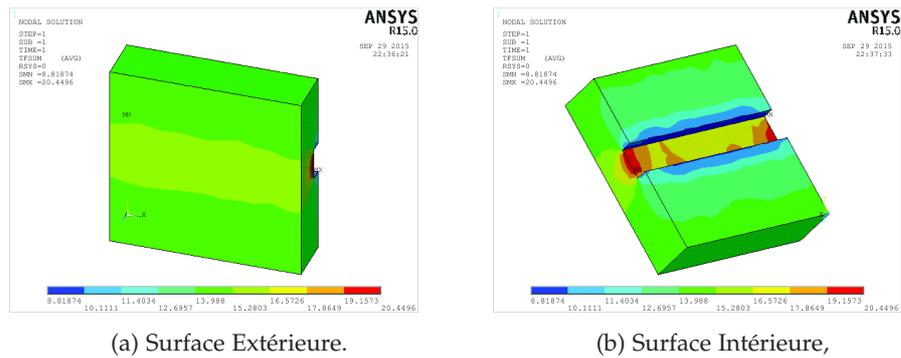


FIGURE B.4: Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=8\text{cm}$ / Rainure $w_d = 5\text{cm} \times t_d = 2\text{cm}$.

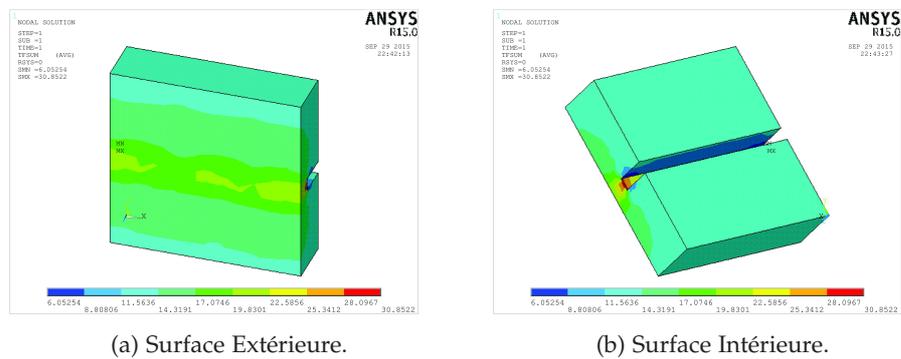
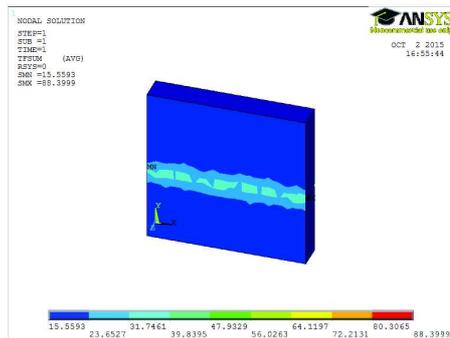
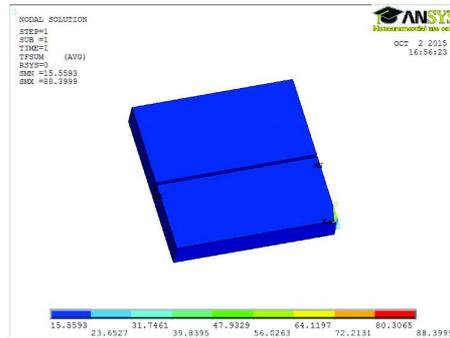


FIGURE B.5: Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=8\text{cm}$ / Rainure $w_d = 2\text{cm} \times t_d = 5\text{cm}$.

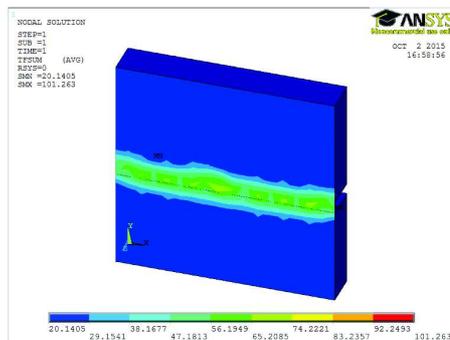
b.2.2 Ouvertures



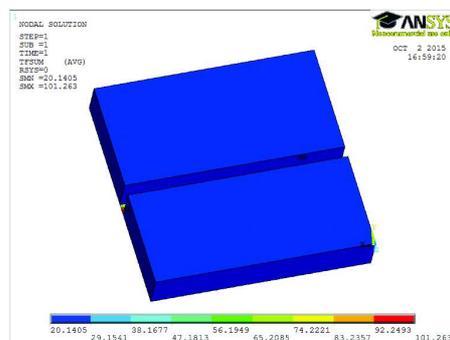
(a) Surface Extérieure.



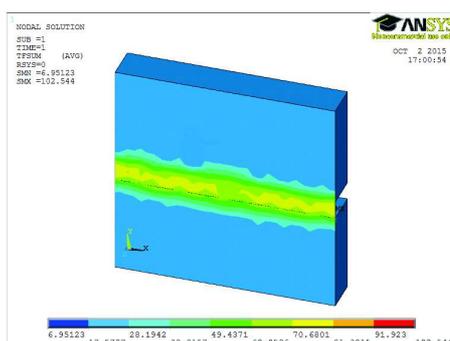
(b) Surface Intérieure.

FIGURE B.6: Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=5\text{cm}$ / Ouverture $w_d = 0,5\text{cm}$.

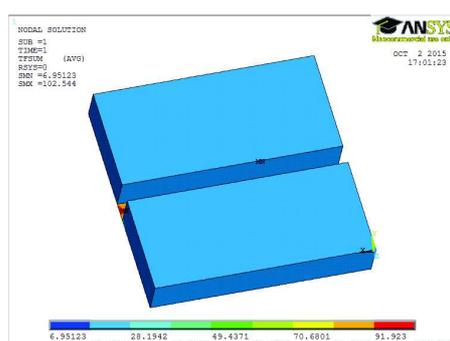
(a) Surface Extérieure.



(b) Surface Intérieure.

FIGURE B.7: Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=5\text{cm}$ / Ouverture $w_d = 1,5\text{cm}$.

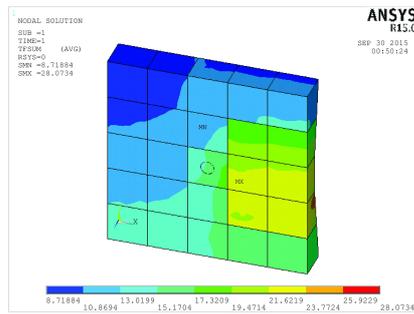
(a) Surface Extérieure.



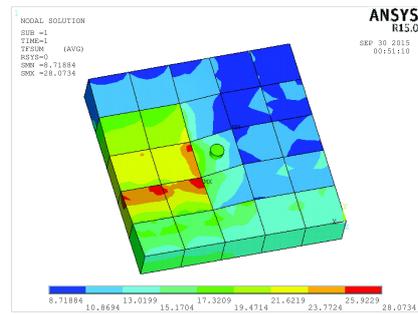
(b) Surface Intérieure.

FIGURE B.8: Flux de chaleur à travers un échantillon $ep=5\text{cm}$ / Ouverture $w_d = 2,5\text{cm}$.

b.2.3 Passage de fils



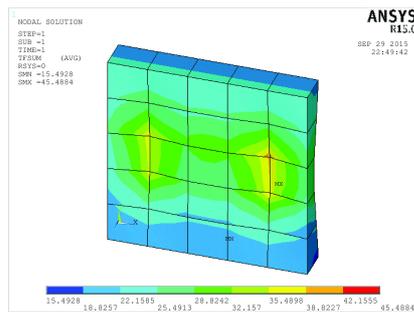
(a) Surface Extérieure.



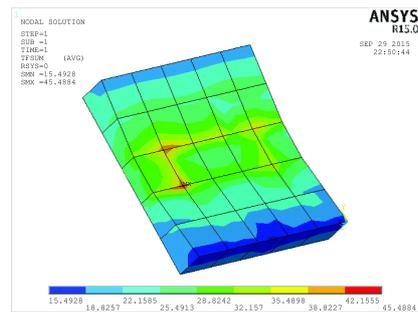
(b) Surface Intérieure.

FIGURE B.9: Flux de chaleur à travers un échantillon $e_p=8\text{cm}$ / Passage d'une gaine de $\Phi = 2\text{cm}$.

b.2.4 Écrasement



(a) Surface Extérieure.



(b) Surface Intérieure.

FIGURE B.10: Flux de chaleur à travers un échantillon $e_p=8\text{cm}$ / Écrasement 2 cm.

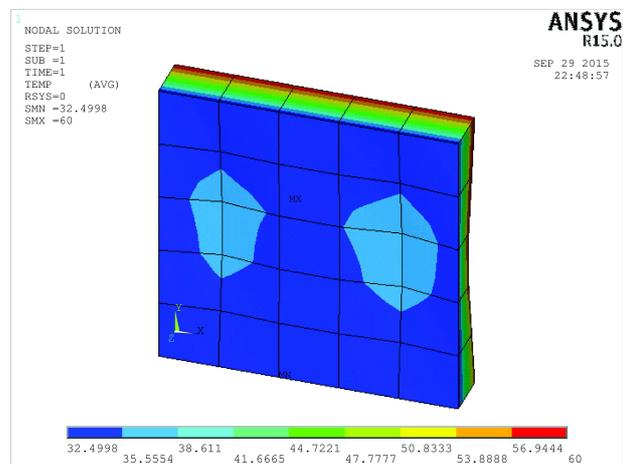


FIGURE B.11: Temperature extérieure en surface extérieure.

EVALUATION DE LA PROBABILITÉ DE DÉFAILLANCE

L'approche fiabiliste permet d'introduire une mesure quantitative du risque de défaillance, au moyen d'une démarche probabiliste pour la modélisation des incertitudes et des aléas. Selon Hasofer and Lind (1974) [153] l'utilisation de la théorie de fiabilité permet d'*apporter une précision supplémentaire*. En contexte structural, elle consiste à *placer le concept de la sûreté des structures dans le royaume de la réalité physique où il n'y a pas d'absolu, et où la connaissance n'est pas parfaite* [31].

Différentes méthodes de résolution peuvent être utilisées pour l'estimation de la probabilité de défaillance. Dans cette annexe, nous présentons tout d'abord, les deux types d'incertitudes que nous utilisons puis nous détaillons la méthode d'approximation que nous utilisons pour l'évaluation de la probabilité de défaillance.

c.1 MODÉLISATION PROBABILISTE DE L'INCERTITUDE

En général, modéliser l'incertitude peut prendre du temps et peut consommer beaucoup d'effort dans la conception, mais il permet de fournir des solutions de conception plus robustes. L'utilisation des méthodes probabilistes pour modéliser les incertitudes permet d'apporter aux outils d'aide à la conception, des informations additionnelles sur les paramètres utilisés. Cependant, pour pouvoir modéliser l'incertitude, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance physique et statistique des paramètres du modèle utilisé.

Les méthodes probabilistes sont les plus utilisées pour la modélisation des incertitudes, et l'évaluation de la variabilité des sorties des modèles. Elles sont très séduisantes car elles permettent de prendre en compte un très large spectre d'incertitudes. Trois types de paramètres incertains peuvent être introduits dans les modèles :

- **les variables aléatoires** à valeurs dans \mathbf{R} , qui sont généralement caractérisées par une densité de probabilité. La corrélation entre les variables est quant à elle caractérisée par une loi conjointe de probabilité ou par des matrices de corrélation ;
- **les processus stochastiques** sont des fonctions qui dépendent de l'aléa et du temps ; les processus sont caractérisés par leur moyenne, leur variance et par une fonction de covariance entre deux instants donnés ;
- **les champs stochastiques** sont des fonctions à valeurs dans \mathbf{R} et dépendent quant à eux de l'aléa et de l'espace ; les champs stochastiques sont à l'espace ce que les processus sont au temps.

c.1.1 Variables aléatoires

La théorie des probabilités vise à associer à chaque événement sa probabilité d'occurrence. Une variable aléatoire X est une application $\mathbf{X} : (\Theta, \mathcal{F}, \mathcal{P}) \rightarrow \mathbf{R}$. Θ étant l'ensemble de tous les résultats d'une expérience aléatoire ; \mathcal{F} étant l'ensemble de tous les événements possibles ayant une probabilité et \mathcal{P} étant la mesure de probabilité. Chaque variable aléatoire continue est définie par sa densité de probabilité $f_X(x)$. Un vecteur aléatoire X est un vecteur de variables aléatoires.

L'espérance mathématique est notée $E[X]$. La moyenne μ_X , la variance ainsi que le $n^{\text{ème}}$ moment de X sont :

$$\mu_X \equiv E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx \quad (\text{C.1})$$

$$\sigma^2 = E[(X - \mu_X)^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^2 f_X(x) dx \quad (\text{C.2})$$

$$E[X^n] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n f_X(x) dx \quad (\text{C.3})$$

La covariance de deux variables aléatoires X et Y est définie par :

$$\text{Cov}[X, Y] = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)(y - \mu_Y) f_{X,Y}(x, y) dx dy \quad (\text{C.4})$$

Le coefficient de corrélation entre ces deux variables est alors :

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{Cov}[X, Y]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (\text{C.5})$$

Lors de la simulation des performances énergétiques, cinq lois de probabilité peuvent être considérées : la loi uniforme discrète, la loi uniforme, la loi normale, la loi log-normale et la loi triangulaire [3]. Le tableau C.1 regroupe les avantages de chaque distribution.

Distribution	Avantages	Inconvénients
Discrète	Flexible	Difficile à définir
Uniforme	Distribution continue et simple	Insiste sur les extrêmes
Normale	Connue	Peut entraîner des valeurs négatives
Log-normale	Valeurs positives uniquement	Peut entraîner des valeurs positives extrêmes
Triangulaire	Facile à définir	Insiste sur les extrêmes

Tableau C.1: Fonctions de distribution de probabilité [3].

Dans ce travail, nous nous intéressons particulièrement aux lois normale et log-normale. En général, il est très courant de modéliser les paramètres incertains par des variables de loi normale. Cependant, le domaine de définition de cette loi constitue l'ensemble des réels, admettant des réalisations négatives, ce qui ne peut être envisageable physiquement surtout lorsqu'il s'agit de conductivité thermique ou de masse volumique.

1. **Loi Normale** : la densité de probabilité de la loi normale s'écrit sous la forme :

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left(-\frac{(x - \mu_X)^2}{2\sigma_X^2}\right) \quad (\text{C.6})$$

où : $\mu = E[X]$ est l'espérance et $\sigma = E[(X - E[X])^2]^{\frac{1}{2}}$ l'écart-type de la variable aléatoire X ainsi définie.

2. **Loi Log-Normale** : la loi lognormale est une loi du logarithme d'une variable normale, définie sur le domaine \mathbb{R}^+ . Ainsi une variable aléatoire X est dite suivre une loi lognormale de paramètres μ_X et σ_X , si la variables $Y = \ln x$ suit une loi normale de paramètres μ et σ .

La loi log-normale admet une densité de probabilité de la forme :

$$f(x) = \frac{1}{y\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (\text{C.7})$$

L'espérance μ_X et l'écart-type σ_X étant reliés aux paramètres μ_y et σ_y par les expressions :

$$\mu_X = \exp\left(\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right) \quad (\text{C.8})$$

$$\sigma_X = (\exp(\sigma_y^2) - 1) \exp(2\mu_y + \sigma_y^2) \quad (\text{C.9})$$

c.1.2 Processus aléatoires

Un processus stochastique est une famille de variables aléatoires $X_{t \in T}$ indexées sur le temps t . Alors qu'une variable aléatoire X associée à chaque $\omega \in \Theta$ une réalisation $X(\omega)$, un processus stochastique $X_{t \in T}$ associé à chaque ω une fonction (ou trajectoire) $X_t(\omega)_{t \in T}$ (Figure C.1).

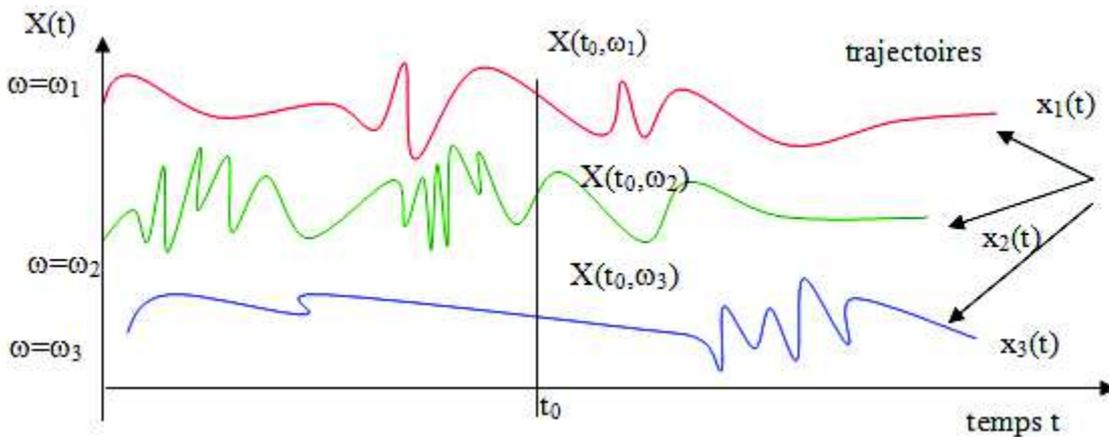


FIGURE C.1: Trajectoires du processus aléatoire X_t [154].

Il est difficile de connaître les lois fini-dimensionnelles des processus stochastiques, à l'exception des processus markoviens et gaussiens [154].

Considérons un processus aléatoire $H(x)$ défini comme un ensemble de variables aléatoires indexées sur le temps t . A x_0 fixé, $H(x_0)$ est une variable aléatoire. Si maintenant, $H(x_0)$ est un *vecteur* de variables aléatoires, $H(x)$ est alors un processus aléatoire *vectoriel*. Un processus aléatoire est dit gaussien si n'importe quel vecteur $\{H(x_1), \dots, H(x_n)\}$ est un vecteur gaussien. Un processus aléatoire gaussien est complètement défini par sa moyenne $\mu(x)$, sa variance $\sigma^2(x)$ et sa fonction d'autocovariance $C(x_1, x_2)$:

$$C(x_1, x_2) = \text{Cov}[H(x_1), H(x_2)] \quad (\text{C.10})$$

La fonction d'auto-corrélation est définie par :

$$\rho(x_1, x_2) = \frac{C(x_1, x_2)}{\sigma(x_1)\sigma(x_2)} \quad (\text{C.11})$$

En modélisation, la représentation d'un processus consiste à remplacer une quantité aléatoire par un ensemble de variables aléatoires. Autrement dit, il faudra discrétiser le processus en approximant $H(x)$ par $\widetilde{H}(x)$ défini par un ensemble fini de variables aléatoires $\xi_i(\theta), i = 1, \dots, n$:

$$H(x) \approx \widetilde{H}(x) \quad (\text{C.12})$$

Différentes méthodes de discrétisation peuvent être utilisées. Le rapport de Sudret and Der Kiurighian (2000) [33] détaillent les différentes méthodes de discrétisation qu'elles soient discrètes ou fonctionnelles.

- **Discrétisation de Karhunen-Loève :**

La discrétisation de Karhunen-Loève d'un processus $H(\cdot)$, permet de le représenter en une partie déterministe ($\mu(x)$) et une partie aléatoire décomposée sur la base de valeurs propres λ_i et de fonctions propres $f_i(x)$ de la fonction d'autocovariance $C_{HH}(x, x') = \sigma(x)\sigma(x')\rho(x, x')$. Ces fonctions et valeurs propres sont la solution du problème suivant [33] :

$$\forall i =, \dots \quad \int_{\Omega} C_{HH}(x, x') \varphi_i(x') d\Omega_{x'} = \lambda_i \varphi_i(x) \quad (\text{C.13})$$

Le noyau $C_{HH}(\cdot, \cdot)$ est bornée, symétrique et défini positif. L'ensemble des $\{\varphi_i\}$ forme une base complète orthogonale de l'espace des fonctions carrées intégrables $L^2(\Omega)$. Les valeurs propres sont réelles, positives et en nombre fini. Le processus $H(\cdot)$ peut alors être défini sur la base suivante :

$$H(x, \theta) = \mu(x) + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} \xi_i(\theta) \varphi_i(x) \quad (\text{C.14})$$

où $\xi_i(\theta), i = 1, \dots$ sont les coordonnées de la réalisation du processus aléatoire vis-à-vis de l'ensemble des fonctions déterministes φ_i .

En calculant $\text{Cov}[H(x), H(x')]$ à partir de l'équation (C.4) et en imposant l'égalité à $C_{HH}(x, x')$, nous avons :

$$E(\xi_k \xi_l) = \delta_{kl} \quad (\text{symbole de Kronecker}) \quad (\text{C.15})$$

Cela signifie que la famille des $\{\xi_i\}_{i=1}^{\infty}$ forme un ensemble orthonormal de variables aléatoires en termes de produit scalaire. La discrétisation que nous venons de présenter vérifie les propriétés suivantes [33, 155] :

- En l'absence de valeurs propres multiples (excepté éventuellement 0), il est possible de les classer en une suite décroissante convergente vers 0. En tronquant la série précédente (C.14) à un ordre M , l'approximation de Karhunen-Loève du processus s'écrit :

$$\tilde{H}(x, \theta) = \mu(x) + \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} \xi_i(\theta) \phi_i(x) \quad (\text{C.16})$$

- La base des fonctions propres de la fonction d'autocovariance est optimale au sens des moindres carrés de l'erreur (intégrée sur Ω) due à la troncature à un ordre M .
- L'ensemble des variables aléatoires qui apparaissent dans l'équation (C.14) est orthonormal, c'est-à-dire qu'elles vérifient (C.15) si et seulement si les fonctions de bases ϕ_i et les constantes λ_i sont des solutions du problème aux valeurs propres (C.13).
- Étant donné que les fonctions propres sont orthonormales, il est facile d'obtenir une expression de chaque variable aléatoire qui apparaît dans la série :

$$\xi_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \int_{\Omega} [H(x) - \mu(x)] \phi_i(x) dx \quad (\text{C.17})$$

Dans ce cas, quand $H(\cdot)$ est un processus gaussien (représentant généralement le contexte naturel), chaque variable aléatoire ξ_i est une variable aléatoire gaussienne. Il s'ensuit que les $\{\xi_i\}_{i=1}^{\infty}$ forment un ensemble de variables aléatoires gaussiennes indépendantes. De plus, la discrétisation de Karhunen-Loève d'un processus gaussien converge quasiment toujours.

c.2 MÉTHODE D'APPROXIMATION DE LA PROBABILITÉ DE DÉFAILLANCE

Les méthodes de fiabilité visent à évaluer la *probabilité de défaillance* d'un système dont la modélisation prend en compte le caractère aléatoire de ses paramètres. L'estimation de cette probabilité de défaillance n'est pas une tâche aisée, néanmoins des méthodes de résolution existent. D'une façon générale, ces méthodes sont basées soit sur une intégration numérique, soit sur des approximations.

Nous nous sommes intéressés aux méthodes d'approximation utilisées pour l'évaluation de la probabilité de défaillance. Différents niveaux d'approximation sont possibles, en fonction de la caractérisation de la fonction d'état limite. Les méthodes du premier et du second ordre **FORM/SORM (First Order Reliability Method/Second Order Reliability Method)** sont les plus connues, et sont souvent très efficaces pour le calcul de la fiabilité [31].

Ces méthodes sont basées sur la recherche du *point de conception*, appelé aussi le *Point de Défaillance le Plus Probable* (Most Probable Failure Point (MPFP)), dont la connaissance est à la base des approximations de la probabilité de défaillance avec les méthodes FORM/SORM.

c.3 CADRE MÉTHODOLOGIQUE

La recherche du point de conception MPFP nécessite le calcul de l'indice de fiabilité d'*Hasofer-Lind* [32]. Deux étapes sont alors nécessaires :

- le passage des variables physiques aux variables normées, centrées et indépendantes ;
- la recherche de la distance de l'origine à la frontière de l'état limite dans l'espace standard.

Supposons une transformation suffisamment régulière $T : X \rightarrow U$ qui permet de transformer l'espace X des variables physiques en un espace U des variables normées. Cette transformation, appelée **transformation isoprobabiliste**, est réversible. Si les variables aléatoires sont indépendantes, une transformation T standard existe ce qui simplifie le problème.

La connaissance d'une forme explicite de la fonction d'état limite $G(X_i) = 0$ n'est pas nécessaire, il suffit de disposer d'un moyen permettant de calculer une réalisation $G(x_i)$ pour une réalisation x_i . La fonction d'état limite sépare le domaine des variables physiques en deux sous-domaines, le domaine de sûreté et le domaine de défaillance (Figure C.2). Par convention, nous admettons :

$$\text{Domaine de sûreté : } G(X) > 0 \quad \text{Domaine de défaillance : } G(X_i) \leq 0 \quad (\text{C.18})$$

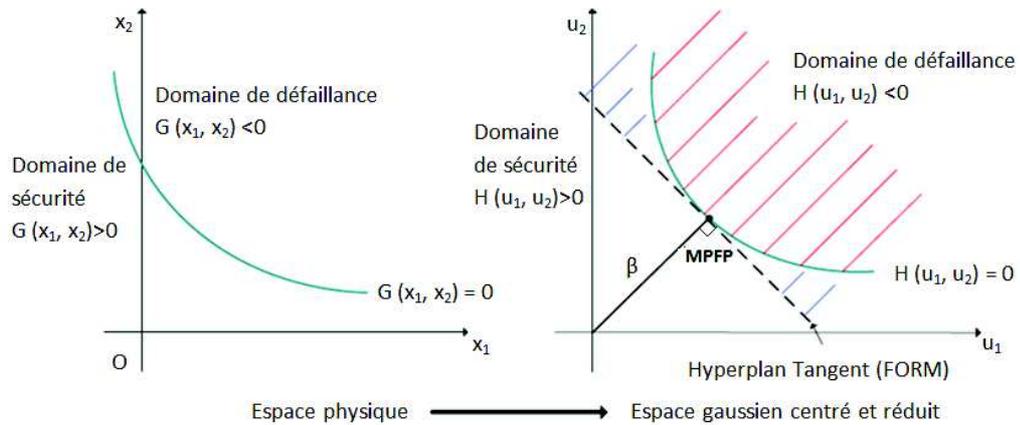


FIGURE C.2: Transformation iso-probabiliste et définition du point MPFP.

La fonction composée $H = G \circ T^{-1}$ définie par l'inéquation $H(u) \leq 0$, $u \in U$, le domaine de défaillance D_f dans l'espace des variables normées. Notons la frontière de D_f par δD_f . Par construction de T , on a l'égalité :

$$P_f = \text{Prob}(\tilde{D}_f) = \int_{\tilde{D}_f} \phi_n(u) d\text{vol}(u) \quad (\text{C.19})$$

où P_f est la probabilité de défaillance, $\text{Prob}(\tilde{D}_f)$ est la probabilité associée au domaine $\tilde{D}_f = T^{-1}(D_f)$ dans l'espace X , ϕ_n est la densité de probabilité Gaussienne multidimensionnelle centrée réduite et non corrélée :

$$\phi_n(u) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \exp\left(-\frac{\|u\|^2}{2}\right) \quad (\text{C.20})$$

où $\|\cdot\|$ désigne la norme Euclidienne dans l'espace U . La frontière D_f doit être une hyper-surface suffisamment différentiable, au moins au point de conception. Le point MPFP réalisant le minimum de la distance de D_f à l'origine, doit être unique.

Hasofer et Lind [32] ont montré que la mesure de l'indice de fiabilité doit être prise dans l'espace des variables Gaussiennes normées :

$$u_i = T_i(x_j) \quad \text{et} \quad H(u_i) = G(T_j^{-1}(u_i)) \quad (\text{C.21})$$

L'indice de fiabilité est alors le minimum de la distance entre l'origine des variables u_i et le domaine $H(u_i) \leq 0$, ce qui s'écrit sous la forme d'un problème de minimisation :

$$\beta = \min \sqrt{u^t u} \quad \text{sous la contrainte} \quad H(u_i) \leq 0 \quad (\text{C.22})$$

c.4 TRANSFORMATION ISO-PROBABILISTE

Les variables aléatoires considérées dans cette études sont considérées comme indépendantes. Nous ne présentons que le cas de la construction de T en présence de variables indépendantes uniquement.

c.4.1 Variables indépendantes

Dans le cas simple de variables gaussiennes indépendantes, la transformation de l'espace physique vers l'espace normée est immédiate :

$$x_i \xrightarrow{T} u_i = \frac{x_i - m_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (\text{C.23})$$

Il s'agit dans ce cas d'une transformation linéaire qui associe une loi gaussienne pour x_i à une loi gaussienne standard (de moyenne nulle et de variance unitaire $N \sim (0, 1)$) pour u_i .

c.4.2 Variables quelconques indépendantes

Si les variables X_i sont indépendantes de lois quelconques de fonction de répartition $F_{X_i}(x_i)$, il est possible d'écrire la transformation T en écrivant l'égalité des probabilités pour les variables x_i et u_i , d'où le nom de *transformation iso-probabiliste* :

$$x_i \xrightarrow{T} u_i \text{ définie par : } \Phi(u_i) = F_{X_i}(x_i) \quad (\text{C.24})$$

et donc :

$$x_i \xrightarrow{T} u_i = \Phi^{-1}(F_{X_i}(x_i)) \quad (\text{C.25})$$

Réciproquement, si F_{X_i} est inversible pour tout x_i , la transformation inverse est définie par :

$$u_i \xrightarrow{T^{-1}} x_i = F_{X_i}^{-1}(\Phi(u_i)) \quad (\text{C.26})$$

c.5 ALGORITHME D'OPTIMISATION -ALGORITHME HLRF (HASOFER-LIND-RACKWITZ-FIESSLER)

Nous détaillons à présent l'algorithme de fiabilité utilisé pour la résolution du problème d'optimisation (C.22). L'algorithme HLRF est l'un des plus utilisés et nécessite le calcul du gradient de la fonction d'état limite, qui est effectué numériquement par un schéma de différences finies.

Dans le cas où la fonction à dériver n'est pas explicite et la transformation T est connue, nous avons :

$$\frac{\delta H(\mathbf{u})}{\delta \mathbf{u}_i} = \frac{\delta G(\mathbf{x})}{\delta x_i} \frac{\delta x_i}{\delta \mathbf{u}_i} = \frac{\delta G(\mathbf{x})}{\delta x_i} \frac{\delta T^{-1}(\mathbf{u}_i)}{\delta \mathbf{u}_i} \quad (\text{C.27})$$

Les deux termes évalués par une formule de différences finies :

$$\frac{\delta G(\mathbf{x})}{\delta x_i} \approx \frac{G(x_1, \dots, x_i + \delta x_i, \dots, x_n) - G(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\delta x_i} + O(\delta x_i^2) \quad (\text{C.28})$$

et :

$$\frac{\delta T^{-1}(\mathbf{u}_i)}{\delta \mathbf{u}_i} \approx \frac{T^{-1}(\mathbf{u}_i + \delta \mathbf{u}_i) - T^{-1}(\mathbf{u}_i)}{\delta \mathbf{u}_i} \quad (\text{C.29})$$

Lorsque δx_i tend vers zéro, les termes du premier ordre tendent vers les valeurs exactes des dérivées partielles. Le point MPFP correspond au point de conception \mathbf{u}^* dans l'espace normé et il est proportionnel au vecteur unitaire α^* normal à la surface de défaillance en MPFP, soit :

$$\mathbf{u}^* = -\beta \alpha^* \quad (\text{C.30})$$

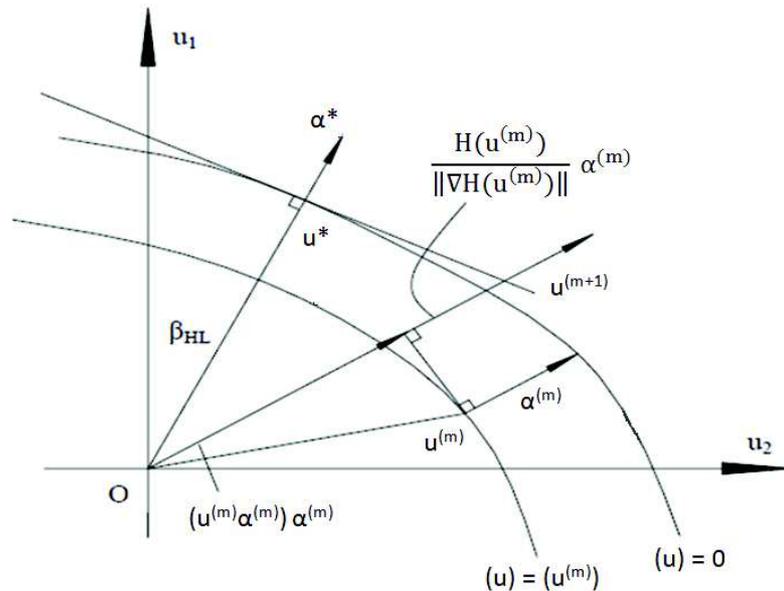


FIGURE C.3: Illustration de l'algorithme d'optimisation (HLRF).

Le point de conception est déterminé comme la limite d'une séquence de $(\mathbf{u}^{(0)}, \mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}, \dots, \mathbf{u}^{(n)})$. Le vecteur unitaire normal à la surface défini par $H(\mathbf{u}) = H(\mathbf{u}^{(m)})$ au point $\mathbf{u}^{(m)}$ est noté $\alpha^{(m)}$. Ce vecteur est parallèle au vecteur gradient en $\mathbf{u}^{(m)}$ et dirigé vers le domaine de défaillance :

$$\alpha^{(m)} = -\frac{\nabla H(\mathbf{u}^{(m)})}{\|\nabla H(\mathbf{u}^{(m)})\|} \quad (\text{C.31})$$

où $\nabla H(\mathbf{u})$ est le vecteur gradient : $\nabla H(\mathbf{u}) = (\frac{\delta H(\mathbf{u})}{u_1}, \dots, \frac{\delta H(\mathbf{u})}{u_n})$.

L'origine du repère peut être prise comme point initial dans la séquence. La méthode d'itération est alors basée sur une linéarisation à chaque itération. A la $m^{\text{ième}}$ itération, la surface $H(\mathbf{u}) = H(\mathbf{u}^{(m)})$ est remplacée par le plan tangent en $\mathbf{u}^{(m)}$. Le point suivant est situé sur la droite partant de l'origine et parallèle à la direction du vecteur normal au plan tangent $\alpha^{(m)}$. Ce point est alors obtenu comme la somme de deux termes :

$$\mathbf{u}^{(m+1)} = (\mathbf{u}^{(m)\top} \alpha^{(m)}) \alpha^{(m)} + \frac{\nabla H(\mathbf{u}^{(m)})}{\|\nabla H(\mathbf{u}^{(m)})\|} \alpha^{(m)} \quad (\text{C.32})$$

Dans cette expression, le premier terme représentant le résultat de la projection de $\mathbf{u}^{(m)}$ sur la droite précédente, et le second terme est le vecteur permettant de corriger la projection précédente en tenant compte de la valeur de $H(\mathbf{u}^{(m)})$. Lorsque β est quasi-constant entre deux itérations m et $m+1$, la convergence de la séquence est atteinte. Les critères d'arrêt de l'algorithme sont imposés soit à partir d'une norme du vecteur \mathbf{u} , par exemple : $\|\mathbf{u}^{(m+1)} - \mathbf{u}^{(m)}\| < \epsilon$, soit à partir d'une tolérance sur toutes les composantes du vecteur \mathbf{u} .

La relation entre P_f et β correspond à un changement d'échelle. La mesure de l'indice de fiabilité correspond à quelques unités tandis que dans le cas de la probabilité, c'est l'exposant n de $P_f = 10^{-n}$ qui nous intéresse. L'échelle de β est une échelle approximativement logarithmique de la fiabilité qui correspond mieux à une appréciation subjective des ordres de grandeur des risques acceptables.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (\text{C.33})$$

où $\Phi(\cdot)$ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

PUBLICATIONS

Dans des revues internationales à comité de lecture :

- (*Accepté*) " Cost model for optimum thicknesses of insulated walls considering indirect impacts and uncertainties ", A. Aïssani & A. Chateauneuf & J-P. Fontaine & Ph. Audebert, *Energy and Buildings*, vol. 84, pp. 21-32, 2014.

doi : 10.1106/j.enbuild.2014.07.090

- (*Accepté*) "Quantification of workmanship insulation defects and their impact on the thermal performance of building facades", A. Aïssani & A. Chateauneuf & J-P. Fontaine & Ph. Audebert, *Applied Energy*, (In press) 2015.

doi : 10.1016/j.apenergy.2015.12.040

- (*Soumis*) "Reliability and design optimization of building insulations considering uncertainties : application on external walls considering climate change and materials uncertainties.", A. Aïssani & A. Chateauneuf & J-P. Fontaine & Ph. Audebert, *Automation in construction*.

Dans les symposiums internationaux à comité de lecture :

- "Reliability based design optimization of insulation systems considering climate change and workmanship uncertainties", A. Aïssani & A. Chateauneuf & J-P. Fontaine, 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12). Vancouver (Canada), July 12-15, 2015.
- "Impact of different life cycle cost models on design decisions for insulation systems", A. Aïssani & A. Chateauneuf & J-P. Fontaine & Ph. Audebert, 46th seminar of European Safety, Reliability & Data Association (EsReDA). Torino (Italy), May 29-30, 2014.

Dans les symposiums nationaux à comité de lecture :

- "Analyse de la fiabilité de l'isolation des façades en considérant la variabilité du climat". A. Aïssani & A. Chateauneuf & J-P. Fontaine, *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bayonne (France), 27-29 mai, 2015.
- "Influence des incertitudes sur l'épaisseur optimale de l'isolation thermique des bâtiments". A. Aïssani & A. Chateauneuf & J-P. Fontaine & Ph. Audebert, 8^{èmes} Journées Nationales de Fiabilité des Matériaux et des Structures, Aix-en-Provence (France), 9-10 avril, 2014.

Travaux scientifiques - hors thèse :

- "Reliability-based optimization of direct and indirect LCC of RC bridge elements under coupled fatigue-corrosion deterioration processes". L. Saad & A. Aïssani & A. Chateauneuf & W. Raphael, *Engineering Failure Analysis*, pp. 570-587, 2016.
doi : 10.1016/j.engfailanal.2015.11.006
- "Life cycle optimization of corroded RC structures considering nonlinear failure cost". A. Aïssani & A. Chateauneuf & L. Saad, 11th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), New York (USA), 16-20 June, 2013.
- "Life cycle cost optimization of reinforced concrete structures under coupled corrosion fatigue deterioration". L. Saad & A. Aïssani & A. Chateauneuf & W. Raphael, 11th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), New York (USA), 16-20 June, 2013.
- "Probabilistic approach to deal with uncertainties in concrete structures : Application to repaired bridge". A. Aïssani & R. Laggoune & D. Cherid, AbstractID 19600, 10th World Congress on Computational Mechanics, Sao Paulo, July 8-13, 2012.

OPTIMISATION FIABILISTE DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES BATIMENTS

Cette thèse porte sur l'amélioration du processus de conception de l'isolation dans le but de limiter la déviation des consommations réelles par rapport à celles prévues lors des simulations. Pour cela, nous nous intéressons particulièrement à la variabilité des propriétés thermo-physiques des isolants, au caractère variable de la mise en œuvre et à l'impact du changement climatique.

Dans ce sens, des études expérimentales ont été réalisées et ont permis de quantifier l'incertitude associée à la performance des matériaux sains d'une part, et celle associée à des isolants défectueux d'autre part. Par ailleurs, l'incertitude liée à la prévision météorologique est également intégrée en considérant les différents scénarios proposés par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat. Toutes ces sources d'incertitudes sont alors prises en compte lors des simulations en utilisant des approches probabilistes. Enfin, pour optimiser le dimensionnement de l'isolation, nous proposons une méthodologie de conception basée sur la fiabilité. Un nouveau modèle de coût est également proposé dans le but d'améliorer l'aide à la décision, en considérant les pertes indirectes, jusqu'à présent négligées dans la conception.

Mots-clés

Fiabilité, Conception optimale, Propagation d'incertitudes, Performances énergétiques, Isolation, Variabilité climatique, Défauts de mise en œuvre.

RELIABILITY BASED OPTIMISATION OF ENERGETIC PERFORMANCES OF BUILDINGS

This thesis focuses on the insulation design process under uncertainty, in order to limit gaps between real and predicted performances for better control of energy consumptions. In this way, we consider various uncertainties that affect the insulation, mainly the variability of the thermo-physical properties, the uncertainty on climate and the uncertainties due to workmanship defects.

Experimental studies were carried out to evaluate the uncertainty associated to the intrinsic performance of healthy insulation materials on one hand, and those associated to defects in insulations on the other hand. Moreover, as the performance of insulation also depends on climate, it is necessary to integrate future weather data while evaluating the energy consumption. Finally, we propose a probabilistic approach to integrate uncertainties in simulation and an optimization methodology based on reliability. A new cost formulation is also proposed to improve the decision-making, through indirect losses related to comfort, pollution and living space losses.

Keywords

Reliability, Insulation design, Propagation of uncertainties, Energy performance, Climate variabilities, Workmanship defects.