



**HAL**  
open science

# Méthode d'aide à la décision multicritère des stratégies de réhabilitation des bâtiments anciens en pierre calcaire : application au patrimoine en tuffeau

Emma Stephan

## ► To cite this version:

Emma Stephan. Méthode d'aide à la décision multicritère des stratégies de réhabilitation des bâtiments anciens en pierre calcaire : application au patrimoine en tuffeau. Réhabilitation. École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE], 2014. Français. NNT : 2014ENTP0017 . tel-01631799

**HAL Id: tel-01631799**

**<https://theses.hal.science/tel-01631799v1>**

Submitted on 9 Nov 2017

**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.

# THESE

pour l'obtention du grade de  
Docteur de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

Université de Lyon

Ecole doctorale : MEGA (Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique)

Spécialité : *Génie Civil*

Préparée au Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LTDS/UMR 5513)

Présentée et soutenue publiquement par

*Emma STEPHAN*

## *METHODE D'AIDE A LA DECISION MULTICRITERE DES STRATEGIES DE REHABILITATION DES BATIMENTS ANCIENS EN PIERRE CALCAIRE Application au patrimoine en tuffeau*

Soutenue le 17 décembre 2014 devant le jury composé de :

Rapporteurs	Monika Woloszyn – Professeure (Université de Savoie) Christian Inard – Professeur (Université de La Rochelle)
Examineurs	Joseph Virgone – Professeur (Université Lyon 1) Fariborz Haghighat – Professeur (Concordia University) Sihem Guernouti – Chargée de recherche (Cerema) Antoine Caucheteux – Ingénieur/chercheur (Cerema) Richard Cantin – HDR (ENTPE)
Directeur de thèse	Pierre Michel – HDR (ENTPE)

## Remerciements

Jamais cette thèse n'aurait pu aboutir sans les personnes qui m'ont accompagnées au jour le jour ou ponctuellement. Cette étape de remerciements est donc essentielle pour terminer ce mémoire.

Commençons donc cette partie par ces relations professionnelles qui m'ont permis de réaliser ces trois années.

Merci à Pierre Michel pour avoir accepté de diriger cette thèse et de l'avoir portée pour qu'elle aboutisse.

Merci à mes encadrants, dans l'ordre alphabétique : Richard Cantin, Antoine Caucheteux et Sihem Guernouti. Merci d'avoir été disponibles tout au long de ces trois ans pour m'orienter et me lancer régulièrement sur de nouvelles pistes toujours plus passionnantes à explorer.

Merci à Monika Woloszyn et Christian Inard d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail et de m'avoir fourni leurs commentaires pertinents.

Je remercie aussi Fariborz Haghghat d'avoir accepté d'être examinateur et d'avoir lu attentivement mes travaux malgré le français.

Un grand merci à Joseph Virgone pour avoir présidé ce jury et m'avoir fait part de ces remarques pour améliorer mon manuscrit.

Merci aux membres de mon comité de suivi de thèse : Monika Woloszyn, Pascal Le Gauffre, Muzahim Al-Mukthar et Bruno Morel pour leur regard extérieur sur mes travaux et leurs critiques qui m'ont permis de poursuivre sur les pistes les plus pertinentes.

Enfin, merci à Mr Paul Quilliou ancien directeur du Département Laboratoire d'Angers, où j'ai passé la majorité de ces trois années, pour avoir soutenu le projet Tuffeau sans lequel ce manuscrit n'aurait pu aboutir.

Qu'aurait été ces trois ans sans le groupe bâtiment ? Merci à tous mes collègues pour leur soutien, commentaires et questionnements sur ce projet. Merci aux stagiaires de passage pour leur contribution à ces travaux. Un grand merci à Constance pour ces discussions plus ou moins proches du sujet de ces travaux et pour ces commentaires sur de tellement nombreux sujets de ce travail qu'ils ne peuvent être cités.

Merci à Marie-Victoire Baussant, de l'ENTPE, pour la logistique de l'ensemble de cette thèse et encore plus pour celle de la soutenance.

Et maintenant, il est temps de remercier tous les autres...

Ma première pensée est pour mon père car malgré son absence il a orienté ces travaux. Merci papa de m'avoir donné le goût pour les vieilles pierres, la maçonnerie et la ténacité, pour m'avoir poussée à aller jusqu'au bout. Nécessairement, la seconde pensée va à toi ma chère maman pour ton soutien sans faille pendant ces (longues ?) années d'étude, pour m'avoir guidée sur ce long chemin des études supérieures et pour tes relectures assidues.

## Remerciements

Merci à mon frère et ma belle-sœur pour leur soutien malgré la distance durant ces trois ans.

Une pensée à toi aussi Olivier pour m'avoir soutenue lors de cette décision de continuer mes études et à toute ma famille.

Merci à mon chat, Grim, pour sa chaleur et son soutien actif lors des longues phases de rédaction.

Je termine par toi, Dimitri, qui partage ma vie depuis le début de cette aventure. Merci pour ta patience, ton soutien sans faille dans les moments difficiles et dans les autres. Et surtout merci d'avoir toujours su (cru ?) que j'y arriverai, sans toi ce manuscrit n'aurait jamais abouti et j'aurais arrêté il y a bien longtemps.

## Résumé

Le parc de bâti ancien représente un potentiel d'économies d'énergie avéré. Cependant, sa diversité et certaines caractéristiques des matériaux d'enveloppe gênent la mise en place de stratégies de réhabilitation efficaces. Parmi ce patrimoine, les maisons individuelles en pierre calcaire présentent des problématiques spécifiques vis-à-vis de la réhabilitation. Le tuffeau, plus spécifiquement, est une pierre calcaire à forte porosité dont la particularité est la facilité avec laquelle il se gorge d'eau. Ses propriétés hygrothermiques sont alors impactées et le matériau se dégrade. Par ailleurs, ce bâti bénéficie de températures intérieures confortables en été et de qualités architecturales certaines.

Il s'agit là de contraintes à considérer lors de la réhabilitation énergétique de ces bâtiments. Les solutions proposées doivent donc répondre à des objectifs parfois divergents. Pour le patrimoine en tuffeau, quatre critères sont apparus indispensables : les besoins de chauffage, le confort hygrothermique intérieur, le risque de dégradation du matériau et l'investissement financier. Dans ce contexte, l'objectif est de développer une démarche d'aide à la décision multicritère de stratégie de réhabilitation pérenne des bâtiments en tuffeau.

Cette démarche a vocation à s'adapter à tous types de bâtiments en tuffeau et à considérer l'ensemble de ses spécificités. Un panel d'actions de réhabilitation portant sur les éléments d'enveloppe est identifié et testé sur le bâtiment considéré. La mise en place du processus a nécessité l'utilisation d'un outil de modélisation traduisant la réalité du comportement énergétique de ces bâtiments. L'outil EnergyPlus avec l'algorithme de transfert de masse et de chaleur HaMT a été mis en place et vérifié avec des mesures expérimentales. L'ensemble des résultats des stratégies de réhabilitation sont alors agrégées dans une méthode d'analyse multicritère. L'incertitude de l'évaluation des stratégies de réhabilitation est intégrée à la méthode (ELECTRE III) pour que les recommandations soient réalisées avec un degré de confiance satisfaisant.

L'application de cette démarche à deux cas de bâtiments en tuffeau a mis en évidence l'adaptabilité de la démarche à des bâtiments de typologie et de complexité variables. Elle permet par ailleurs de fournir des recommandations robustes sur les travaux les plus pertinents à mener.

Mots clés

Réhabilitation – Bâtiment ancien – Pierre calcaire – Multicritère - Aide à la décision



## Abstract

The old buildings stock represents a true potential for energy savings. However, its diversity and some characteristics of its envelop materials interfere with the setting of effective retrofitting strategies.

Among this heritage, individual limestone dwellings present specific issues concerning retrofitting. Tuffeau, particularly, is a high porosity limestone which specificity is propensity to fill up with water. Its hygrothermal properties are then affected and it quickly deteriorates. Furthermore, this kind of building offers comfortable indoor summer temperatures and undeniable architectural qualities.

Those factors have to be considered during the energetic retrofitting of those dwellings. Consequently, the solutions proposed have sometimes to meet divergent goals. Concerning limestone heritage, four criteria appeared as indispensable: the heating needs, the indoor hygrothermal comfort, the material deterioration risk, and the financial investment. In this context, the goal is to develop a multicriteria decision aiding method of old limestone buildings retrofitting strategies.

This method has a potential to adapt to every type of limestone buildings and to consider those specificities as a whole. A panel of retrofitting actions concerning the envelop elements is identified and then tested on the concerned building. The process implementation required the use of a modeling tool to translate the reality of those buildings behaviour. The tool EnergyPlus with its mass and heat transfer algorithm HaMT was implemented and validated with experimental measures. The uncertainty of the retrofitting strategies results are then integrated to the method (ELECTRE III) so that the recommendation can be performed with an acceptable level of confidence.

The application of this process to two cases of limestone buildings emphasized the adaptability of this method to very different buildings in term of typology and complexity. It also allows providing with robust recommendations on which retrofitting work has to be performed.

Key words

Retrofitting – Old building – Limestone – Multicriteria – Decision support



## Table des matières

Remerciements .....	1
Résumé.....	3
Abstract.....	5
Table des matières .....	7
Nomenclature .....	11
Introduction générale .....	13
<b>PARTIE 1 : DU BÂTI ANCIEN EN TUFFEAU A SA RÉHABILITATION .....</b>	<b>15</b>
Chapitre 1 Le bâti ancien en tuffeau.....	17
1.1 Généralités sur le bâti ancien .....	18
1.2 Les matériaux de construction : du calcaire au tuffeau.....	21
1.3 Les bâtiments anciens en tuffeau.....	28
1.4 Conclusions.....	41
Chapitre 2 Réhabiliter le bâti en pierre calcaire .....	43
2.1 Les enjeux de la réhabilitation des bâtiments en tuffeau .....	44
2.2 La conception de stratégies de réhabilitation des bâtiments en tuffeau .....	48
2.3 La démarche de réhabilitation des bâtiments en tuffeau .....	55
2.4 Conclusions.....	58
<b>PARTIE 2 : DE L'ÉVALUATION MULTICRITERE DES STRATEGIES DE REHABILITATION DU PATRIMOINE TUFFEAU A LEUR CLASSEMENT .....</b>	<b>59</b>
Chapitre 3 Les critères d'évaluation de la réhabilitation des bâtiments en tuffeau .....	61
3.1 Évaluer la performance énergétique des bâtiments en tuffeau .....	62
3.2 Évaluer le confort hygrothermique des bâtiments en tuffeau .....	64
3.3 Évaluer le risque de dégradation de la pierre de tuffeau .....	72
3.4 Évaluer le coût économique de la réhabilitation .....	74
3.5 Conclusions.....	76
Chapitre 4 La modélisation hygrothermique des bâtiments en tuffeau .....	77
4.1 La sélection de l'outil de modélisation énergétique adapté aux bâtiments en tuffeau 78	
4.2 Un aperçu des méthodes d'analyse de sensibilité, étude d'incertitude et confrontation modélisation/ expérimentation .....	86
4.3 L'analyse de sensibilité de l'humidité spécifique intérieure d'un bâtiment en tuffeau 90	

## Table des matières

4.4	Confrontation modélisation/ expérimentation .....	95
4.5	Les points de vigilance sur la modélisation des bâtiments en tuffeau.....	119
4.6	Conclusions.....	120
Chapitre 5	Les méthodes d'analyse multicritère pour l'identification de stratégies de réhabilitation efficaces .....	121
5.1	État de l'art des méthodes d'analyse multicritère .....	122
5.2	Présentation d'ELECTRE III .....	125
5.3	Conclusions.....	132
<b>PARTIE 3 : APPLICATION DE LA DÉMARCHE D'AIDE A LA DÉCISION D'UNE STRATÉGIE DE RÉHABILITATION.....</b>		<b>133</b>
Démarche de sélection d'une stratégie de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau .....		135
Chapitre 6	Application et validation du processus de décision à un cas simplifié .....	141
6.1	Étapes 1 à 3 : le bâtiment avant réhabilitation .....	142
6.2	Étapes 4 et 5 : les stratégies de réhabilitation .....	144
6.3	Étape 6 : l'évaluation des stratégies de réhabilitation sur les quatre critères de décision.....	150
6.4	Étape 7 : le classement des stratégies de réhabilitation .....	157
6.5	Étape 8 : l'analyse de robustesse.....	164
6.6	Étape 9 : les recommandations .....	167
6.7	Conclusions.....	168
Chapitre 7	Application du processus de décision à un cas réaliste .....	169
7.1	Étapes 1 à 3 : le bâtiment avant réhabilitation .....	170
7.2	Étapes 4 et 5 : les stratégies de réhabilitation .....	177
7.3	Étape 6 : l'évaluation des stratégies de réhabilitation.....	180
7.4	Étape 7 : le classement des stratégies de réhabilitation .....	180
7.5	Étape 8 : l'analyse de robustesse.....	181
7.6	Étape 9 : les recommandations .....	184
7.7	Conclusions.....	185
Conclusion générale .....		187
Références .....		191
Liste des figures.....		201
Liste des tableaux .....		204
ANNEXES .....		207
Annexe A Description des bâtiments en tuffeau visités .....		208
Annexe B Liste des paramètres de l'analyse de sensibilité sur l'humidité .....		209
Annexe C Résultats complets de l'analyse de sensibilité de l'humidité .....		211
Annexe D Description des actions élémentaires « isolation des parois verticales ».....		213
Annexe E Classement complet des stratégies de réhabilitation du cas simplifié.....		215
Annexe F Scénarios d'occupation du cas réaliste .....		216





## Nomenclature

### Lettres

Notation	Unité	Signification
$C_p$	J/kg.°C	Chaleur spécifique
$\Delta$	Kg/m.s.Pa	Coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air
$C_s$	(L/s) <sup>2</sup> /(cm <sup>4</sup> .K)	Coefficient d'infiltrations liées au tirage thermique
$C_w$	(L/s) <sup>2</sup> /(cm <sup>4</sup> .(m/s) <sup>2</sup> )	Coefficient d'infiltrations liées au vent
F	-	Coefficient structurel
$\Lambda$	W/m.K	Conductivité thermique
$\dot{m}$	m <sup>3</sup> /s	Débit d'infiltration
$S_r$	-	Degré de saturation
Q	W/m <sup>2</sup>	Densité de flux de chaleur
$g_v$	Kg/m <sup>2</sup> .s	Densité de flux de diffusion de la vapeur
$g_w$	Kg/m <sup>2</sup> .s	Densité de flux liquide
$h_v$	J/kg	Enthalpie d'évaporation de l'eau
H	J/m <sup>3</sup>	Enthalpie par volume
$\mu$	-	Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau
$\dot{Q}$	W/m <sup>3</sup>	Gains internes de chaleur
HR	%	Humidité relative
HS	Kg/kg <sub>airsec</sub>	Humidité spécifique
P	Kg/m <sup>3</sup>	Masse volumique
$D_w$	Kg/m.s	Perméabilité à l'eau liquide
N	%	Porosité
$P_{sat}$	Pa	Pression de vapeur saturante
$P_v$	Pa	Pression de vapeur
$S_h$	W/m <sup>3</sup>	Source de chaleur
$S_w$	Kg/m <sup>3</sup> .s	Source d'humidité
T	°C	Température
W	Kg/kg	Teneur en eau
$T_\infty$	°C	Température extérieure

### Indices

Notation	Signification
eff	effectif
w	Dépendance à la teneur en eau
mat	Matrice solide
sys	Système
t	Temps t
z	Zone



## Introduction générale

Le 23 septembre 2014, s'ouvrait un nouveau sommet international sur le climat. Cette fois-ci, c'est affirmé : le réchauffement climatique est bien présent. De plus, nous vivons maintenant à crédit sur les ressources des générations futures. Il est donc nécessaire sinon indispensable d'agir, et d'agir rapidement pour réduire les effets des émissions de gaz à effet de serre. Nous parlons bien ici de réduction des effets puisque les derniers rapports du GIEC l'affirment, la tendance d'élévation de la température terrestre n'est plus inversable.

Les accords sont complexes à l'échelle internationale, aussi les pays, à leur niveau, se mobilisent pour monter des programmes d'action avec la volonté de lutter contre le réchauffement climatique. Ainsi, la France a pris l'engagement de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 (loi POPE du 13 juillet 2005). Pour répondre à cet engagement, le premier axe d'action est la réduction des consommations énergétiques, sources importantes d'émission de polluants.

La France doit donc s'attaquer à un secteur parmi les plus consommateurs et fortement émetteur de gaz à effet de serre : le bâtiment. Il représentait en 2009 44% des consommations totales en énergie primaire et 21% des émissions de gaz à effet de serre [MEEDE, 2009].

Le Grenelle de l'environnement a fixé un objectif précis mais ambitieux : la réduction des consommations énergétiques des bâtiments de 38% d'ici à 2020. Les modalités d'atteinte de ce seuil ont été explicitées concrètement dans le "plan bâtiment grenelle".

Ainsi, réglementairement pour le domaine du bâtiment :

- en 2012, tous les nouveaux bâtiments seront à "basse consommation". L'objectif chiffré est de 50 kWh/m<sup>2</sup>.an en moyenne. En 2020, ils devront tous être "à énergie positive".
- Sur un ensemble de 31 millions de logements (dont 4,5 millions de logements sociaux, 7 millions de logements en copropriété et 18 millions de maisons individuelles), la loi Grenelle 1 fixe un rythme de 400 000 logements à rénover par an à partir de 2013, réévalué à 500 000 dans la loi de transition énergétique, et 800 000 logements sociaux parmi les plus énergivores d'ici à 2020.
- Les bâtiments de l'État et de ses établissements publics devront engager leur rénovation avant la fin 2012.

Le patrimoine bâti français se caractérise par un taux de renouvellement faible : 1% pour le résidentiel et 3% pour le tertiaire. La majorité des bâtiments qui seront présents en 2020 sont déjà construits. Se concentrer sur le parc existant est donc une solution durable d'économies d'énergie. De plus, cette catégorie de bâtiments se distingue par sa forte capacité d'action (pour les logements, environ 45% du parc est l'objet, chaque année, d'intervention visant l'amélioration et l'entretien). Il est donc indispensable de se concentrer sur le patrimoine existant en déterminant des actions de réhabilitation efficaces et adaptées à ces bâtiments.

Toutefois, n'oublions pas dans notre façon d'appréhender la réhabilitation que les modes de vie des occupants ont évolué par rapport à la date de construction du bâtiment. L'identification

des besoins sur le patrimoine existant est un préalable indispensable à l'établissement des réhabilitations. A ce titre, la distinction du bâti ancien du bâti existant est utile. Nous entendons ici par bâti ancien le patrimoine construit avant 1948. Nous reviendrons plus en détail sur ce point mais il est défini par la DHUP comme le "bâti généralement conçu avant le début du 20ème siècle et l'émergence en architecture du mouvement moderne (<1950). Il se caractérise notamment par l'emploi de techniques constructives et de matériaux non industrialisés, subordonnés à un contexte local" [DHUP, 2007]. Ces bâtiments représentent environ 10 millions de logements (1/3 du parc de bâti existant).

Des problématiques régionales ont été identifiées en Pays-de-la-Loire et Centre sur le patrimoine en pierre de tuffeau. Il s'agit d'une pierre à forte porosité (45% en moyenne) qui est le matériau de construction majoritaire de la Vallée de la Loire [Prigent]. Notons ainsi que les villes de Nantes, Angers, Saumur et Tours ont un nombre important d'édifices en tuffeau. La réhabilitation de ces bâtiments suit l'objectif de réduction des consommations d'énergie mais a mis en évidence des lacunes dans la prévision des comportements du bâti à ces modifications. L'apparition d'altérations, des performances énergétiques éloignées de celles attendues, une dégradation des conditions de confort sont quelques points soulevés lors d'échanges avec les professionnels du secteur. La problématique d'une méthode d'identification des stratégies de réhabilitation adaptées à ce patrimoine a donc émergé. Et c'est l'objet de ce travail : nous cherchons à connaître le patrimoine en pierre calcaire et plus spécifiquement en tuffeau afin de construire une méthode d'aide à la décision pour sélectionner des stratégies de réhabilitation efficaces et durables pour les bâtiments en tuffeau.

Pour atteindre ce but, la démarche de ce travail de recherche s'est scindée en trois grandes parties.

La première s'attache à comprendre le comportement d'un bâtiment en tuffeau et à identifier l'ensemble des spécificités qui affecteront les réhabilitations. Pour cela, les caractéristiques hygrothermiques du matériau sont analysées puis intégrées à l'échelle du bâtiment. La littérature et des retours d'expérience menés sur le terrain complètent l'étude en apportant une analyse sur les stratégies de réhabilitation déjà testées. Cette connaissance permet de déterminer les objectifs essentiels de tels travaux et de construire un processus d'aide à l'identification des stratégies les plus pertinentes.

La seconde partie vise à mettre en place les outils nécessaires à l'application du processus d'aide à la décision. Plusieurs points sont ainsi détaillés : la construction des critères de décision, le calcul de ces critères grâce à un outil de modélisation des bâtiments et la méthode d'analyse multicritère permettant de structurer les résultats.

Enfin, la dernière partie permet de vérifier la pertinence de la démarche développée en l'appliquant dans un premier temps à un cas simplifié puis à un cas réel de bâtiment en tuffeau.

## **PARTIE 1 : DU BÂTI ANCIEN EN TUFFEAU A SA RÉHABILITATION**

Cette première partie est une étape de connaissance de notre objet d'étude : le bâti en tuffeau et de sa réhabilitation.

Il s'agit ici d'identifier les atouts et inconvénients de ces bâtiments, de mettre en évidence les enjeux de la réhabilitation de ce patrimoine et de mettre en exergue les points de vigilance déjà identifiés par les acteurs de ce secteur.

Cette connaissance est nécessaire à la construction d'une démarche de sélection de stratégies de réhabilitation adaptées à ce patrimoine.



## Chapitre 1 Le bâti ancien en tuffeau

Ce chapitre présente un état des lieux de la connaissance du patrimoine bâti ancien en pierre calcaire. En effet, avant d'entreprendre la rénovation de ce parc, il est nécessaire sinon indispensable de définir, d'identifier et de comprendre l'objet de ce travail de thèse : **le bâti ancien en pierre calcaire**. Il s'agit donc ici d'un chapitre essentiellement introductif et bibliographique.

La démarche adoptée joue sur des changements d'échelle en distinguant le bâti du matériau. Dans un premier temps, nous nous attachons à identifier le bâti ancien. A quels bâtiments faisons-nous référence ? Pourquoi le distingue-t-on des autres bâtiments ? Quelles en sont les spécificités ?

Suite à ces identifications, la connaissance du matériau de construction devient nécessaire pour parfaire notre compréhension de ce patrimoine. Ce mémoire se concentre sur les pierres calcaires parmi lesquelles nous en sélectionnons une plus particulièrement : le **tuffeau**. L'objectif est d'identifier les propriétés de ce matériau qui rendent difficile la réhabilitation. Enfin, les spécificités identifiées du patrimoine ancien sont mises en relation avec les propriétés du matériau tuffeau. Les particularités du patrimoine bâti en tuffeau sont alors mises en évidence.

Un état des atouts et inconvénients de ces bâtiments avec lesquels il sera nécessaire de composer dans notre objectif de réhabilitation peut alors être dressé.

## 1.1 Généralités sur le bâti ancien

### 1.1.1 La place du bâti ancien au sein de la construction française

En France, trois périodes de construction peuvent caractériser l'ensemble des bâtiments suivant leurs modes constructifs et l'intégration de la préoccupation environnementale dans la conception (Fig. 1.1).

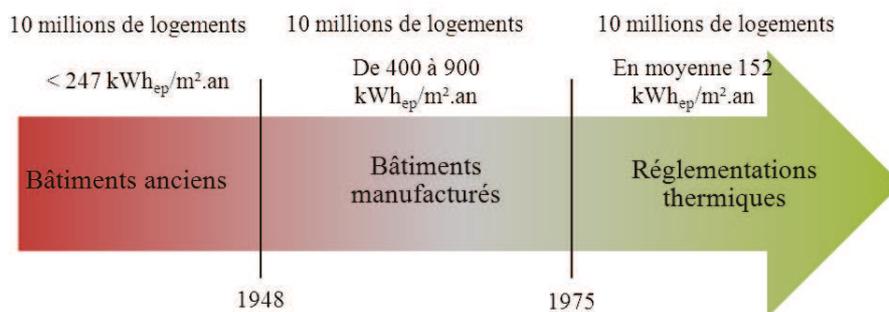


Fig. 1.1 : Consommations du parc bâti en fonction des périodes de construction

Ainsi, la première catégorie est constituée des bâtiments récents : construits de 1975 à nos jours. Ils intègrent des exigences de consommations énergétiques de plus en plus fortes. En effet, à la suite du premier choc pétrolier en 1973, il est apparu que les énergies utilisées n'étaient pas inépuisables. La nécessité de maîtriser et de réduire les besoins énergétiques a donc émergé et impacté le secteur du bâtiment. En 1975 est apparue la première réglementation thermique fixant des obligations sur la performance des éléments constitutifs et sur la consommation globale du bâti. Les réglementations successives (jusqu'à la réglementation thermique de 2012) tendent à réduire significativement les besoins énergétiques pour les bâtiments. Les consommations énergétiques des bâtiments construits entre 1975 et 2000 sont estimées en moyenne pour les maisons individuelles à 152 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>.an [RAGE, 2012] et deviennent de plus en plus faibles.

La seconde période de construction s'étend de 1948 à 1975, il s'agit de la période de reconstruction après-guerre. La demande pressée et croissante de logements a favorisé une construction industrialisée et standardisée. Il n'y a alors pas de réflexion globale sur l'emplacement, la disposition et les consommations du logement. Il s'agit des bâtiments les plus énergivores du secteur avec des consommations estimées allant de 400 à 900 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>.an [Tabula, 2010].

Enfin, la troisième partie se compose des bâtiments construits avant 1948 et que nous appelons « bâtiments anciens » dans la suite du mémoire. Bâties avant l'émergence de la construction industrielle, ils sont issus d'héritages culturels et utilisent les matériaux locaux disponibles à proximité. Leur conception suit les principes du bioclimatisme que nous détaillons par la suite. Cela permet aux bâtiments anciens d'être moins consommateurs en énergie que la seconde catégorie : leurs consommations estimées varient de 63 à 275 kWh<sub>ef</sub>/m<sup>2</sup>.an pour le chauffage et l'ECS [DGUHC, 2011] et sont estimées à 247 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>.an en moyenne pour le chauffage.

Les bâtiments anciens sont composés en majeure partie de maisons individuelles dont la proportion est de 65% [Jacquot, 2003] avec une surface moyenne de 107 m<sup>2</sup> contre 60 m<sup>2</sup> pour les habitats collectifs.

Les bâtiments se répartissent de manière homogène sur les trois périodes de construction : le bâti ancien représente un tiers des logements existants soit près de 10 millions d'édifices.

### 1.1.2 Les spécificités des bâtiments anciens

#### 1.1.2.1 L'hétérogénéité des matériaux de construction

Les matériaux de la construction ancienne sont des matériaux locaux et souvent peu transformés. Ils offrent donc une très large diversité sur le territoire français. Leur vocation est de répondre aux exigences climatiques [İpekoğlu, 2007]. Ainsi, İpekoğlu et al. ont identifié en Turquie deux modes constructifs différents malgré leur proximité géographique. Le premier en brique et mortier de chaux a résisté plusieurs siècles au climat modéré de certaines zones de la Turquie, le second intègre un double parement en pierre de taille avec un blocage intérieur pour supporter les hivers très rudes des steppes turques. L'héritage culturel oriente aussi les modes constructifs comme le précisent Zhai et al. [Zhai, 2010] : 114 zones ont été définies à l'échelle mondiale suivant le climat et la culture pour définir les grandes classes de construction. Les différents éléments du bâti (parois, toiture, fenêtre, etc.) sont décrits pour chacune des 114 zones. D'après ces travaux, le patrimoine européen est constitué d'une majorité de constructions massives avec une forte proportion de toit de chaume.

Cinq catégories principales de matériaux de construction sont distinguées en France (Fig. 1.2). Les pierres sont le matériau majoritaire (53%) en intervenant au sein des moellons, des pierres de taille et des meulières [Graulière, 2005].

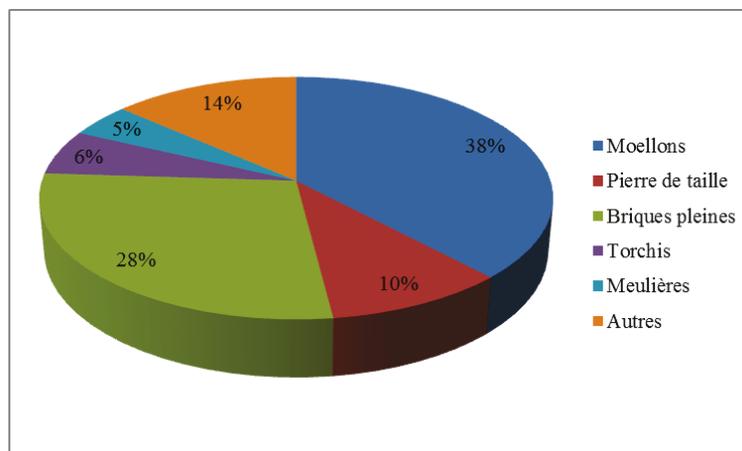


Fig. 1.2 : Matériaux constitutifs des enveloppes de bâtiments anciens [Graulière, 2005]

L'enveloppe des bâtiments anciens est majoritairement composée de parois qui laissent la vapeur d'eau transiter au sein des matériaux ou des mortiers qui composent les murs [Marshal, 2011], [Heim, 2009], [Duguë, 2010].

#### 1.1.2.2 Une conception bioclimatique

Malgré une hétérogénéité dans les matériaux de construction, la conception des bâtiments anciens s'entend sur un certain nombre de principes bioclimatiques. En effet, du fait de l'absence de systèmes efficaces permettant d'assurer le confort, la conception d'un bâtiment

se devait d'utiliser le plus efficacement possible ce que le climat local avait à lui offrir tout en palliant les diverses contraintes rencontrées. Ainsi, la géométrie du bâtiment suit généralement les principes :

- Des parois d'épaisseur plus importante sont intégrées au nord pour réduire les pertes de chaleur ;
- La cheminée est placée sur la paroi la plus soumise au vent et à la pluie pour assécher les matériaux ;
- Les ouvertures sont de faible taille pour éviter les déperditions. En effet, le taux de surface vitrée des bâtiments anciens est compris entre 9 et 10%. Il a progressivement augmenté pour atteindre une moyenne de 17% depuis 1982 [François, 1995]. Ces ouvertures sont majoritairement placées au sud pour bénéficier du maximum de rayonnement solaire ;
- Des espaces tampons, généralement des pièces de service comme la buanderie, sont intégrés entre les parois les plus froides (nord) et les pièces de vie pour réduire les pertes de chaleur.

Les bâtiments anciens sont donc construits sur les principes généraux du bioclimatisme actuellement repris et adaptés à la construction neuve.

### 1.1.2.3 L'inertie thermique et le confort en été

L'inertie thermique est définie par Ferrari [Ferrari, 2007] comme la capacité de stockage de la chaleur dans la structure d'un bâtiment et l'aptitude à retarder sa transmission.

Orosa et al. [Orosa, 2012] ont comparé des mesures expérimentales réalisées dans deux écoles, une ancienne et une neuve. Les résultats montrent que l'architecture de l'ancien établissement (structure lourde, inertie thermique des éléments élevées, etc.) fournit un meilleur confort d'été que celle du bâtiment récent. Par ailleurs, Martin et al. [Martin, 2010] ont étudié deux maisons anciennes espagnoles sans système de climatisation et présentant un bon confort d'été. La structure lourde qui compose ces bâtiments peut être l'une des raisons de ce confort. En effet, Brau et al. [Brau, 1984] ont comparé le comportement thermique d'une cellule à structure lourde (murs en béton) à une cellule avec une faible inertie thermique (parois en bois). Pour une même géométrie et un climat identique, la cellule en béton a un meilleur confort d'été que celle en bois. En plus de ces bénéfices en période estivale, la structure lourde et la forte inertie thermique peuvent présenter des avantages en période hivernale pour la réduction des besoins de chauffage.

Les bâtiments anciens avec une structure lourde disposent d'une inertie thermique élevée qui aide à maintenir un bon confort thermique en été et qui peut potentiellement réduire les consommations de chauffage en hiver.

### 1.1.2.4 Le renouvellement d'air

Lorsqu'ils n'ont subi aucune rénovation, les bâtiments anciens disposent rarement d'un système de ventilation mécanique [DHUP, 2010]. Le renouvellement d'air se fait de manière naturelle. L'air pénètre par les défauts d'étanchéité, par les ouvertures des fenêtres et/ou par les entrées d'air prévues à cet effet en façade. Cet air sort soit par les défauts d'étanchéité soit par les conduits de ventilation installés dans les pièces humides. Le renouvellement d'air résulte ainsi des infiltrations liées à l'étanchéité à l'air du bâtiment ainsi qu'aux effets de la pression (liée au vent) et aux différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur (tirage thermique). La grandeur qui détermine la perméabilité à l'air d'un bâtiment en France est le  $Q_{4Pa\_surf}$  [NF 15241]. Il s'agit d'un indicateur qui permet de quantifier le volume d'air

s'infiltrant dans la structure d'un bâtiment (hors appareils de ventilation qu'elle soit naturelle ou mécanique).

Les bâtiments anciens se caractérisent par des perméabilités à l'air élevées par rapport aux référentiels actuels et aux récentes normes. En effet, Bailly et al. [Bailly, 2013] présentent les résultats de mesures de la perméabilité à l'air de bâtiments français (Fig. 1.3). Ceux d'avant 1948 ont une perméabilité à l'air en moyenne égale à  $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , ceux en pierre présentent des résultats encore plus élevés avec une médiane de  $3,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

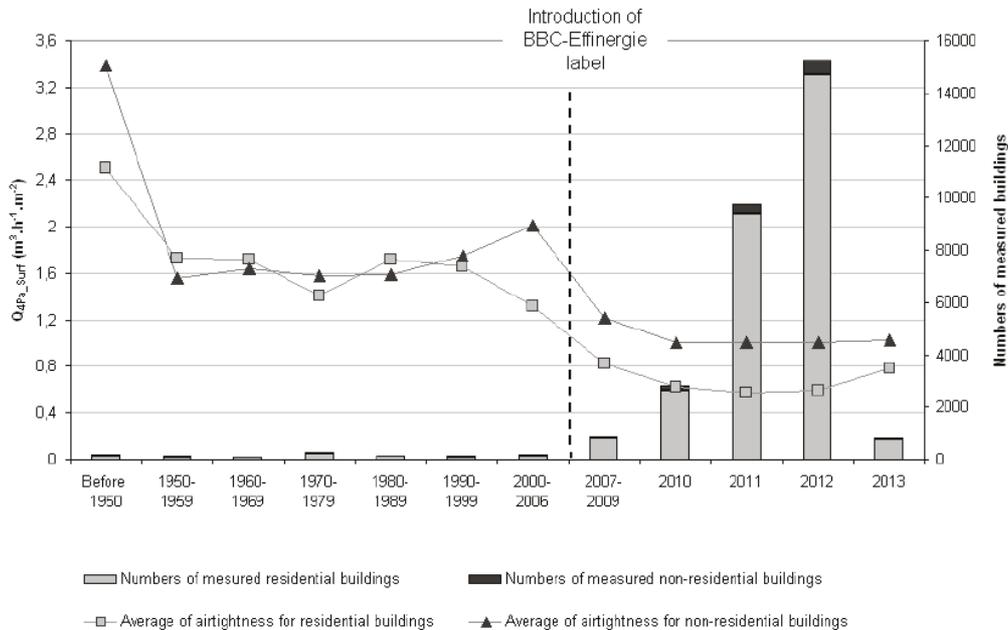


Fig. 1.3 : Moyenne de la perméabilité à l'air suivant la date de construction [Bailly, 2013]

## 1.2 Les matériaux de construction : du calcaire au tuffeau

Nous avons vu dans le paragraphe 1.1.2.1 que les pierres représentent le matériau de construction le plus utilisé dans les bâtiments anciens [Graulière, 2005].

Ce travail de thèse se concentre sur les pierres calcaires. D'un point de vue géologique, les roches sont classées suivant leur origine (formation) et leur composition minéralogique. Les pierres calcaires sont des roches sédimentaires. Elles se forment grâce à une accumulation de sédiments à la surface terrestre (au fond des océans, des lacs ou dans une lagune par exemple). Les roches sédimentaires ne constituent que 5% de la croûte terrestre [CTMNC, 2009]. Toutefois, elles sont beaucoup utilisées en construction car elles recouvrent 75% de la surface de la Terre.

Les roches sédimentaires sont dites « calcaires » lorsqu'elles sont composées à plus de 50% de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ). Leurs formations peuvent se faire de plusieurs manières : origine détritique (recombinaison de débris sous forme de roches), physico-chimique ou biochimique. Nous distinguons les marbres car même s'il s'agit de pierres calcaires quant à leur composition minéralogique, elles ont subi une métamorphose (modification à l'état solide qui affecte une roche). Ces roches sont alors classées en roches métamorphiques et non sédimentaires.

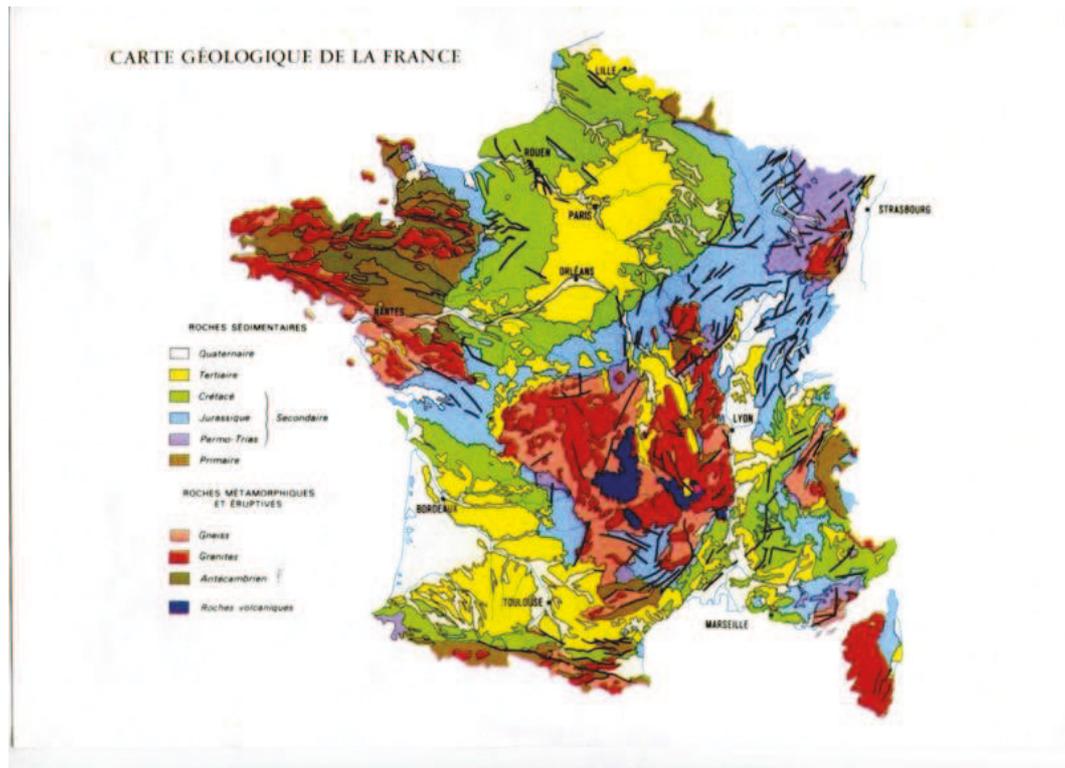


Fig. 1.4 : Carte géologique de la France [BRGM]

En France, les pierres calcaires sont principalement extraites dans les bassins sédimentaires parisien, rhodanien et aquitain et dans les montagnes jeunes (Jura, Alpes, etc.) en vert et jaune sur la Fig. 1.4. Une seconde partie des calcaires français trouve son origine au Jurassique (en bleu sur la carte). La France présente donc une proportion significative d'affleurements calcaires.

### 1.2.1 La diversité des pierres calcaires

Il n'y a pas qu'un type de pierre calcaire mais un très grand nombre. En effet, une forte diversité de calcaires est recensée sur le continent européen [CTMNC], [CSTC]. Les caractéristiques des pierres calcaires varient selon leurs lieux d'extraction, l'âge des sédiments, leur mode de formation, etc. [Fronteau, 2010].

Nous allons dresser dans ce qui suit, un rapide aperçu des variations des propriétés intrinsèques des pierres calcaires en Europe. Ensuite, nous présentons les relations existantes entre ces propriétés.

#### 1.2.1.1 Les propriétés des pierres calcaires

Les caractéristiques des pierres calcaires que nous étudions sont issues des bases de données du CSTC et du CTMNC. Ces deux organismes ont recensé les calcaires existants pour lesquels des essais ont été réalisés. Il n'est pas précisé l'auteur des essais.

La première caractéristique étudiée est la porosité ouverte de la pierre. Elle correspond à la proportion de vides reliés entre eux et accessibles à l'eau. La seconde grandeur est la masse volumique apparente. Elle représente le rapport entre la masse de l'éprouvette sèche et son volume apparent. Enfin, nous étudions la conductivité thermique des pierres.

Le Tableau 1.1 synthétise la taille de l'échantillon sur lequel la grandeur a été mesurée et les extremums constatés. Les résultats des mesures ont été recensés par le CSTC et le CTMNC et ont été obtenus suivant la norme NF EN 1936 [NF 1936].

**Tableau 1.1 : Variabilité des propriétés des pierres calcaires ([CSTC, CTMNC])**

Taille de l'échantillon	Propriétés	Min dans les bases de données	Max dans les bases de données
34	Porosité ouverte (%)	0,4	48,1
104	Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1000	2750
34	Conductivité thermique (W/m.K)	0,35	2,9

Les porosités faibles correspondent aux marbres qui dans les bases de données utilisées sont classés dans la catégorie des pierres calcaires. Les porosités élevées représentent les pierres calcaires tendres et très tendres comme le tuffeau (Pays de la Loire, Touraine) ou la pierre de Sébastopol [Beck, 2006], [Dessandier, 2000], [Chéné, 1999].

Dans la réglementation thermique française de 2005 (abrégée RT 2005 dans la suite du manuscrit), la conductivité thermique d'une pierre calcaire est déterminée en fonction de sa masse volumique (Tableau 1.2). Six classes sont définies.

**Tableau 1.2 : Classification des pierres calcaires selon la RT 2005 [RT 2005]**

Matériaux	Masse volumique sèche (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique utile (W/m.K)
Marbres	$2600 \leq \rho \leq 2800$	3,5
Pierres froides ou extra-dures	$2200 \leq \rho \leq 2590$	2,3
Pierres dures	$2000 \leq \rho \leq 2190$	1,7
Pierres fermes, demi-fermes	$1800 \leq \rho \leq 1990$	1,4
Pierres tendres n°2 et 3	$1600 \leq \rho \leq 1790$	1,1
Pierres très tendres	$\rho \leq 1590$	0,85

Les Tableau 1.1 et Tableau 1.2 mettent en évidence la variabilité des caractéristiques physiques et thermiques des pierres calcaires européennes.

### 1.2.1.2 Les relations entre les propriétés des pierres calcaires

#### 1.2.1.2.1 La masse volumique et la conductivité thermique

La masse volumique et la conductivité thermique ont été recensées sur un panel de 34 pierres calcaires. Les données sont issues d'un recensement réalisé par l'auteure à partir des données du CSTC et du CTMNC. Une relation de type exponentiel est ainsi observée entre ces deux propriétés. Elle montre que plus une pierre est dense, plus sa conductivité est importante (Fig. 1.5).

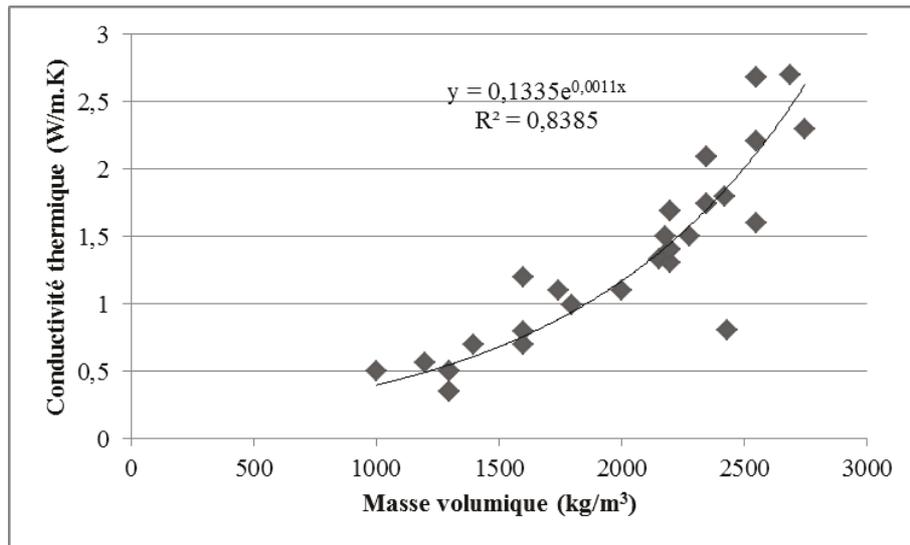


Fig. 1.5 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique sur un échantillon de 34 pierres calcaires

Canacki et al. [Canacki, 2007] présentent une étude similaire sur quatre pierres turques. Les deux relations obtenues sont de type exponentiel mais avec des coefficients différents (Equations (1.1) et (1.2)).

Relation obtenue sur l'échantillon de 34 pierres calcaires :

$$\lambda = 0,1335 \times e^{0,0011 \times \rho} \quad (1.1)$$

Relation obtenue par Canacki et al. [Canacki, 2007] :

$$\lambda = 0,4682 \times e^{0,0007 \times \rho} \quad (1.2)$$

Les écarts peuvent être liés à la taille de l'échantillon : 4 pierres au sein travaux de Canacki et al. [Canacki, 2007] et 34 pour le recensement que nous avons effectué.

#### 1.2.1.2.2 La porosité et la conductivité thermique

Asaad [Somerton, 1992] a proposé une formule (Equation (1.3)) pour calculer la conductivité thermique effective d'une pierre en fonction de la nature du fluide présent dans la matrice solide (eau ou air) et la porosité du matériau.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{mat}^{(1-fN)} \cdot \lambda_{fluide}^{fN} \quad (1.3)$$

Le coefficient f est un coefficient structurel qui dépend de la catégorie de la pierre (calcaire, grès, etc.).

Popov et al. [Popov, 2003] ont mené une étude sur 800 pierres issues de Russie divisées en six collections. Deux traitent des pierres calcaires. La porosité et la conductivité thermique ont été mesurées sur ces échantillons. Une relation entre ces deux propriétés a été mise en évidence avec un coefficient de corrélation égal à 0,97 (Equation (1.4)).

$$\lambda_{pierre} = 2,71 \times e^{-0,0238 \times N} \quad (1.4)$$

Les équations précédentes ((1.3) et (1.4)) mettent en évidence que plus la porosité de la pierre est élevée, moins celui-ci conduit la chaleur.

### 1.2.1.3 Bilan sur les propriétés des pierres calcaires

Les paragraphes précédents ont souligné la diversité des pierres calcaires existantes. Celle-ci entraîne une variabilité de leurs propriétés physiques et thermiques et donc de leur comportement lorsqu'elles sont utilisées au sein d'un bâtiment. Le Tableau 1.3 synthétise les extremums référencés pour chaque propriété étudiée précédemment.

**Tableau 1.3 : Extremums des propriétés des calcaires [CTMNC, CSTC, RT 2005]**

Propriétés	Min dans les bases de données	Max dans les bases de données
Porosité ouverte (%)	0,4	48,1
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1000	2750
Conductivité thermique (W/m.K)	0,35	3,5

### 1.2.2 Le tuffeau : une pierre calcaire à forte porosité

Parmi les pierres calcaires, le tuffeau est une roche sédimentaire marine dont la formation a eu lieu au Crétacé Supérieur (-91 à -88 millions d'années avant notre ère). Cette pierre est principalement extraite en Touraine et dans le Saumurois [Prigent, 1991]. Elle se retrouve dans les constructions des villes de la Vallée de la Loire (Nantes, Angers, Saumur, Tours, etc.).

Le tuffeau a une proportion de calcite qui varie de 50 à 70% selon le lieu d'extraction. Il est constitué de 1 à 20% de quartz. On y retrouve aussi de la silice qui peut apparaître en concrétion couleur rouille dans la roche aussi appelé « chenard ». De l'opale cristobalite-trydinite et des minéraux argileux sont présents dans la pierre [Beck, 2006].

La pierre de tuffeau a une porosité élevée : elle varie de 35 à 45% en moyenne. Elle a donc une densité apparente faible de l'ordre de 1,3. Sa résistance à la compression est de 9 MPa [Chéné, 1999].

Plusieurs faciès de tuffeau peuvent être distingués :

- Le tuffeau blanc : il s'agit du faciès au grain le plus fin et de meilleure qualité. Il est utilisé pour les monuments emblématiques ;
- Le tuffeau jaune : ce tuffeau est plus grossier et sableux. Il a une porosité plus importante ;
- Le tuffeau gris : cette pierre est de moins bonne qualité, elle est plus sensible aux gels.

#### 1.2.2.1 Les propriétés hygrothermiques du tuffeau

##### 1.2.2.1.1 L'hygroscopicité du tuffeau

La courbe de l'isotherme de sorption d'un matériau traduit l'accroissement de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle il est placé, maintenue à une température donnée. La Fig. 1.6 présente la courbe de l'isotherme de sorption proposée par K. Beck [Beck, 2006] pour un tuffeau extrait de Saint-Cyr-en-Bourg (49, France) pour une température de 20°C.

Nous pouvons constater que le tuffeau est un matériau qui capte facilement l'humidité de l'air. Il peut ainsi contenir une importante quantité d'eau à l'état liquide et vapeur quand il est placé dans un milieu avec un fort taux d'humidité.

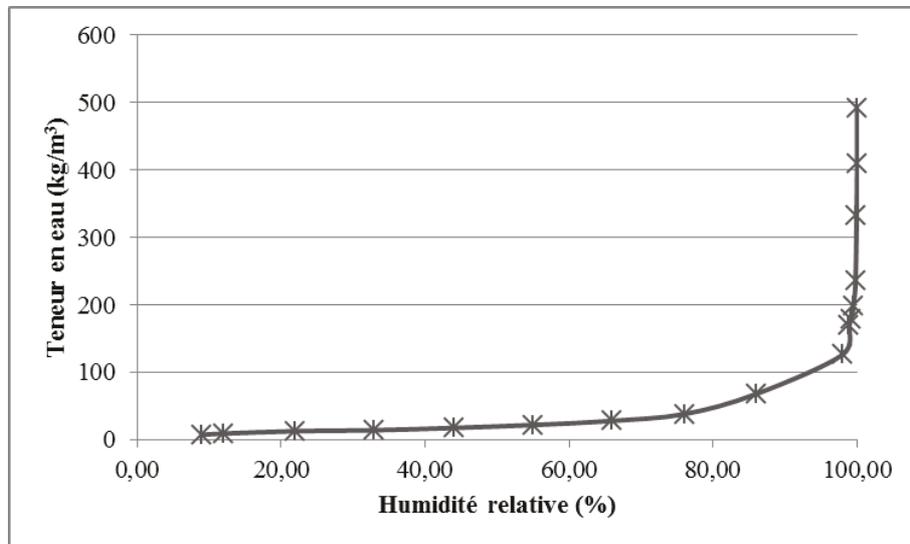


Fig. 1.6 : Isotherme de sorption d'un tuffeau extrait de Saint-Cyr-en-Bourg [Beck, 2006]

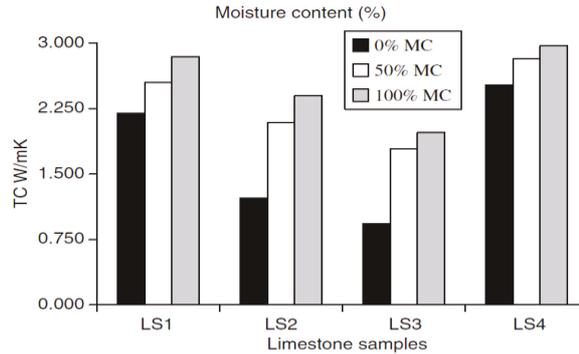
#### 1.2.2.1.2 L'évolution de la conductivité thermique avec la teneur en eau

Un modèle simplifié d'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau a été proposé par Béziat [Béziat, 1987]. Il exprime la conductivité thermique de la pierre en fonction de celle de son squelette solide, de celle de l'eau, de celle de l'air et de son degré de saturation en eau (Equation (1.5)).

$$\lambda = \lambda_{mat}^{(1-N)} \cdot \lambda_{eau}^{N \cdot S_r} \cdot \lambda_{air}^{N \cdot (1-S_r)} \quad (1.5)$$

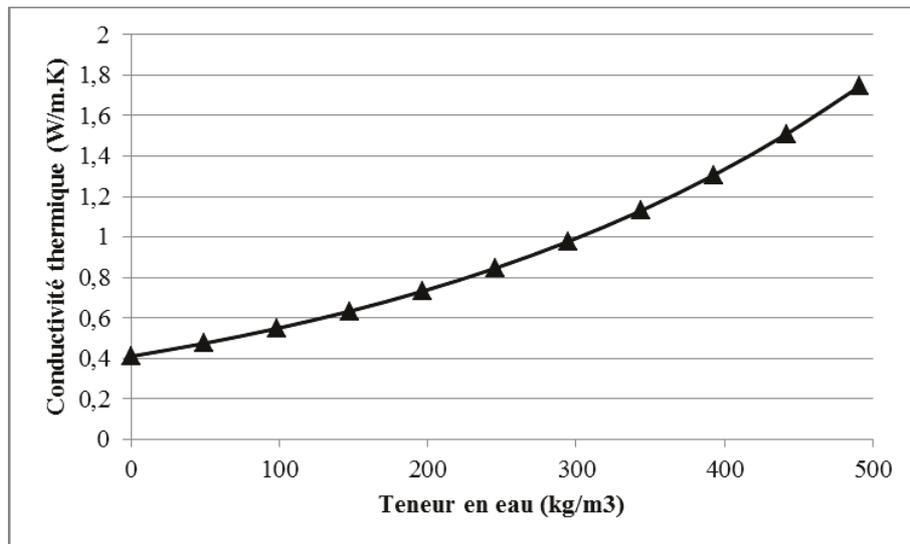
Ainsi, si le degré de saturation d'une pierre passe de 0 à 100%, sa conductivité thermique est multipliée par  $25^N$  ( $\lambda_{eau} = 0,6$  W/m.K est 25 fois plus élevée  $\lambda_{air} = 0,024$  W/m.K). Le comportement thermique des pierres de tuffeau est donc fortement sensible à l'humidité puisqu'elle a une porosité élevée : 45% en moyenne.

Canacki et al. [Canacki, 2007] ont étudié quatre pierres calcaires turques. Les résultats de cette étude sont donnés dans la Fig. 1.7. La conductivité thermique des pierres est présentée en ordonnée. Les dénominations LS1, LS2, etc. correspondent aux noms des échantillons de pierres. Les mesures ont été effectuées pour trois teneurs en eau différentes : 0%, 50% et 100%.



**Fig. 1.7 : Conductivité thermique de quatre pierres calcaires en fonction de leur teneur en eau [Canacki, 2007]**

Ces résultats sont conformes au modèle présenté (Equation (1.5)) : sur les quatre pierres étudiées, l'augmentation de la teneur en eau élève la conductivité thermique du matériau. J.-P. Laurent [Laurent, 1998] a réalisé des mesures de conductivité thermique sur le tuffeau à l'état sec. La valeur obtenue est 0,41 W/m.K. Nous appliquons le modèle de Béziat au tuffeau pour une porosité de 45% et une conductivité thermique sèche de 0,41 W/m.K (Fig. 1.8).



**Fig. 1.8 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau - Modèle de Béziat appliqué au tuffeau**

Entre l'état sec et l'état saturé, d'après le modèle de Béziat, la conductivité thermique du tuffeau est multipliée par plus de 4 : elle passe de 0,4 W/m.K à 1,7 W/m.K à l'état saturé.

#### 1.2.2.2 Bilan sur le matériau tuffeau

Parmi les pierres calcaires, le tuffeau présente des spécificités hygrothermiques particulières. Le tuffeau à l'état sec, grâce à son importante porosité (en moyenne 45%), est un matériau de construction *a priori* peu conducteur. Cependant, à cause de cette même porosité élevée, son comportement thermique peut subir de grandes variations selon la teneur en eau qu'il contient. Sa conductivité varie du simple au quadruple entre un état sec et un état saturé.

Le Tableau 1.4 synthétise les principales caractéristiques de la pierre de tuffeau.

**Tableau 1.4 : Principales propriétés du tuffeau**

Propriétés	Valeur
Porosité (%)	45
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1400
Conductivité thermique sèche (W/m.K)	0,4
Conductivité thermique à l'état saturé (W/m.K)	1,7
Teneur en eau maximum (kg/m <sup>3</sup> )	490

## 1.3 Les bâtiments anciens en tuffeau

Le tuffeau de par son caractère poreux est un matériau facile à travailler [Smith, 2010]. Il a donc été utilisé pour la construction de nombreux édifices anciens dans les régions Pays de la Loire et Centre d'où il était extrait [Prigent, 1991].

### 1.3.1 Les typologies de bâtiments en tuffeau

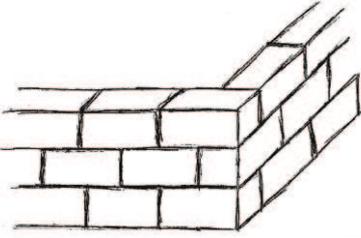
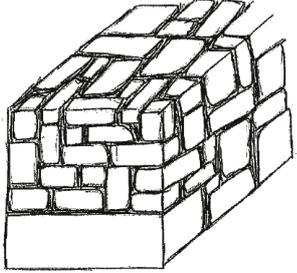
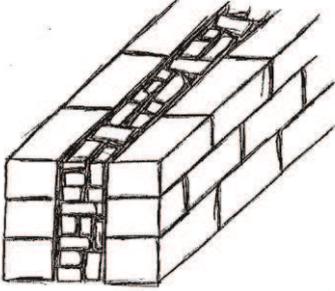
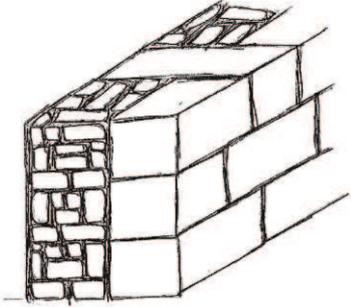
Les bâtiments en tuffeau reprennent les caractéristiques des bâtiments anciens dont l'hétérogénéité des constructions. Celle-ci se situe à deux échelles : celle de l'enveloppe et celle du patrimoine bâti. Ainsi, nous décrivons d'abord les différentes parois maçonnées observables sur le terrain puis les principales typologies de maisons individuelles sont présentées.

#### 1.3.1.1 Les parois maçonnées

Les pierres de tuffeau sont extraites de carrière et proposées pour la maçonnerie sous deux formes :

- En pierre de taille : elle est utilisée principalement dans les maisons bourgeoises, pour les façades visibles, pour les chaînages d'angle et pour les encadrements de menuiseries. Son épaisseur a évolué au cours des siècles mais elle reste comprise entre 22 et 27 cm [Prigent, 1991].
- En moellons : il existe différents types de moellons (équarris : forme parallélépipédique ou bloqués : tels qu'ils ont été extraits). Ils sont mis en œuvre avec ou sans mortier.

La construction d'une paroi peut faire appel aux deux formes de pierre. Les visites sur le terrain et les rencontres avec les artisans du secteur nous ont permis de mettre en évidence quatre typologies principales de murs.

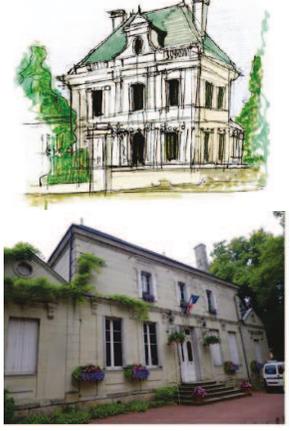
Typologie de paroi	Épaisseur	Schéma
Mur en pierre de taille	De 22 à 27 cm	
Mur en moellons	$\geq 50$ cm	
Mur en double parement de pierre de taille et blocage intérieur	$\geq 50$ cm	
Mur en pierre de taille et moellons	$\geq 50$ cm	

Il n'est pas rare d'observer au sein d'un même bâtiment, deux voire trois typologies de parois suivant les orientations et/ou les périodes de construction.

### 1.3.1.2 Les maisons individuelles

Les maisons individuelles en tuffeau peuvent être classées en trois catégories suivant l'historique de la construction, l'implantation du bâti et les techniques constructives utilisées. Les données présentées ici (Tableau 1.5) sont issues des fiches de synthèse du PNRLAT [PNRLAT], des visites sur terrain et de rencontres avec des architectes des régions Pays de la Loire et Centre.

**Tableau 1.5 : Description des typologies de maisons individuelles en tuffeau**

Typologies	Maison rurale	Maison de bourg	Maison de maître
	 <p><b>Fig. 1.9 : Maison rurale. Haut : schéma [PNRLAT]. Bas : Cheviré Le Rouge</b></p>	 <p><b>Fig. 1.10 : Maison de bourg. Haut : schéma [PNRLAT]. Bas : Saint-Mathurin sur Loire</b></p>	 <p><b>Fig. 1.11 : Maison de maître. Haut : schéma [PNRLAT]. Bas : Le Puy Notre Dame</b></p>
Date de construction	Jusqu'au XIXème siècle	Jusqu'au XXème siècle	XIXème siècle
Agencement des bâtiments	Hameaux ou isolés Bâtiments agricoles dans le prolongement du bâtiment principal	Façades alignées sur rue	Surélevée (butte, colline, etc.)
Toiture	Deux pans	Deux pans	Quatre pans
Fondation	Sans	Vide-sanitaire ou cave semi-enterrée	Vide-sanitaire ou cave semi-enterrée
Soubassement	Sans jusqu'au XIXème siècle où apparition de soubassements en pierres froides	Sans jusqu'au XIXème siècle où apparition de soubassements en pierres froides	Soubassement en pierres froides
Parois	Moellons avec mortier terre, jointoyés à la chaux : 50 à 70 cm Parfois Sud en pierre de taille	Pierre de taille : 22 à 27 cm Parfois façades secondaires en moellons	Pierre de taille : 22 à 27 cm Parfois double parement pierre de taille. Parfois moellons sur façades secondaires
Ornements	Peu d'ornement : corniches et encadrements de baie travaillés dans certains cas	Ornement sur façade sur rue pour montrer le statut social	Frontons sculptés, linteaux et encadrements travaillés Lucarne centrale Nombreux ornements

Les problématiques de réhabilitation varient suivant les typologies de maisons individuelles. Notons par exemple que l'isolation thermique extérieure d'une maison de maître est très rare du fait des nombreux ornements présents sur les façades. L'alignement sur rue des façades des maisons de bourg peut aussi être pénalisant de ce point de vue.

### **1.3.2 Les altérations des bâtiments en tuffeau**

#### **1.3.2.1 Les principaux facteurs d'altérations**

Les pierres de construction subissent les variations des conditions climatiques et des ambiances intérieures qui peuvent générer des désordres [Alomari, 2014], [Chéné, 1999]. Les principaux facteurs d'altérations que nous avons identifiés sont présentés ici.

##### *1.3.2.1.1 L'humidité*

L'humidité est le facteur d'altération majoritaire des pierres de construction [Beck, 2006], [Dessandier, 2000], [Ezzdine, 2009], [Kieslinger, 1950]. Ses actions peuvent être de natures différentes : chimique, physique ou bien biologique. Nous présentons dans ce qui suit quelques sources pouvant être à l'origine de la présence d'eau au sein de la pierre :

- Humidité originelle : elle est présente dans les pores de la pierre au moment de son extraction ou la pénètre pendant une phase de stockage à l'air libre.
- Pluie : son action est différente suivant la nature de la pluie : fréquente, longue durée, composition chimique, etc. L'eau pénètre alors plus ou moins profondément dans la paroi suivant la nature des matériaux la constituant (pierre et mortier) et de l'orientation de la façade.
- Remontées capillaires : il s'agit de l'humidité du sol qui remonte dans les matériaux par capillarité (en l'absence de barrière).
- Défauts constructifs : il s'agit généralement de défauts liés à l'évacuation des eaux et donc à la stagnation de celle-ci.

##### *1.3.2.1.2 La cristallisation des sels*

Ce mécanisme est nécessairement lié à la présence d'eau [Beck, 2006], [Cardell, 2003]. Il est dû au transport de CO<sub>2</sub> sous forme d'acide dans l'eau liquide. Au contact du carbonate de calcium, le CO<sub>2</sub> la transforme en bicarbonate de calcium et le transporte. Au moment de l'évaporation de l'eau, le bicarbonate de calcium cristallise de nouveau au sein de la pierre ou en surface sous forme de carbonate de calcium et bouche les pores atteints lors du transport. Suivant le trajet des particules d'eau, le phénomène peut être réversible ou non.

##### *1.3.2.1.3 Les changements de température*

Un changement de température induit nécessairement un changement de volume des matériaux plus ou moins perceptible [Ezzdine, 2009], [Beck, 2006]. Le changement de volume peut avoir lieu au sein de la matrice solide et des minéraux. Il peut aussi affecter l'eau présente dans le milieu avec le cas du gel par exemple.

#### **1.3.2.2 Les altérations observées sur les bâtiments en tuffeau**

Afin de mieux connaître le patrimoine en tuffeau et d'identifier ses points forts et ses faiblesses, 16 bâtiments en tuffeau ont été visités et ont fait l'objet de la rédaction de cahier technique. Les visites ont eu lieu au printemps 2011 sur un panel de maisons individuelles. Les trois typologies présentées au paragraphe 1.3.1.2 sont représentées dans ce panel. Par

ailleurs, les bâtiments retenus présentent différents niveaux de réhabilitation : absence de réhabilitation, en cours de travaux et réhabilités. Il est toutefois nécessaire de noter que les bâtiments ont été sélectionnés en partenariat avec le PNRLAT et sur la base du volontariat de leurs propriétaires, ceux-ci étaient donc majoritairement sensibilisés aux problématiques de préservation du bâti en tuffeau et aux questions d'économies d'énergie. Les principales caractéristiques de l'ensemble des bâtiments numérotés de 1 à 16 sont données en annexe A. Nous présentons dans ce qui suit les altérations que nous avons observées sur le terrain.

### 1.3.2.2.1 *L'exfoliation ou détachement en plaques*

Cette altération se caractérise par le détachement de la couche supérieure de la pierre dont l'épaisseur peut varier de quelques millimètres à quelques centimètres. Le détachement met à nu la partie sous-jacente d'aspect pulvérulent.

Cette maladie de la pierre se développe principalement sur les zones exposées à la pluie ou aux remontées capillaires [Beck, 2006]. Une des causes est l'évaporation importante de l'eau qui provoque une forte concentration en sels et gypse dans la pierre. Leur accumulation exerce des pressions sur la plaque supérieure qui se détache.

Berger et al. [Berger, 2012] précisent une seconde source d'exfoliations liées au gel. Si l'espace vide au sein de la pierre n'est pas suffisant pour permettre l'expansion de la glace, il y a un risque que la pression provoquée détériore la matrice solide.



**Fig. 1.12 : Détachement en plaques – Bâtiment n°1 (Source : auteure)**

Sur la seconde rangée de pierres en partant du bas de l'édifice, un détachement de plaques de quelques centimètres est observés ce qui met à nu la partie sous-jacente de la pierre.

### 1.3.2.2.2 *Les efflorescences*

Cette maladie se caractérise par l'apparition en surface de « tâches » de sels ou de rouille. Elle est liée à l'évaporation d'une eau chargée en sels et/ou en fer. Suivant la nature de la pierre, des sels et la concentration en fer, ces efflorescences présenteront des morphologies différentes.

Cette altération ne présente qu'un impact esthétique quand elle a lieu en surface. Cependant, quand elle se produit au cœur de la pierre, elle peut toucher à l'intégrité de celle-ci en provoquant par exemple des exfoliations.



**Fig. 1.13 : Efflorescences – Bâtiment n°1**  
(Source : auteure)

L'ellipse permet de situer l'apparition d'efflorescences couleur rouille. Celles-ci sont dues à une évaporation en surface d'eau chargée en fer.

#### *1.3.2.2.3 Les formations de croûtes*

Les croûtes formées sur la pierre peuvent être de natures différentes. Nous nous intéressons à deux types de croûtes : la patine et les croûtes noires.

La patine, aussi appelée calcin pour les pierres calcaires, est la première réaction de la pierre aux conditions extérieures après son extraction. La structure de la patine est plus dure que celle de la pierre elle-même. Sa composition, sa couleur et son épaisseur dépendent de l'âge et de la nature de la pierre. Cette croûte est due à la dissolution des minéraux provoqués par la pluie et l'accumulation en surface des sels, carbonates et sulfates qui bouchent la porosité. Il existe deux écoles sur les avantages et inconvénients de cette patine : pour certains, elle est bénéfique et protège la pierre des agressions [Concha-Lozano, 2012] ; pour d'autres il s'agit d'une maladie qu'il est nécessaire de soigner pour préserver l'intégrité structurelle de la pierre. Une des problématiques de cette croûte est que son détachement met à nu la partie sous-jacente de la pierre.

Les croûtes noires sont principalement présentes dans les zones urbaines ou fortement polluées. Elles se forment par dépôt de particules noires (pollution atmosphérique, suies, etc.) qui sont ensuite cimentées grâce aux sels qui proviennent de la pierre. De la même manière que pour la patine, la problématique des croûtes reste leur détachement et la mise à nu du cœur de la pierre qui subira alors lui aussi des altérations.



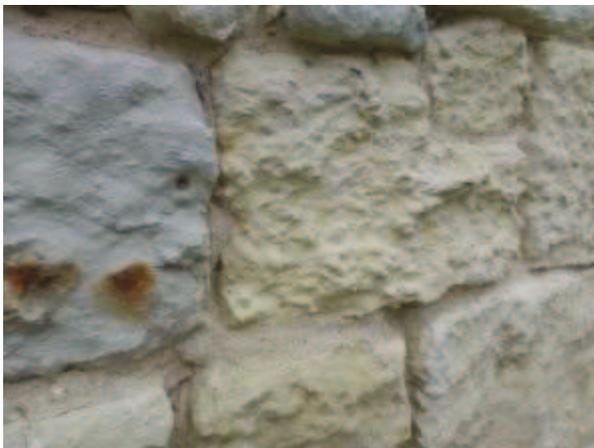
Sur la façade exposée à la route, une importante croûte noire est observée sans doute liée à la pollution.

**Fig. 1.14 : Croûte noire – Bâtiment n°3**  
(Source : auteure)

#### 1.3.2.2.4 *Les alvéolisations et désagrégations sableuses*

Dans les endroits humides, le ciment de la calcite se dissout et les sels cristallisent. Les grains minéraux se désolidarisent alors du fait du manque de ciment. L'érosion entraîne une dégradation de la pierre sous forme de poudre qui s'accumule alors au pied du mur. Suivant la pluie et le vent auxquels sont soumis la pierre, l'érosion est plus ou moins rapide.

Par ailleurs, l'hétérogénéité structurelle de la pierre entraîne des différences dans la cinétique d'érosion ce qui provoque l'effet d'alvéolisation.



Les pierres de différentes natures (plus grises à gauche et jaunâtre à droite) ne présentent pas le même profil d'alvéolisation.

**Fig. 1.15 : Alvéolisations – Bâtiment n°18**  
(Source : auteure)

#### 1.3.2.3 Bilan sur les altérations des bâtiments en tuffeau

Le tuffeau est une pierre qui s'altère facilement. Les nombreuses altérations que nous avons observées lors de nos visites provoquent pour certaines d'entre elles une perte d'épaisseur. Cela induit donc un risque structurel avec une baisse de la résistance mécanique de la paroi. La principale source de ces désordres est liée à la présence d'eau et à son accumulation. Pour prévenir et guérir ces désordres, il est donc nécessaire d'éviter l'accumulation d'eau

(remontées capillaires, pluie stagnante, etc.). Par ailleurs, les pierres fortement abimées pourront être remplacées lorsque le risque structurel est important.

### **1.3.3 Les ambiances estivales des bâtiments en tuffeau**

Les bâtiments anciens sont réputés pour leur confort thermique estival (cf. paragraphe 1.1.2.3). Dans cette partie, nous vérifions ce constat pour le patrimoine en tuffeau grâce à des mesures expérimentales réalisées sur des maisons individuelles. L'objectif est d'améliorer la compréhension du comportement de ce patrimoine.

Dans un premier temps, le protocole de mesures est présenté puis une analyse en deux temps est menée : d'abord sur les températures ambiantes puis sur l'humidité relative. Il est à noter que cette analyse sera approfondie au Chapitre 3.

#### **1.3.3.1 La caractérisation expérimentale de 6 bâtiments en tuffeau**

Parmi les 16 bâtiments en tuffeau visités au printemps 2011, six ont été sélectionnés pour caractériser leur comportement hygrothermique en saison estivale. La sélection répond à plusieurs critères :

- Représenter les trois typologies de maisons individuelles : rurale, de maître et de bourg ;
- Représenter différents niveaux de réhabilitation.

Les principales caractéristiques de ces six bâtiments sont données dans le Tableau 1.6.

**Tableau 1.6 : Caractéristiques des maisons individuelles suivies**

Cas	A	B	C	D	E	F
Vue	 Maison rurale	 Maison maître	 Gîte collectif	 Maison bourg	 Maison de maître	 Maison troglodyte
Latitude	47°15'38''N	47°35'47''N	47°08'07''N	47°24'34''N	47°19'31''N	47°13'00''N
Longitude	00°24'23''E	00°10'51''W	00°07'19''E	00°19'10''W	00°03'19''W	00°04'00''E
Ventilation	Naturelle*	Naturelle*	Double-flux	Naturelle**	Naturelle*	Simple flux
Occupation (nombre de personnes)	2	4	Variable (gîte)	2	2 en semaine, 4 le week-end	4
Nombre de pièces instrumentées	2	3	5	4	4	3

\*Ventilation naturelle par des entrées d'air sur menuiseries et des conduits d'évacuation dans les pièces humides

\*\*Ventilation naturelle par infiltrations dues aux défauts d'étanchéité du logement

Dans chaque bâtiment, certaines pièces ont été instrumentées. Les pièces généralement suivies sont le séjour, la cuisine, la chambre et la salle de bain. Suivant les cas, certains ajustements ont été réalisés. Le schéma de principe de l'instrumentation hors période de chauffe est donné dans la Fig. 1.16.

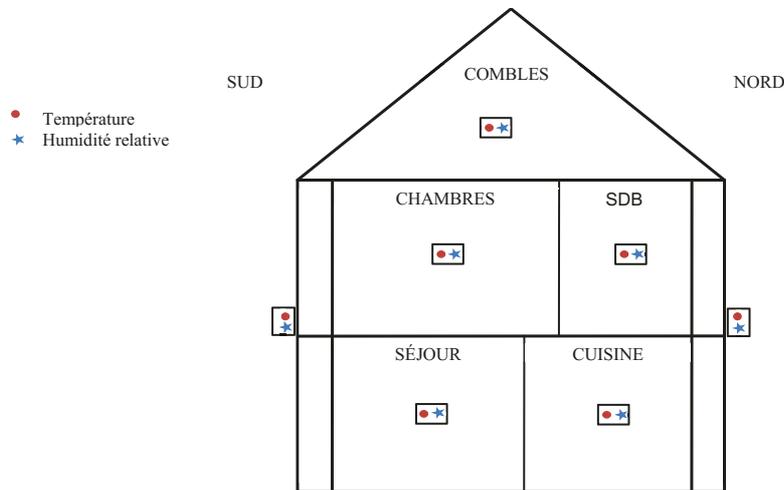


Fig. 1.16 : Schéma de principe de l'instrumentation estivale

Pour l'ensemble des pièces suivies, les conditions hygrothermiques (température et humidité relative) ont été mesurées pendant deux mois d'été. Pour les bâtiments A, B, C et F, les mesures ont été menées du 1<sup>er</sup> juillet au 31 août 2011. Le bâtiment D a été suivi du 1<sup>er</sup> juillet au 31 août 2012. Pour le bâtiment E, les mesures ont duré du 1<sup>er</sup> juin au 24 juillet 2013. Les capteurs utilisés sont des capteurs ONSET avec une incertitude de  $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$  pour la mesure de température et de  $\pm 2,5\%\text{RH}$  pour la mesure de l'humidité relative. Le pas de temps d'enregistrement des mesures est de 10 minutes.

Dans l'ensemble, l'occupation des maisons instrumentées correspond à celle d'une famille active. En semaine, les personnes sont présentes en soirée, la nuit et pendant les repas. Le week-end, les pièces sont occupées toute la journée.

### 1.3.3.2 Analyse des températures ambiantes intérieures en été

Au total, 21 pièces ont été suivies sur deux mois d'été. Nous les avons classées en cinq catégories selon leurs caractéristiques :

- Pièce sous toiture non isolée (1 cas) ;
- Pièces sous toiture isolées (5 cas) ;
- Pièces en tuffeau non isolées (4 cas) ;
- Pièces en tuffeau isolées (9 cas) ;
- Pièces troglodytes (2 cas).

La Fig. 1.17 présente la température moyenne et son amplitude mesurées dans chacune des pièces suivies sur les deux mois d'été.

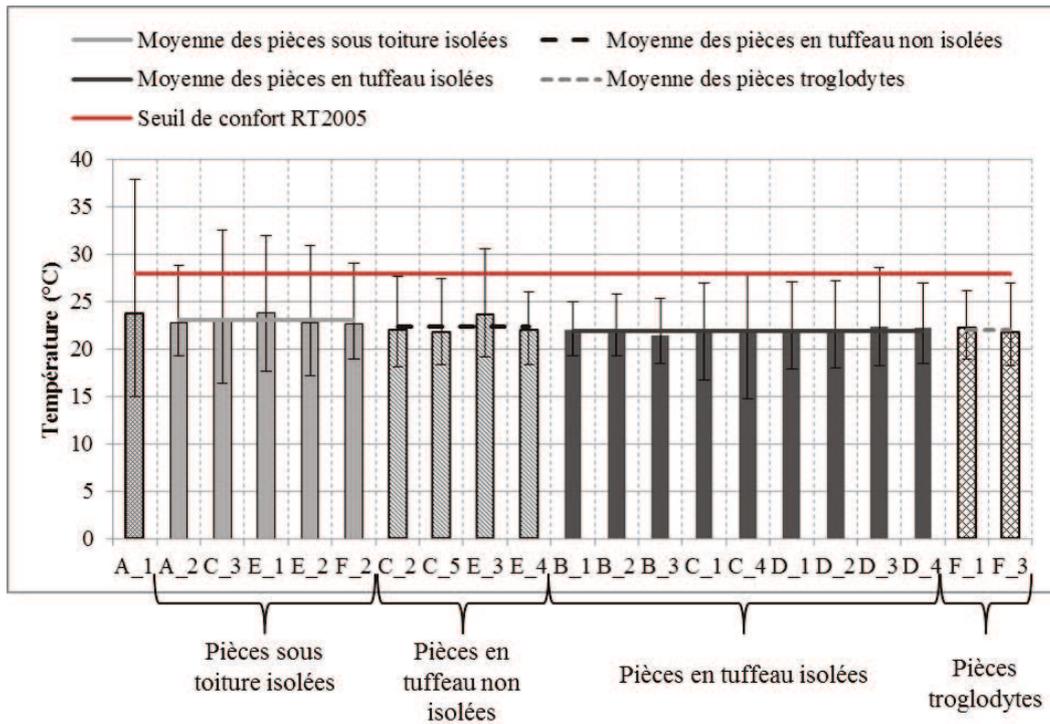
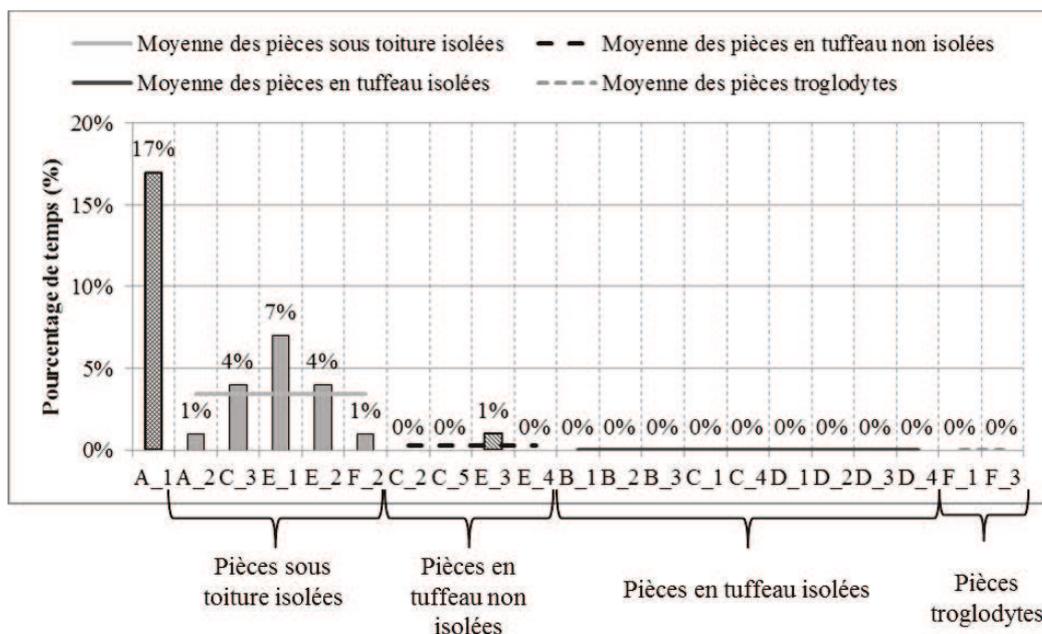


Fig. 1.17 : Température moyenne et amplitude des 21 pièces sur un été

Pour l'ensemble des pièces, les températures moyennes sont confortables en été (comprises entre 20°C et 25°C) et globalement équivalentes sur le panel (moyenne de 22°C). Toutefois, certaines pièces présentent des maximums de températures élevés. Par exemple, la pièce C\_3 atteint une valeur de 32°C. Les pièces sous toiture apparaissent être les plus chaudes avec des maximums de température supérieurs à 28°C.

Le pourcentage de temps où la température dépasse les 28°C, seuil de confort dans la RT2005 [RT2005], sur les deux mois d'été est alors calculé pour caractériser les surchauffes estivales (Fig. 1.18). Ce pourcentage est calculé pour une évolution horaire des températures.



**Fig. 1.18 : Pourcentage de temps où la température intérieure dépasse 28°C dans 21 pièces sur un été**

La pièce E\_3 se distingue du panel des pièces en tuffeau non isolées avec une température moyenne de 24°C pour une moyenne du panel de 22°C et un maximum atteint de 31°C. Ces résultats peuvent être expliqués par trois caractéristiques de cette zone :

- Une triple exposition (Nord/Sud/Ouest) qui lui fait bénéficier d'un rayonnement solaire important ;
- Son ratio de surface vitrée par rapport à la surface opaque qui est de 20% soit une valeur très élevée par rapport à la moyenne des bâtiments anciens : 10% (paragraphe 1.1.1) ;
- Sa fonction de cuisine qui lui apporte des gains internes importants.

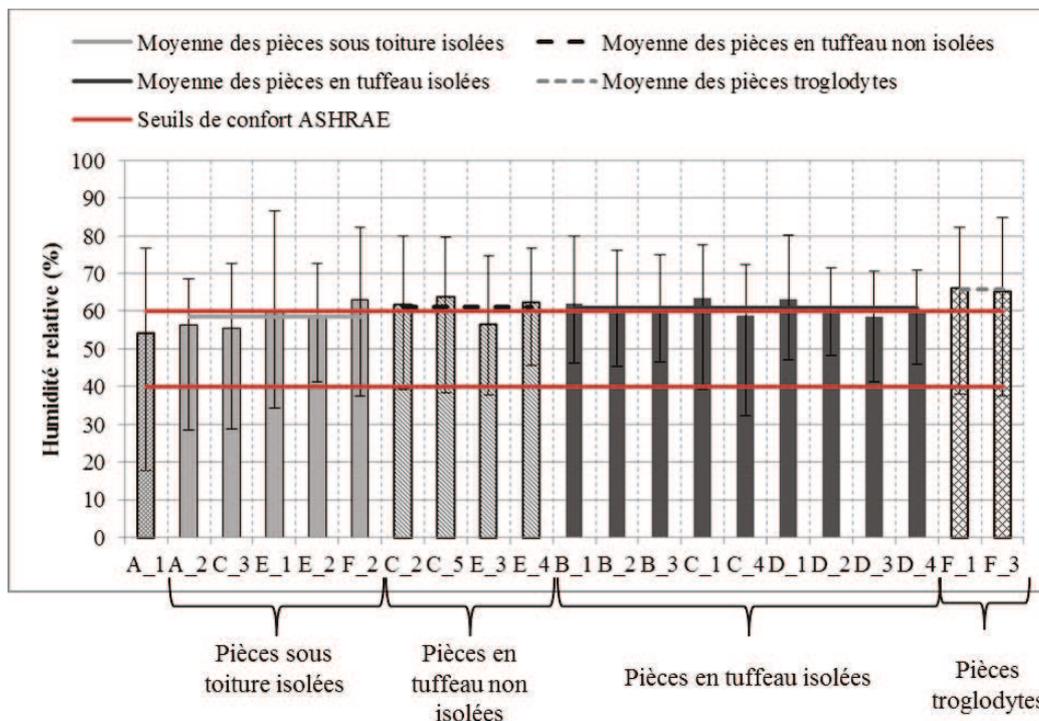
L'ensemble des pièces instrumentées et occupées (la pièce A\_1 n'est pas occupée) présente toutefois des pourcentages de temps en surchauffe faibles avec un maximum de 7% du temps sur un été. Par ailleurs, nous pouvons noter que l'isolation des pièces en tuffeau ne pénalise pas ce confort d'été puisque sur le panel que nous avons suivi, la température intérieure ne dépasse jamais les 28°C.

Le confort thermique estival apparaît donc être une caractéristique des bâtiments en tuffeau. Stéphan et al. [Stéphan, 2014] ont mis en évidence que l'inertie thermique de ces pièces pouvaient être la source de ce confort estival. Il est toutefois nécessaire de distinguer plusieurs zones au sein d'un même logement : les pièces sous toiture présentent un risque plus élevé de surchauffe que les pièces en tuffeau.

### 1.3.3.3 Analyse de l'humidité relative ambiante intérieure en été

Comme pour la température, l'humidité relative a été mesurée dans 21 pièces pendant deux mois d'été.

La Fig. 1.19 présente l'humidité relative moyenne de chaque pièce et son amplitude.



**Fig. 1.19 : Humidité relative et amplitude des 21 pièces sur un été**

Nous rappelons que selon l'ASHRAE [ASHRAE 55], une ambiance est jugée confortable d'un point de vue hygrique lorsque son humidité relative est comprise entre 40 et 60%. Les pièces suivies présentent une humidité relative moyenne élevée (comprises entre 54 et 66%). Par ailleurs, leurs amplitudes de variation sont importantes et certains maximums dépassent les 80% (E\_1, F\_2, F\_1 et F\_3). Les minimums constatés sont compris entre 28% et 47% pour les pièces occupées. Ceux-ci sont parfois faibles (inférieurs à 40%) mais restent dans les plages sanitaires admissibles [Schriver, 2009].

Le pourcentage de temps où l'humidité relative est supérieure à 60% est calculé pour chacune des pièces (Fig. 1.20). L'objectif est de caractériser les gênes potentielles pour les occupants : une humidité relative élevée mais ponctuelle n'est pas nécessairement pénalisante. A l'inverse, des périodes plus régulières peuvent favoriser le développement de moisissures et d'acariens [Bergeron, 2009], [Schriver, 2009].

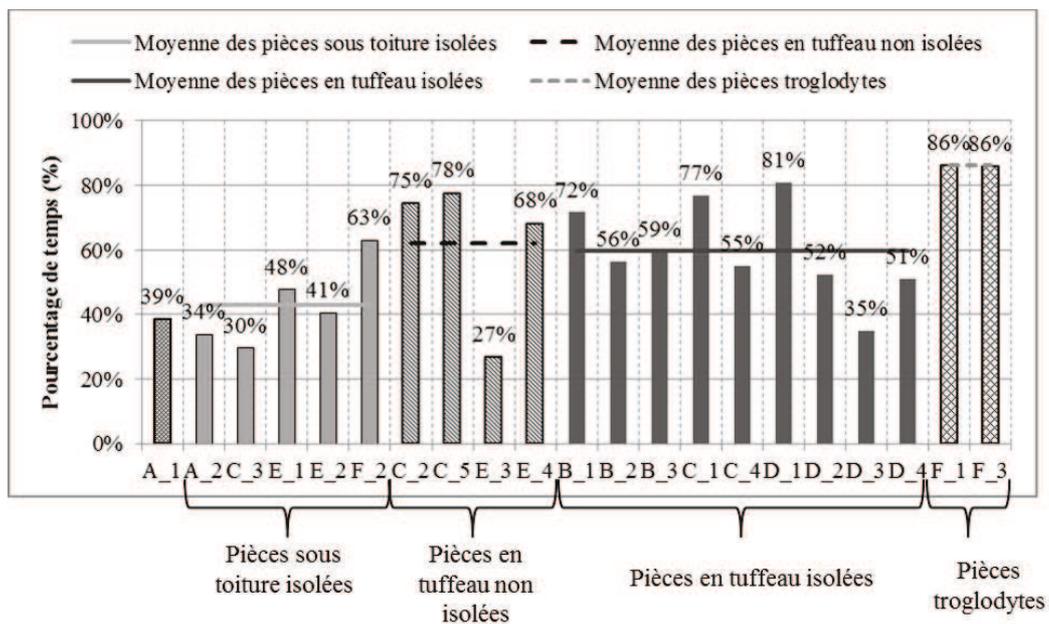


Fig. 1.20 : Pourcentage de temps où l'humidité relative intérieure dépasse 60% dans 21 pièces sur un été

L'ensemble des pièces montrent que pendant au moins un quart de l'été, l'humidité dépasse la limite haute de 60%. Les pièces troglodytes sont les plus humides avec une humidité relative supérieure à 60% pendant plus de 80% de l'été.

Les pièces sous toiture sont les plus sèches. L'humidité relative y dépasse 60% pendant moins de 45% du temps. En ce qui concerne les pièces en tuffeau, il y a peu de différence entre les pièces isolées (60% du temps) et celles non isolées (62% du temps).

Au sein d'une même catégorie, les écarts sont importants. Les sources de ces écarts peuvent être liées à l'occupation (source d'humidité, ouverture des fenêtres, etc.) mais aussi à l'environnement proche du bâtiment : protection aux pluies, point d'eau, etc.

#### 1.3.3.4 Bilan sur les ambiances estivales des bâtiments en tuffeau

Les mesures réalisées sur ce panel de six bâtiments a mis en évidence que les températures intérieures sont globalement confortables en été. Il est toutefois nécessaire de différencier la problématique des pièces en tuffeau de celles des pièces sous toiture car ces dernières ont des amplitudes de température plus élevées et présentent des surchauffes en été.

Par ailleurs, nous avons constaté que l'humidité relative atteint des valeurs élevées pendant des périodes régulières sur l'été. Les pièces troglodytes sont les plus humides avec une humidité relative supérieure à 60% pendant plus de 80% du temps.

De plus, le panel comportait des pièces en tuffeau non isolées et isolées, la comparaison de ces catégories n'a pas mis en évidence d'écarts notables. L'isolation n'a pas d'effet sur les conditions ambiantes intérieures de ce panel.

## 1.4 Conclusions

Ce chapitre introductif a permis de mieux connaître le patrimoine ancien en tuffeau. Ainsi, certaines particularités de ces bâtiments sont à considérer avant de s'intéresser à leur réhabilitation.

La diversité de ce patrimoine est un élément clé : ne serait-ce qu'à l'échelle du tuffeau, nous pouvons noter une importante variation des propriétés en fonction du lieu d'extraction de la pierre. Par ailleurs, à l'échelle du bâtiment, nous avons pu distinguer trois catégories de maisons individuelles avec des particularités qui ont un impact sur les stratégies de réhabilitation qui peuvent être proposées. Par exemple, la présence d'ornements sur une maison de maître ou l'absence de soubassement en pierres dures dans les maisons rurales vont affecter les réhabilitations.

Ce patrimoine présente aussi des problématiques spécifiques qu'il est nécessaire d'appréhender avant de proposer des solutions. La présence d'eau dans ces bâtiments pose ainsi plusieurs difficultés. Tout d'abord, elle a un impact significatif sur les propriétés du tuffeau dont la conductivité thermique peut être multipliée par quatre lorsque la pierre est saturée. De plus, elle est la cause principale des altérations de ces bâtiments qui peuvent amener à une réduction critique de l'épaisseur des parois.

Les ambiances intérieures de ces bâtiments montrent qu'elles sont confortables d'un point de vue thermique en été avec peu de temps en surchauffe. Toutefois, l'humidité relative peut y être importante. Par ailleurs, au sein d'un même bâtiment, des différences notables de comportement sont observées entre les pièces en tuffeau et celles sous toiture.

L'ensemble de ces spécificités doit donc être considéré pour proposer des stratégies de réhabilitation adaptées à ce patrimoine.

Dans ce chapitre, nous avons pu identifier les problématiques du patrimoine en tuffeau en améliorant notre compréhension de leur comportement à l'échelle matériau et à l'échelle du bâtiment. Ces problématiques peuvent avoir un effet positif ou négatif sur les propositions de stratégies de réhabilitation. Cet état des lieux doit donc être complété par une vision des réhabilitations possibles de ce patrimoine et des potentiels retours d'expérience avant de proposer une démarche complète de réhabilitation.



## **Chapitre 2      Réhabiliter le bâti en pierre calcaire**

Le chapitre 1 a mis en évidence différentes spécificités du patrimoine en pierre calcaire et plus spécifiquement en tuffeau qui peuvent affecter le processus de réhabilitation. La présence d'eau dans les parois, le confort thermique d'été sont autant de données d'entrée à considérer pour proposer des stratégies de réhabilitation adaptées et pérennes. Dans ce chapitre, nous cherchons à dresser un état des connaissances de la réhabilitation des bâtiments d'un point de vue général et puis plus particulièrement de celles des bâtiments en tuffeau.

Avant d'étudier les actions de réhabilitation existantes, nous nous concentrons sur les raisons qui amènent les acteurs de la construction à réhabiliter ce patrimoine ancien en tuffeau. Nous distinguons alors ici les enjeux généraux de la réhabilitation des bâtiments de ceux des bâtiments anciens en tuffeau qui comme l'a montré le chapitre 1 soulèvent des questions différentes.

Ensuite, nous nous concentrons sur la conception à proprement parler d'une stratégie de réhabilitation (c'est-à-dire les travaux qui seront mis en œuvre). A partir de la littérature et de visites de chantier, nous synthétisons les travaux possibles sans toutefois prétendre à l'exhaustivité. Par ailleurs, des retours d'expérience et des études menées par d'autres institutions nous permettent de dresser un bilan des points de vigilance à considérer lors de la réhabilitation de ce patrimoine, des actions à éviter et de celles à favoriser.

La dernière étape de ce chapitre détermine la suite de l'ensemble de ce manuscrit : le processus de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau est construit à partir des éléments identifiés sur le patrimoine étudié et sur sa réhabilitation, les différentes étapes menant à la mise en place des travaux.

Le positionnement de ce travail au sein de ce processus et les étapes de la thèse qui en découlent sont explicités.

## 2.1 Les enjeux de la réhabilitation des bâtiments en tuffeau

L'ADEME [ADEME, 2013] dresse un bilan des travaux de réhabilitation effectués sur les bâtiments existants de manière générale. Les principaux travaux concernent l'isolation du bâti pour 70% des cas, les 30% restants ont trait au système de chauffage.

La pose de double vitrage est l'action la plus courante (24%). Toutefois, l'isolation des sols et toiture (19%) et des parois verticales (13%) ont une part significative.

Les occupants interrogés dans le cadre de cette étude (sondage TNS-Sofres) évoquent plusieurs raisons à l'engagement de ce type de travaux. En première position, nous retrouvons la réduction de la facture énergétique. L'amélioration de la qualité du bâti est la seconde raison évoquée alors que le confort intérieur n'apparaît dans ce sondage qu'en troisième position.

La réhabilitation des bâtiments en tuffeau présente des différences par rapport aux bâtiments existants en général. En effet, la diversité de la nature du tuffeau et des modes constructifs font que l'ensemble de ce patrimoine n'est pas connu d'une façon approfondie. Cette méconnaissance pénalise l'étude de l'impact des réhabilitations.

Enfin des enjeux spécifiques à ce patrimoine sont à considérer : les particularités telles que l'inertie thermique ou la perspiration des murs en tuffeau doivent être intégrées à la réflexion sur les stratégies de rénovation à adopter.

Bien que la raison principale d'une réhabilitation énergétique soit l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment, d'autres raisons multiples et variées motivent la décision d'engager de tels travaux. Dans un premier temps et sans ambition d'être exhaustif, nous dressons une liste des enjeux de la réhabilitation thermique d'un bâtiment plus particulièrement en tuffeau. Par la suite, nous nous intéressons aux contraintes réglementaires qui peuvent s'appliquer.

### 2.1.1 Pourquoi réhabiliter les bâtiments anciens en tuffeau

#### 2.1.1.1 Améliorer la performance énergétique du bâtiment

Le changement climatique est au centre des politiques environnementales françaises depuis la loi Grenelle en 2007. L'efficacité énergétique des bâtiments a été identifiée par le GIEC comme un axe prioritaire pour lutter contre le changement climatique. Elle a un poids d'autant plus fort dans la construction que ce secteur représente près de 40% de la consommation énergétique mondiale [CGDD, 2013].

Afin de lutter contre le réchauffement climatique, la France s'est engagée à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 (loi POPE du 13 juillet 2005). L'atteinte de ces objectifs n'est possible que si l'énergie consommée dans le secteur du bâtiment (le plus stratégique avec celui des transports) est maîtrisée.

Le taux de renouvellement du parc bâti résidentiel étant d'environ 1% [Cantin, 2010], les efforts de réduction des consommations ne doivent pas oublier le parc existant qui représente par ailleurs un potentiel d'économie significatif.

L'enjeu de la performance énergétique du bâtiment ancien prend donc position autant à une échelle mondiale que nationale. Il est traduit à l'échelle française en mars 2013 par le Plan de Rénovation Énergétique de l'Habitat (PREH). Ce plan prévoit d'assister techniquement et financièrement les ménages qui envisagent une réhabilitation de leur logement. Les politiques publiques cherchent à inciter les particuliers à réhabiliter leur bâtiment. A cette échelle plus locale, tout un chacun a un intérêt à réduire les consommations énergétiques de son bâtiment pour diminuer directement la facture énergétique [ADEME, 2013].

#### 2.1.1.2 Assurer la pérennité du parc ancien

L'ADEME [Siret, 2004] soulève la nécessité de rénover le parc ancien pour en assurer la pérennité et conserver ainsi les aspects culturels et sociaux qui y sont liés.

Une partie du parc ancien se situe dans les centres villes. Qui dit consommations dans le bâtiment dit généralement celles qui visent à son usage, or la baisse d'attractivité du parc ancien des centres villes peut pousser les ménages vers des constructions neuves plus performantes énergétiquement mais plus éloignées des services. Les émissions de gaz à effet de serre et les consommations énergétiques vont alors de pair avec la hausse des déplacements journaliers. L'attractivité du parc ancien dans les villes est donc un moyen de réduire une partie des consommations liées au transport.

La pérennité du patrimoine est aussi assurée par la préservation et l'entretien de chaque bâtiment pour qu'ils ne présentent pas de risques pour les occupants [Baret, 2011]. De nombreuses altérations sont observées sur le patrimoine en tuffeau (1.3.2). Certaines d'entre elles comme le détachement en plaques ou les alvéolisations peuvent entraîner une perte d'épaisseur de la paroi préjudiciable pour la résistance mécanique de la structure (1.3.2). L'entretien est donc un enjeu du bâti en tuffeau en prévenant les éventuels risques liés aux altérations.

Enfin, le patrimoine en tuffeau représente un héritage culturel et social. Issu des constructions passées, il représente la majeure partie des centres villes de Nantes, Angers, Saumur ou encore Tours. Des règles architecturales sont imposées pour préserver l'histoire des différents édifices. Plus éloignées, les maisons rurales sont moins soumises aux protections historiques mais représentent un héritage de la diversité des constructions.

En s'intéressant à la pérennité du patrimoine bâti en tuffeau, il s'agit donc de préserver l'héritage architectural d'antan en assurant sa longévité et en le rendant attractif pour qu'il soit utilisé. Les bénéfices de la réponse à cet enjeu peuvent alors être multiples.

#### 2.1.1.3 Améliorer le confort intérieur

Le confort intérieur est devenu un enjeu majeur de la construction avec le développement de systèmes (chauffage, climatiseurs, déshumidificateur, etc.) permettant de le gérer plus efficacement [Moujalled, 2007].

L'objectif premier d'un bâtiment est de fournir des espaces intérieurs où les occupants peuvent exercer leurs activités. En moyenne une personne passe 90% de son temps dans un bâtiment [Bergeron, 2009], son confort est donc primordial pour des questions de santé, de productivité et de bien-être. Plusieurs catégories de confort peuvent être définies suivant les cibles visées : visuel, acoustique, thermique, hygrique, etc.

Au niveau du bâti ancien en tuffeau, le confort thermique estival est un atout déjà présent avant réhabilitation comme cela a été observé expérimentalement au 1.3.2.3. A l'inverse, le

confort hygrique est apparu problématique avec une humidité relative régulièrement supérieure au seuil de confort défini par l’Ashrae en période estivale.

La réhabilitation peut donc être un moyen de préserver voire d’améliorer les ambiances existantes dans une optique de confort.

### 2.1.1.4 Améliorer la qualité de l’air intérieur

Suite aux chocs pétroliers dans les années 70, la réduction des consommations d’énergie devient une priorité. Le secteur du bâtiment est alors impacté.

Avec cet objectif de baisse de consommation, les bâtiments construits à cette époque et certains déjà existants sont étanchéifiés. Sur le patrimoine ancien, cela se traduit par le calfeutrage des fenêtres et des bouches d’entrée d’air. Une nouvelle maladie – *le syndrome du bâtiment malsain* - apparaît alors : les occupants se plaignent de symptômes dont les causes ne sont pas identifiées et se sentent mieux à leur sortie du bâtiment. Cette maladie liée à la qualité de l’air intérieur (QAI) conduit à la mise en place d’une réglementation gérant la ventilation dans les bâtiments [Arrêté 1982].

La qualité de l’air intérieur devient ainsi un axe prioritaire avec la création en 2001 de l’observatoire de la QAI et en 2004 du plan National Santé Environnement.

La réhabilitation est alors un moyen d’améliorer la qualité de l’air intérieur en gérant plus efficacement le renouvellement d’air [Bergeron, 2009].

### 2.1.1.5 Un enjeu économique

Consommer de l’énergie coûte cher, le principe d’Amory Lovins « l’énergie la moins chère est celle que nous ne consommons pas » est donc un leitmotiv pour réduire les consommations d’énergie. Toutefois, engager des travaux pour réduire ce besoin en énergie a aussi un coût. Il est donc évident que le choix entre continuer à consommer ou réhabiliter pour consommer moins est au centre des réflexions sur les projets de réhabilitation. L’enjeu de la rentabilité économique d’un tel projet ne peut être occulté car il est un élément pouvant être déclencheur. Cet enjeu a d’ailleurs été intégré aux différents plans du gouvernement pour inciter les ménages à engager ces travaux en proposant des aides financières qui dépendent du revenu. Ces aides sont un moyen d’assurer la rentabilité financière d’un projet plus rapidement.

### 2.1.1.6 Des enjeux émergents

Dans les précédents paragraphes, nous avons présenté les principaux enjeux liés à la réhabilitation d’un bâtiment. Toutefois, les problématiques inhérentes au développement durable et à l’émergence de la notion de cycle de vie du bâtiment amènent à positionner la réhabilitation dans une perception globale du bâtiment. La performance de ce dernier ne se réduit plus à ses propres consommations d’usage [Peuportier, 2012] mais aussi aux consommations induites par les matériaux (transport, fabrication) qui interviennent dans le bilan environnemental global du bâtiment. Ainsi, la réhabilitation peut être un moyen de réduire l’impact environnemental d’un bâtiment par rapport à une construction neuve. Le développement de nouvelles méthodes d’analyse sur un cycle de vie complet peut orienter le choix des techniques de réhabilitation [Rivallain, 2013].

## 2.1.2 Les contraintes réglementaires d’une réhabilitation en France

La réhabilitation d’un bâtiment ancien doit respecter certaines normes dont les objectifs sont d’améliorer la performance énergétique tout en respectant l’héritage culturel qu’il représente.

### 2.1.2.1 Réglementation architecturale

La réglementation architecturale distingue les bâtiments selon s'ils sont classés, inscrits ou à proximité d'un monument historique, etc. Nous détaillons pour les différentes catégories de bâtiments, les règles qui s'appliquent. Les informations sont issues des sites du STAP 49 et de la DRAC.

- Monument historique classé ou inscrit : les travaux sur ce type de bâtiments sont soumis à autorisation. Les architectes des bâtiments de France émettent des avis sur l'ensemble des aspects du projet qui leur est soumis.
- Bâtiment à proximité d'un monument historique : une zone est délimitée autour du bâtiment qui correspond généralement à la zone de sa visibilité. Dans cette zone, les travaux modifiant l'aspect extérieur d'un bâtiment sont aussi soumis à l'avis des architectes des bâtiments de France.
- Bâtiment situé dans un secteur sauvegardé : le maire et l'architecte des bâtiments de France assurent la gestion des autorisations de travaux grâce à l'établissement d'un document d'urbanisme.
- Bâtiment situé dans un site classé ou inscrit : l'architecte des bâtiments de France rend un avis au préfet de région sur la nature des travaux.
- Dans une ZPPAUP ou AVAP : un règlement détaillé qui décrit le patrimoine est constitué. Il encadre les avis que le maire doit rendre sur les travaux.

### 2.1.2.2 Réglementation thermique pour les bâtiments existants

La réglementation thermique pour les bâtiments existants (RT-ex) a pour objectif d'améliorer les performances énergétiques des bâtiments existants. Elle comprend deux volets selon la date de construction et la surface du bâtiment (Fig. 2.1) : la RT globale et la RT « éléments par éléments ».

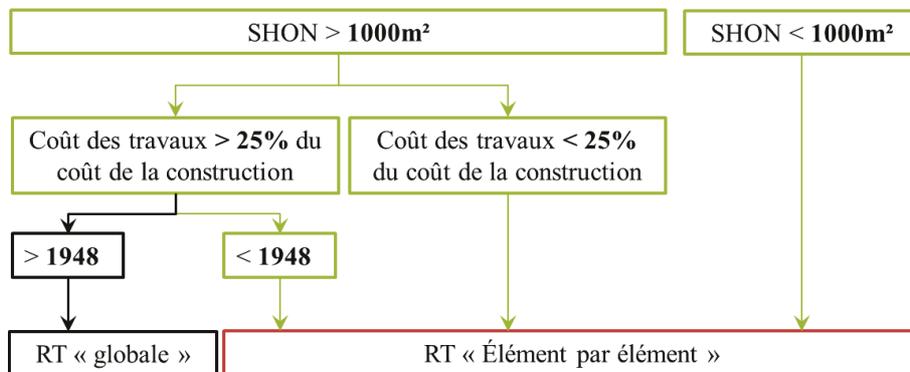


Fig. 2.1 : Organigramme de la RT-ex

Les bâtiments anciens (avant 1948) sont ainsi soumis à la réglementation thermique « éléments par éléments ». Ces obligations visent à imposer des performances minimales et des conditions d'installations de plusieurs éléments du bâti. Huit postes sont ainsi concernés [RT-ex] :

- Isolation des parois opaques ;
- Isolation des parois vitrées ;
- Chauffage ;
- Énergie renouvelable ;
- Eau chaude sanitaire ;
- Refroidissement ;
- Ventilation mécanique ;
- Éclairage non résidentiel.

Un élément modifié lors d'une réhabilitation doit respecter la performance minimum fixée par la réglementation pour cet élément. Toutefois, la France applique un principe de précaution sur les bâtiments anciens : les bâtiments classés ou inscrits ne sont pas concernés par cette réglementation et d'après l'arrêté du 3 mai 2007 – article 2, le patrimoine dit « ordinaire » n'a pas d'obligation concernant les deux éléments « isolation des parois opaques » et « isolation des parois vitrées ».

Les modifications de l'aspect extérieur, au travers d'une isolation par l'extérieur par exemple, ne sont pas autorisées si le bâtiment est situé dans un secteur sauvegardé (arrêté du 3 mai 2007 – article 6).

## 2.2 La conception de stratégies de réhabilitation des bâtiments en tuffeau

Dans cette partie, nous cherchons à identifier les possibilités de réhabilitation observées sur le terrain et les retours d'expérience qui peuvent en être tirés.

### 2.2.1 Les actions existantes de réhabilitation des bâtiments en tuffeau

#### 2.2.1.1 Généralités

Une réhabilitation peut être définie comme une somme d'actions visant individuellement l'amélioration des performances du bâtiment. Quatre cibles énergétiques du bâtiment sur lesquelles une réhabilitation a vocation à agir peuvent être identifiées [Ma, 2012], [Hall, 2013], [Rivallain, 2013] :

- Réduction de la demande en chauffage et en climatisation ;
- Augmentation de l'efficacité des équipements énergétiques ;
- Modification des comportements humains ;
- Intégration de systèmes d'énergie renouvelable.

La composition d'une stratégie de réhabilitation est le résultat d'une combinaison d'actions élémentaires visant à répondre à ces cibles.

Ma et al. [Ma, 2012] expliquent que la cible « réduction de la demande en chauffage et en climatisation » est la plus rentable en terme de coûts par rapport aux bénéfices environnementaux. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons à la spécificité constitutive des bâtiments en tuffeau soit l'effet du matériau tuffeau sur les performances globales du bâtiment. La cible énergétique visant l'enveloppe du bâti : « réduction de la demande en chauffage et en climatisation » est donc le centre de notre intérêt.

De nombreuses études, élargies à l'ensemble du parc de bâtiments existants, étudient des actions élémentaires pour réhabiliter les bâtiments [Kolokotsa, 2009], [Ascione, 2011], [Verbeeck, 2005], [Dascalaki, 2002]. Ces études nous permettent de définir, sans être exhaustifs, une liste d'actions élémentaires visant à la réduction des besoins énergétiques du bâtiment pouvant s'appliquer au patrimoine en tuffeau (Tableau 2.1).

**Tableau 2.1 : Actions élémentaires d'une réhabilitation**

Cibles	Éléments	Actions
Isolation thermique	Parois verticales	Isolation thermique intérieure Isolation thermique extérieure
	Toiture	Isolation en combles perdus Isolation en combles aménageables
	Plancher bas	Isolation en sous-face Insertion d'isolant dans la chape
	Menuiseries	Remplacement par des vitrages à haute performance Pose de volets Isolation des menuiseries ou remplacement par des menuiseries plus performantes
Étanchéité à l'air	Menuiseries	Composants performants Suivi et contrôle de la mise en œuvre

#### 2.2.1.2 Les techniques observées in situ

Parmi les 16 bâtiments que nous avons visités, 10 ont fait l'objet d'au moins une action visant l'isolation de l'enveloppe parmi celles détaillées dans le Tableau 2.2.

Le Tableau 2.2 recense les techniques observées sur ces bâtiments suivant les éléments impactés. Lorsque les épaisseurs des isolants ou les caractéristiques du vitrage n'ont pas été communiquées par les propriétaires lors des visites, aucune précision n'est donnée.

Tableau 2.2 : Synthèse des actions élémentaires de réhabilitation observées lors des visites

Cas	Toiture	Parois	Plancher	Menuiseries
1	10 cm de laine de verre sur rampants			Double vitrage air
2	2x10 cm croisés de laine de bois + frein-vapeur	10 cm de laine de chanvre-bois semi-rigide + frein-vapeur 2x10 cm croisés de laine de bois + frein-vapeur	20 cm de laine de verre	Double vitrage 4/16/4 Argon Double vitrage 8/20/4 Argon (phonique)
3	25 cm de béton de chaux chanvre en rampants 25 à 30 cm de laine de chanvre dans combles perdus	3 cm de lame d'air + 10 cm de briques plâtrières + 8 à 10 cm d'enduit chaux-chanvre	10 cm de dalle chaux-chanvre + 5 cm de chape chaux-sable	4/16/4 Argon + calfeutrage des contours par laine de chanvre
4	Isolant mince multicouche	5 cm de briques plâtrières + 5 à 10 cm de chenevotte + enduit terre/sable/paille 10 cm de laine de chanvre et coton	15 cm de chape chaux-chanvre + lait de chaux + chape chaux sable	4/12/4 Argon
5	20 cm de polystyrène	6 cm de chaux-chanvre	Dalle de chaux hydraulique + 4 à 6 cm de polystyrène + chape de béton	4/16/4
6	10 cm de laine de verre			
7	23 cm de béton de chaux-chanvre + enduit terre			
8	10 cm de laine de chanvre et coton + 15 cm de béton chaux-chanvre			
9	15 cm de béton chaux-chanvre + 3 cm de lame d'air 20 cm de laine de chanvre	30 cm de béton de chanvre	15 de dalle de béton chaux-sable	4/12/4 Argon
10	20 cm de laine de verre	Lame d'air + briques plâtrières		

Les actions élémentaires que nous avons observées sont principalement composées de matériaux biosourcés : béton de chanvre et fibre de bois. Aucun bâtiment que nous avons visité n'a été isolé par l'extérieur.

En toiture, les matériaux utilisés sont plus diversifiés : laine de verre, polystyrène, laine de bois, etc.

Le fait que les propriétaires de ces bâtiments soient sensibilisés aux problématiques énergétiques peut fausser la représentativité des techniques de réhabilitation que nous avons étudiées.

## 2.2.2 Les points de vigilance lors de la réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau

Les spécificités du patrimoine en tuffeau que nous avons évoquées dans le chapitre précédent peuvent gêner la mise en place de certaines actions élémentaires de réhabilitation. Certaines précautions à prendre dans ce type de projet ont été mises en évidence par des retours d'expérience et des études que nous présentons ici.

### 2.2.2.1 Les matériaux incompatibles avec le tuffeau

#### 2.2.2.1.1 *Les enduits et mortiers ciments*

Au 20<sup>ème</sup> siècle, de nombreux bâtiments anciens ont été restaurés avec un enduit ciment en façade ou par remplacement des joints extérieurs par du mortier ciment. Les observations actuelles soulignent une détérioration par des détachements en plaque et des alvéolisations de la pierre de tuffeau à l'interface entre la pierre et le ciment (Fig. 2.2).



Fig. 2.2 : Altérations liées à la présence d'enduits ciments (photo : auteure)

Une étude menée par Heim et al. [Heim, 2009] a mis en évidence grâce à la modélisation d'une paroi en brique que la teneur en eau est globalement plus élevée dans les joints en mortier d'origine que dans la brique. La mise en place d'un mortier ciment en façade empêche l'évaporation de l'eau en surface ce qui provoque une hausse significative de la teneur en eau dans la paroi. Les risques de gel et/ou de condensation sont alors plus importants ce qui peut provoquer des phénomènes d'exfoliation et d'alvéolisation. Ces résultats sont confirmés par les études expérimentales de Ventolà et al. [Ventolà, 2011] et Rosario Veiga et al. [Rosario Veiga, 2009]. Le ciment de Portland y apparaît incompatible avec les matériaux traditionnels du bâti ancien en stoppant l'évaporation de l'eau. Des travaux de recherche sont en cours pour

réaliser de nouvelles compositions de mortiers pour la restauration de ce type de bâtiments [Beck, 2008], [Ventolà, 2011], [Rosario Veiga, 2009].

### 2.2.2.1.2 *Les pierres de restauration*

Lorsqu'une pierre d'un édifice est trop abîmée, une des solutions est de la remplacer par une nouvelle. La fermeture d'un grand nombre de carrières en tuffeau [Prigent, 1991] oblige à intégrer d'autres types de pierre que celui d'origine. Bien que la teinte de la pierre soit un critère primordial pour la restauration [Dessandier, 2000], [Prigent, 1991], elle ne doit pas être le seul. En effet, comme le soulignent Fronteau et al. [Fronteau, 2010], la connaissance des caractéristiques des pierres de remplacement et des pierres d'origine est indispensable pour obtenir une réhabilitation efficace.

Dans le cadre de restauration de bâtiments en pierres calcaires, le problème majeur reste le comportement de la pierre vis-à-vis de l'humidité [Dessandier 2000], [Beck, 2006]. Il est alors indispensable que les caractéristiques hygriques des pierres de remplacement soient proches de celles de la pierre d'origine pour éviter une accumulation d'eau dans une pierre qui risque d'engendrer des altérations.

### 2.2.2.2 L'isolation thermique des parois

L'isolation thermique des bâtiments anciens fait l'objet d'un large nombre d'ouvrages à destination du grand public. La lecture de certains d'entre eux [Oliva, 2001], [Lévy, 2010], [Gallauziaux, 2010] ainsi que nos rencontres avec des professionnels de ce secteur nous ont permis de dresser une liste non exhaustive de solutions considérées comme pertinentes pour ce type de bâtiments.

- Les matériaux imperméables type polystyrène ou l'ajout d'un pare-vapeur sur l'isolant sont à proscrire car ils ne permettent pas à l'eau de s'évaporer en surface et favorisent ainsi son accumulation dans le matériau ;
- Les matériaux hygroscopiques type fibre de bois, béton de chanvre ou béton cellulaire sont à favoriser car leur comportement s'adapte en fonction de l'humidité et ils laissent transiter l'eau jusqu'à la surface où elle peut s'évaporer.

Certains travaux scientifiques tendent à confirmer ces conclusions [Saïd, 2003], [Duguë, 2010], [Künzel, 1998]. Saïd et al. [Saïd, 2003] ont étudié une paroi ancienne en brique. La mise en place d'une isolation par l'intérieur avec un pare-vapeur réduit le potentiel de séchage de la paroi en hiver. Par contre, l'amplitude de température constatée dans la brique est alors plus importante ce qui favorise le risque de gel et de condensation.

De la même manière, Duguë et al. [Duguë, 2010] ont réalisé des simulations du comportement d'une paroi ancienne en moellons avec le logiciel WUFI. L'isolation thermique intérieure en laine de verre et pare-vapeur amène aux mêmes conclusions que Saïd et al. : la teneur en eau augmente ainsi que l'amplitude de température. Ils ont par ailleurs testé un matériau imperméable (polystyrène expansé) qui augmente le risque d'accumulation d'eau en présence de remontées capillaires et/ou d'infiltrations. Les conclusions de cette étude sont de favoriser les matériaux hygroscopiques (béton cellulaire, laine de bois, etc.) et la mise en place d'un pare-vapeur hygro-régulant pour l'isolation de parois anciennes.

Enfin, Künzel et al. [Künzel, 1998] ont comparé une isolation thermique intérieure à une isolation extérieure. L'isolation par l'intérieur augmente la teneur en eau dans la paroi alors que celle par l'extérieur en favorise le séchage. Ainsi l'isolation thermique intérieure conventionnelle peut fonctionner si les parois sont totalement sèches et qu'il n'y a pas de risque d'infiltrations et de remontées capillaires. L'isolation par l'extérieur est la plus efficace de ce point de vue.

Il apparaît donc que les conclusions sont similaires : les matériaux imperméables comme les pare-vapeur ou les polystyrènes sont à proscrire dans le cas d'isolation thermique par l'intérieur des parois anciennes lorsqu'il y a de l'humidité dans la paroi.

### 2.2.2.3 Des exemples de traitements des remontées capillaires

La présence d'humidité dans les parois en tuffeau peut provoquer des altérations (cf. 1.3.2) et elle peut aussi gêner la mise en place d'une isolation thermique comme nous venons de le voir au paragraphe 2.2.2. Un préalable à une réhabilitation énergétique est donc la gestion des remontées capillaires [Baret, 2011]. L'objectif est de permettre le séchage de la paroi avant la mise en place de l'isolation et d'éviter la réapparition d'humidité. Une méthode étudiée expérimentalement et par modélisation est tout d'abord présentée puis deux techniques rencontrées lors de nos visites sont décrites.

#### 2.2.2.3.1 Séchage par ventilation de la base de la paroi

Cette technique, décrite et testée par Torres et al. [Torres, 2007], consiste en la mise en place en pied de mur d'un caisson de ventilation (Fig. 2.3). Les résultats expérimentaux ainsi que les simulations ont montré que l'évaporation de l'humidité est favorisée, le front d'eau atteignant ainsi une hauteur moins importante au sein de la paroi.

Toutefois, cette technique est d'autant plus efficace que l'épaisseur de la paroi est faible. Cette méthode n'est donc pas forcément adaptée aux parois anciennes de forte épaisseur [Torres, 2010].

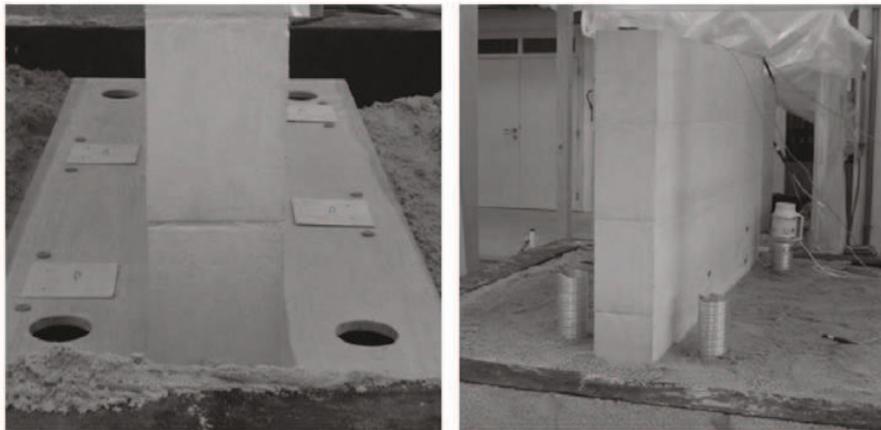


Fig. 2.3 : Séchage des parois par ventilation en pied de mur (photos issues de [Torres])

#### 2.2.2.3.2 Installation d'un drain en périphérie extérieure du bâtiment

Une ancienne grange a été entièrement réhabilitée en maison individuelle (Cas n°3 de nos visites). Les travaux ont commencé par l'installation d'un drain en périphérie extérieure du bâtiment.

A environ 40 cm de profondeur (au niveau des fondations de la maison), un fossé a été creusé tout autour du bâtiment. Un drain a été installé au fond du fossé, recouvert par des cailloux (Fig. 2.4).

Après trois ans de fonctionnement, de faibles remontées capillaires sont perceptibles en pied de mur.

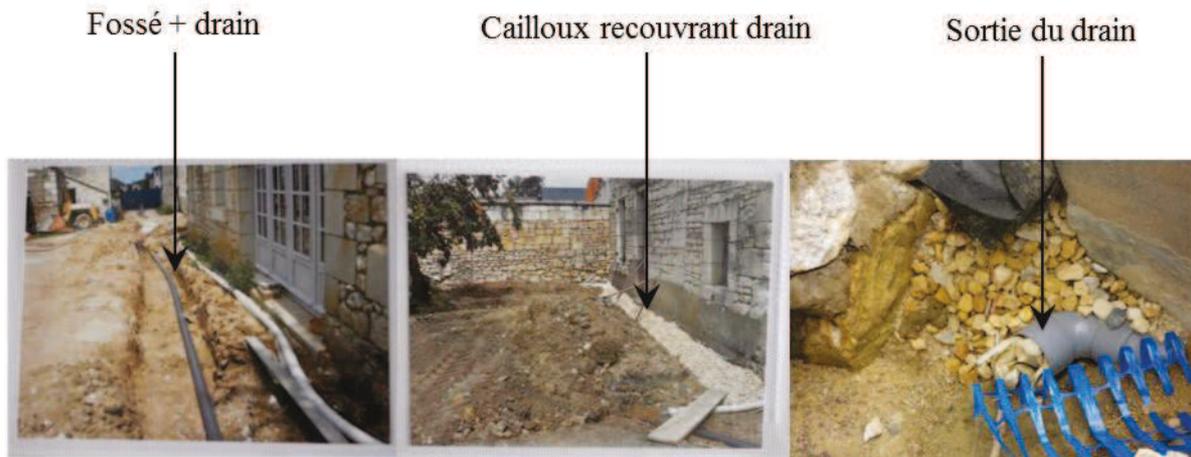


Fig. 2.4 : Étapes de la mise en place du drain extérieur

Le drain peut aussi être installé en périphérie intérieure du bâtiment quand il y a des contraintes extérieures (ex : mitoyenneté). De manière générale, le drain est inséré à la profondeur des fondations. Un drain trop proche de la surface peut être abimé. Il est nécessaire d'intervenir avec précaution et d'éviter d'être à proximité immédiate du mur pour ne pas fragiliser sa stabilité [Baret, 2011].

#### 2.2.2.3.3 Remplacement d'une dalle béton et mise en place d'un hérisson de cailloux

Lors de la transformation d'une grange en gîte (Cas n°4 issu de nos visites), un traitement des remontées capillaires était nécessaire avant de réaliser la suite des travaux. Les parois existantes en tuffeau présentaient des traces de moisissures et d'altérations. La dalle du plancher bas était alors en béton.

Le projet a débuté par la démolition de cette dalle en béton pour permettre la respiration de la paroi en tuffeau. Un hérisson de cailloux non ventilé a été placé pour drainer le sol. Une chape chaux-chanvre puis une dalle chaux-sable contenant les serpentins du plancher chauffant ont été ajoutées (Fig. 2.5). Des carreaux de terre cuite assurent la finition du plancher.

Un linéique de briques plâtrières est placé entre la chape chaux-chanvre et le mur en tuffeau. Elles servent de coffrage et doivent permettre le séchage du mur.

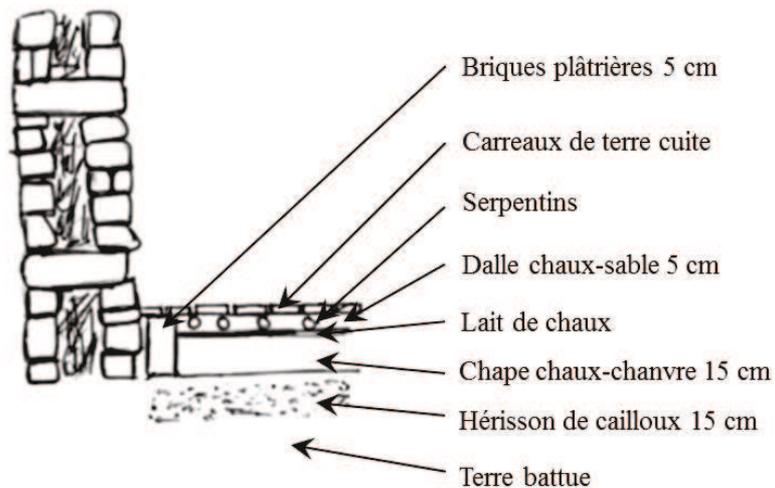


Fig. 2.5 : Description de l'intégration d'un hérisson de cailloux et d'une dalle chaux-chanvre

Les travaux ont été terminés en 2009. Lors de notre visite au printemps 2011, aucune trace de remontées capillaires n'était constatée sur les parois.

### **2.2.3 Bilan sur la conception d'une stratégie de réhabilitation**

Dans les paragraphes précédents, nous avons présenté les travaux potentiels de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau. Les actions élémentaires présentées touchent ainsi à quatre éléments du bâti : la toiture, le plancher, les fenêtres et les parois. Nos visites de bâtiments réhabilités ont mis en évidence que certaines actions possibles sont rarement mises en œuvre comme l'isolation thermique par l'extérieur.

Par ailleurs, nous avons identifié un certain nombre de points de vigilance à considérer avant de mettre en œuvre les travaux au risque de provoquer des désordres et d'obtenir des résultats loin de ceux attendus.

## **2.3 La démarche de réhabilitation des bâtiments en tuffeau**

Dans ce paragraphe, nous nous attachons à décrire le déroulement générique d'une réhabilitation de la phase initiale d'identification des besoins à la phase finale de vérification que les résultats obtenus sont ceux qui étaient attendus. Nous positionnons alors ce travail de thèse au sein de cette démarche.

### **2.3.1 Le déroulement d'un problème générique de réhabilitation**

Pour Ma et al. [Ma, 2012], un problème de réhabilitation vise à identifier et à mettre en place les technologies de réhabilitation les plus efficaces d'un point de vue économique pour obtenir un niveau défini de performances énergétiques, en maintenant des niveaux de service satisfaisants, un confort intérieur acceptable tout en respectant les contraintes opérationnelles du projet. Ils définissent alors une réponse à ce problème en cinq phases (Fig. 2.6).

Les spécificités de la problématique de la réhabilitation des bâtiments en tuffeau résident dans l'identification des stratégies efficaces (phase 3 (Fig. 2.6)). En effet, la multiplicité des enjeux de la réhabilitation de ce patrimoine évoqués au paragraphe 1 nécessite d'une part l'évaluation des stratégies sur plusieurs niveaux (performances énergétiques, confort, dégradation du bâti, etc.) et d'autre part une méthodologie pour identifier et recommander les plus pertinentes.

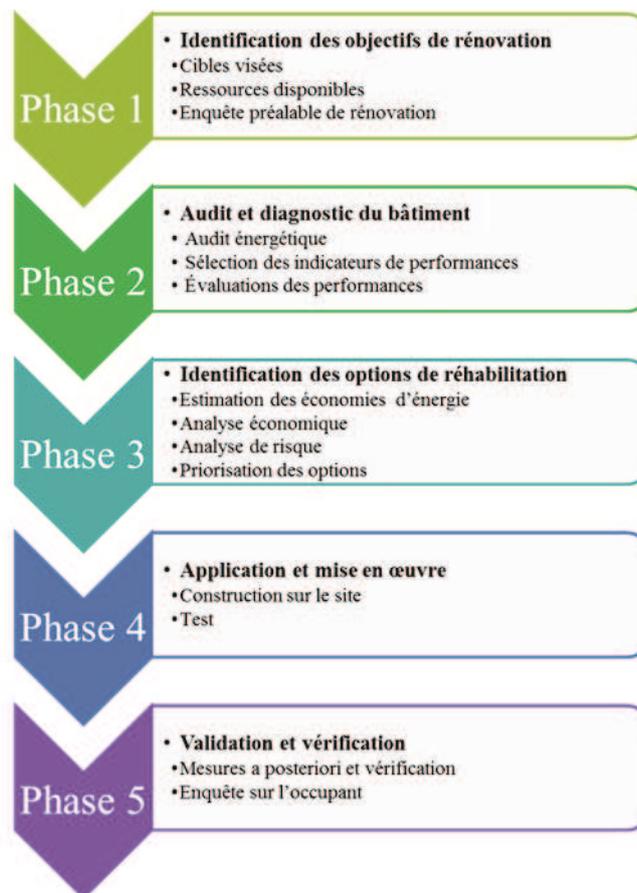


Fig. 2.6 : Phases principales d'un programme de réhabilitation ( [Ma, 2012])

Nous nous attachons donc dans ce travail à la construction d'une démarche de sélection des stratégies de réhabilitation efficaces sur le patrimoine en tuffeau. L'objectif est de considérer la multiplicité des enjeux dans la décision au travers d'une approche multicritère.

Dans le paragraphe qui suit, nous détaillons la méthodologie que nous proposons pour répondre à ces objectifs et que nous allons mettre en place et tester dans les chapitres suivants.

### 2.3.2 Le processus de décision d'une stratégie de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau

#### 2.3.2.1 Construction du processus de décision

Dans le cadre d'une réhabilitation, nous nous positionnons en tant qu'analyste dont l'objectif est de fournir aux acteurs du projet de réhabilitation des éléments de réponse et des recommandations justifiées quant aux choix des stratégies. Nos objectifs correspondent à ce que B. Roy [Roy, 1985] définit par « aide à la décision ».

Le processus théorique de décision est présenté sur la Fig. 2.7 [Roy, 1993]. Nous détaillons ensuite chaque étape appliquée à notre objet d'étude : la réhabilitation des bâtiments en tuffeau.

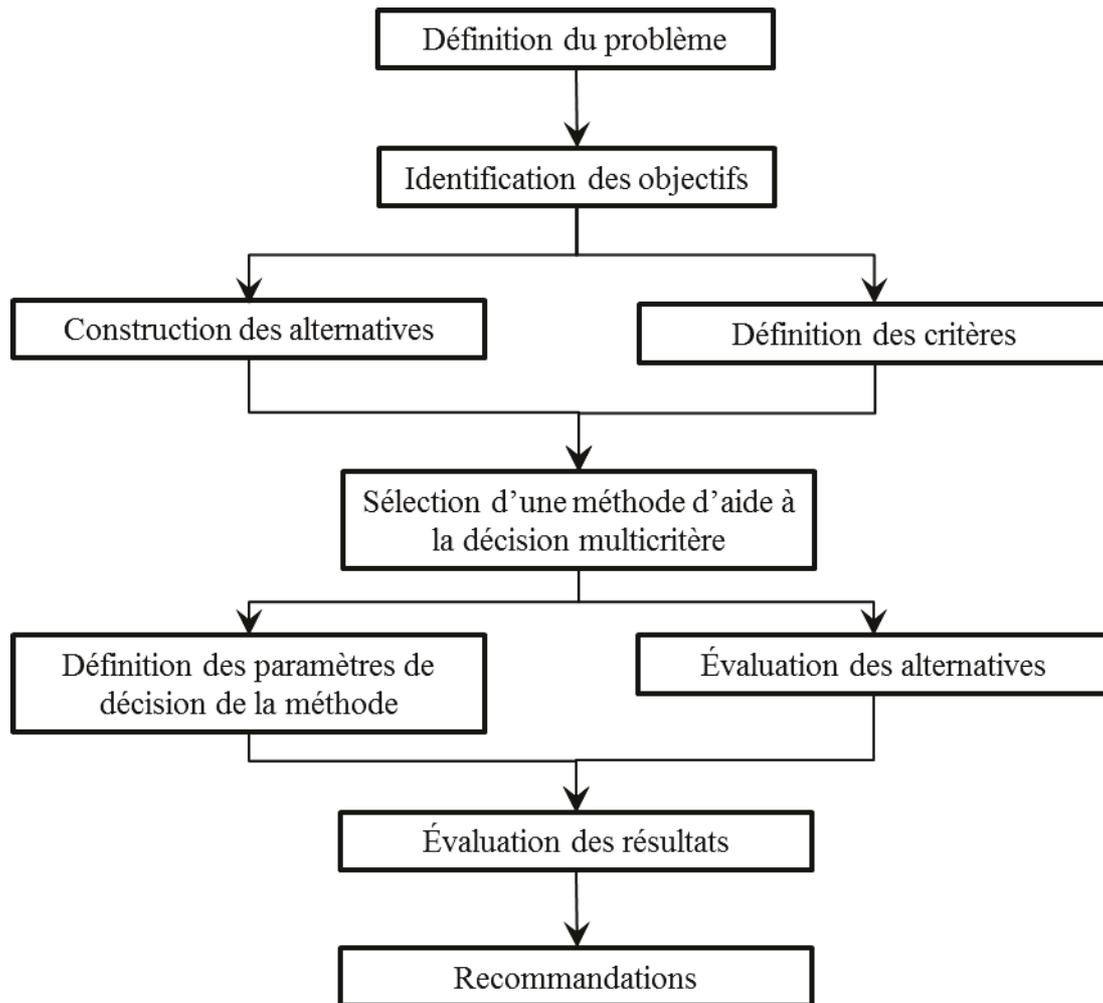


Fig. 2.7 : Processus de décision

1. Définition du problème : Notre problème de décision est la sélection d'une ou plusieurs stratégies de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau (le bâtiment étant identifié) en fonction de leurs réponses aux enjeux de ce patrimoine.
2. Identification des objectifs : La présentation des enjeux au paragraphe 1 permet de situer le contexte dans lequel s'inscrit le projet de réhabilitation. Les objectifs sont sélectionnés par le décideur et les acteurs du projet. Dans le cas de ce travail, nous nous attachons aux enjeux qui nous sont apparus majeurs sur ce patrimoine et pour certains spécifiques au tuffeau.  
Ainsi, quatre enjeux sont retenus :
  - L'amélioration des performances énergétiques ;
  - La préservation de la pérennité structurelle ;
  - L'amélioration du confort hygrothermique ;
  - La réduction du coût.
3. Construction des alternatives : Les alternatives correspondent à des stratégies de réhabilitation possibles du bâtiment. Nous avons vu au paragraphe 2 qu'une stratégie est la combinaison d'actions élémentaires visant une cible énergétique. Ainsi, pour déterminer l'ensemble des alternatives, il faut définir les actions élémentaires possibles et réaliser les différentes combinaisons qui en découlent.  
La connaissance du bâtiment initial est un préalable à cette étape car elle permet de déterminer les contraintes auxquelles il est soumis et qui conditionne la sélection des stratégies de réhabilitation possibles comme nous l'avons vu au paragraphe 2.2.3.

4. Définition des critères : La définition des critères est une étape de traduction des enjeux en critères évaluables de manière qualitative ou quantitative. Ils représentent le point de vue du ou des décideur(s). Cette étape fait l'objet du Chapitre 3 de ce mémoire.
5. Sélection d'une méthode d'analyse multicritère : Une méthode d'analyse multicritère organise la comparaison des alternatives sur les différents critères pour élaborer des recommandations. L'objectif de ces méthodes est de rechercher la ou les solutions satisfaisantes du problème. Précisons ici que « satisfaisante » se distingue d'« optimale » car il ne peut être défini une solution optimale dans un contexte multicritère [Le Moigne, 2006].  
De nombreuses MCDA (MultiCriteria Decision Analysis) ont été développées, elles se distinguent par l'objectif visé (sélection d'une alternative, rangement, description, etc. [Silva, 2012]) et la manière dont elles comparent les alternatives pour produire un résultat exploitable. Le choix de cette méthode est réalisé au Chapitre 5.
6. Évaluation des alternatives : L'évaluation des alternatives correspond à l'établissement des valeurs qualitatives ou quantitatives des critères pour chaque alternative retenue. Pour réaliser cette étape sur la réhabilitation des bâtiments en tuffeau, un outil de modélisation est nécessaire pour permettre les évaluations en un temps raisonnable. La sélection de l'outil adapté à la problématique des bâtiments en tuffeau ainsi qu'aux critères retenus est présentée au Chapitre 4 de ce mémoire.
7. Définition des paramètres de décision de la méthode et évaluation des résultats : ces deux étapes dépendent de la méthode MCDA retenue. Elles comprennent la détermination des paramètres nécessaires à l'utilisation de la méthode et la mise en place des résultats permettant les recommandations finales.

## 2.4 Conclusions

La réhabilitation du patrimoine en tuffeau soulève un certain nombre d'enjeux auxquels les solutions proposées doivent répondre. Nous retenons principalement comme enjeux l'amélioration des performances énergétiques, l'amélioration du confort hygrothermique, la prévention du risque de dégradation du bâti et la minimisation du coût des travaux. Ainsi, différentes actions touchant aux éléments du bâti peuvent être identifiés pour répondre à ces besoins.

Toutefois, les spécificités du patrimoine en tuffeau nécessitent une attention particulière pour identifier les résultats réels de telles stratégies.

En effet, le processus de réhabilitation est complexe sur le bâti ancien. Plusieurs étapes ont été identifiées, toutefois une se distingue sur ce patrimoine comme étant essentielle : **l'identification des stratégies satisfaisantes**. Nous avons pu constater que certaines actions peuvent dégrader les performances du bâti qu'elles soient thermiques, hygriques ou structurelles allant à l'encontre des enjeux identifiés.

Ainsi, ce travail se focalise sur cette étape essentielle en construisant un processus de sélection des stratégies. Basée sur la théorie de la décision, la démarche que nous cherchons à construire a vocation à s'adapter à tous les bâtiments en tuffeau et plus généralement en pierre calcaire. Toutefois, elle ne cherche pas à identifier une stratégie de réhabilitation commune à l'ensemble de ce patrimoine.

L'adaptation de ce processus à notre objet d'étude nécessite la construction des critères de décision qui permettent de traduire les objectifs en termes évaluables, la sélection d'une méthode d'aide à la décision pour structurer le processus et la mise en place d'un outil de modélisation pour évaluer les alternatives retenues sur le bâtiment.

## **PARTIE 2 : DE L'ÉVALUATION MULTICRITERE DES STRATEGIES DE REHABILITATION DU PATRIMOINE TUFFEAU A LEUR CLASSEMENT**

Dans les trois prochains chapitres qui composent cette seconde partie, nous décrivons les étapes du processus de décision appliquées à la problématique de la réhabilitation du bâti tuffeau.

Le chapitre 3 définit les critères de décision qui permettent d'évaluer les stratégies de réhabilitation. Le chapitre 4 se concentre sur le calcul de ces critères et donc sur la sélection d'un outil de modélisation traduisant de manière cohérente le comportement hygrothermique réel des bâtiments en tuffeau. Enfin, le chapitre 5 présente la méthode d'aide à la décision qui structure les résultats pour obtenir le classement des stratégies de réhabilitation.



## **Chapitre 3 Les critères d'évaluation de la réhabilitation des bâtiments en tuffeau**

Dans le domaine de la théorie de la décision, un critère est défini [Maystre, 1994] comme « une expression qualitative ou quantitative de points de vue, objectifs, aptitudes ou contraintes relatives au contexte réel permettant de juger des actions potentielles. Afin qu'une telle expression puisse devenir un critère, elle doit être utile pour le problème considéré et fiable. ». Un critère est doté d'une structure de préférence : à chaque critère est associée une échelle en valeurs ordinales ou cardinales.

Au terme de la partie 1, la construction de critères de décision est apparue essentielle au processus de sélection des stratégies de réhabilitation. Ces critères vont permettre de juger si une stratégie de réhabilitation répond aux enjeux retenus, c'est-à-dire :

- Les performances énergétiques ;
- Le confort hygrothermique ;
- La dégradation du bâti ;
- Le coût de la réhabilitation.

L'objectif de ce chapitre est de construire des critères de décision adaptés aux bâtiments anciens en tuffeau et qui permettent de traduire de manière pertinente les besoins identifiés sur ce patrimoine.

Ainsi, pour chaque critère, la construction débute par un aperçu synthétique et non exhaustif des critères déjà existants et rencontrés régulièrement dans la littérature puis suivant les besoins de notre étude, la définition du critère que nous utilisons par la suite est réalisée.

## 3.1 Évaluer la performance énergétique des bâtiments en tuffeau

L'objectif de ce critère de décision est d'évaluer la participation du projet de réhabilitation à la réduction des consommations d'énergie pour baisser la facture de l'occupant.

### 3.1.1 Aperçu de quelques critères d'évaluation des performances énergétiques

Avant de s'intéresser à l'évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment, il est nécessaire de définir à quoi nous faisons référence. La directive du 19 mai 2010 [UE, 2010] la définit comme « la quantité d'énergie calculée ou mesurée nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, ce qui inclut entre autres l'énergie utilisée pour le chauffage, le système de refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude et l'éclairage ».

Cette définition permet une large diversité d'indicateurs qui se distinguent sur plusieurs aspects : les postes de consommations considérés, la durée de l'analyse et la distinction entre les besoins et les consommations d'énergie.

Ainsi, d'un point de vue réglementaire [RT 2005], la performance énergétique des bâtiments est évaluée par le calcul des consommations d'énergie du bâtiment sur cinq postes principaux :

- Le chauffage ;
- La climatisation ;
- L'éclairage ;
- L'eau chaude sanitaire ;
- Les auxiliaires.

D'Cruz et al. [D'Cruz, 1987] et Bouchlaghem [Bouchlaghem, 2000] évaluent les performances énergétiques d'un bâtiment au travers des besoins énergétiques pour le chauffage et la climatisation des locaux et ne traitent pas des autres postes de consommation. Rey [Rey, 2004] et Zhu [Zhu, 2006] s'intéressent à la consommation d'énergie pour le chauffage sur une année pour assurer un confort thermique normalisé (scénario de température de consigne fixé au préalable).

Chen et al. [Chen, 2006] et Peuportier [Peuportier, 2012], quant à eux, élargissent le champ d'étude et s'intéressent à la consommation d'énergie sur l'ensemble du processus de réhabilitation : c'est-à-dire de l'énergie nécessaire à la fabrication, au transport et à la mise en œuvre des matériaux, à celle liée à l'utilisation du bâtiment (tous les postes de consommations sont alors considérés).

Dans le cadre d'une réhabilitation, Gholap et Khan [Gholap, 2007] ont proposé d'évaluer l'amélioration des performances énergétiques en calculant les économies d'énergie réalisées grâce à la réhabilitation.

De ces quelques critères, nous pouvons noter la nécessité de distinguer les besoins énergétiques [D'Cruz, 1987], [Bouchlaghem, 2000] des consommations [Rey, 2004], [Zhu, 2006], [RT2005]. La norme NF EN 13790 [NF 13790] explicite la différence entre besoins et consommations appliqués au chauffage et au refroidissement.

- **Besoin énergétique** pour le chauffage ou le refroidissement : « chaleur à fournir ou à extraire d'un espace climatisé pour maintenir les conditions de température souhaitées pendant une période donnée. »

- **Consommation d'énergie** pour le chauffage ou le refroidissement des locaux : « énergie entrée du système de chauffage ou de refroidissement afin de satisfaire respectivement aux besoins énergétiques pour le chauffage ou le refroidissement. »

Ainsi, le calcul des besoins énergétiques ne considère pas le système qui permet le maintien des conditions et donc son rendement. Ils caractérisent l'enveloppe du bâtiment d'un point de vue thermique et aérodynamique. Au contraire, la consommation prend en compte le système de production et le type d'énergie utilisé.

### **3.1.2 Définition du critère de performances énergétiques des bâtiments en tuffeau**

Pour définir le critère de performances énergétiques des bâtiments en tuffeau, nous détaillons les différents éléments clés identifiés dans la définition donnée par la directive européenne soit les postes de consommation considérés et l'utilisation normale d'un bâtiment.

La problématique de ce travail se positionne sur le bâti en tuffeau dont la spécificité réside en majeure partie sur le matériau d'enveloppe. Nous avons donc focalisé notre étude sur les travaux de réhabilitation affectant l'enveloppe du bâtiment sans préoccupation pour les systèmes et les occupants (2.2.1).

Par ailleurs, la présence de système de climatisation est rare dans les bâtiments anciens car le confort estival est assuré majoritairement par l'inertie thermique (1.1.2.3). L'ajout d'un système énergétique est loin des préconisations d'une réhabilitation, il n'est donc pas pertinent de considérer de système de génération de froid dans les stratégies retenues. De la même manière, la ventilation est principalement naturelle à l'état initial et il n'y a donc pas de consommations liées à un système mécanique de ventilation dans les bâtiments en tuffeau. Enfin, nous considérons qu'il n'y a pas de modification d'usage du bâtiment après réhabilitation : l'éclairage et l'eau chaude sanitaire n'évoluent pas avec les travaux.

De cette manière, le poste de consommation retenu dans l'analyse des bâtiments en tuffeau est le chauffage.

Ne considérant pas les systèmes de production de la chaleur et nous concentrant sur le chauffage, nous caractérisons les besoins énergétiques du bâtiment plutôt que les consommations.

L'analyse du cycle de vie du bâtiment et de ses matériaux n'est pas traitée dans ce travail de recherche. Les consommations d'énergie des matériaux mis en place, le coût énergétique de leur mise en place et à terme de la démolition ne sont pas intégrés au critère de performances énergétiques que nous retenons. L'étude se focalise sur une année normalisée dont les conditions météorologiques sont considérées identiques à celles avant réhabilitation.

Nous avons précisé qu'aucune modification de l'usage du bâtiment n'est considérée. Cela signifie que l'occupation (gains internes et scénario de présence) et la température de consigne de chauffage restent identiques après travaux. L'usage normal du bâtiment correspond dans notre cas à l'utilisation qui en est faite par ses occupants avant les travaux de réhabilitation. Il a donc vocation à être déterminé au préalable.

Les besoins en énergie sont rapportés à la surface habitable du logement après la rénovation car les travaux réalisés peuvent amener à un gain ou une perte d'espace, l'exemple le plus courant est l'isolation des combles : aménageables ou perdus. De cette manière, les résultats sont comparables sur l'ensemble des alternatives.

Le critère d'évaluation de la performance énergétique retenu est les besoins de chauffage sur une année ramenée à la surface habitable du logement en kWh/m<sup>2</sup>.an.

## 3.2 Évaluer le confort hygrothermique des bâtiments en tuffeau

L'objectif de ce critère de décision est d'estimer l'impact des travaux sur le ressenti des occupants vis-à-vis des conditions ambiantes intérieures.

### 3.2.1 Aperçu de quelques critères d'évaluation du confort hygrothermique

La sensation de confort fait intervenir les préférences de l'individu, son état d'esprit et les grandeurs physiques du local [Moujalled, 2007]. Les critères d'évaluation du confort intérieur se distinguent donc suivant les éléments pris en compte parmi ceux de la liste précédente.

Par exemple, la réglementation thermique française de 2005 [RT 2005] considère que l'inconfort est lié à la température car il est égal :

- Au nombre d'heure où la température intérieure dépasse 28°C ;
- Et à la somme des écarts à 28°C quand la température dépasse ce seuil.

La réglementation thermique actuelle [RT 2012] considère un nouveau critère de confort en intégrant une possibilité d'adaptation de l'occupant à l'environnement extérieur. Le seuil de température au-dessus duquel l'individu ressent un inconfort évolue en fonction de la température extérieure et de celles des pas de temps précédents.

Pour considérer l'individu dans l'évaluation du confort, Fanger a construit en 1970 deux indices : le PMV (Predicted Mean Vote) et le PPD (Percentage of People Dissatisfied). Le PMV se base sur la régulation thermique du corps humain (fonction du métabolisme, activité, vêtue, etc.) et le PPD représente le vote moyen d'une population d'individus sur une ambiance thermique connue. Une relation entre PPD et PMV permet de calculer le pourcentage de personnes insatisfaites en fonction des conditions de l'ambiance [NF 7730].

D'autres critères d'évaluation s'attachent à caractériser le confort d'un point de vue multiphysique en associant plusieurs grandeurs. L'humidité d'un local par exemple affecte la sensation de confort : un occupant supportera mieux une température froide si l'air est sec. Il y a donc des effets combinés de la température et de l'humidité sur le confort.

Ainsi, l'ASHRAE [ASHRAE 55] définit deux zones de confort (une pour l'hiver et une pour l'été suivant la vêtue (Fig. 3.1)) en fonction de la température opérative et de l'humidité spécifique du local. A la différence de la température d'air, la température opérative intègre à son calcul le rayonnement et la convection sur les surfaces de la zone.

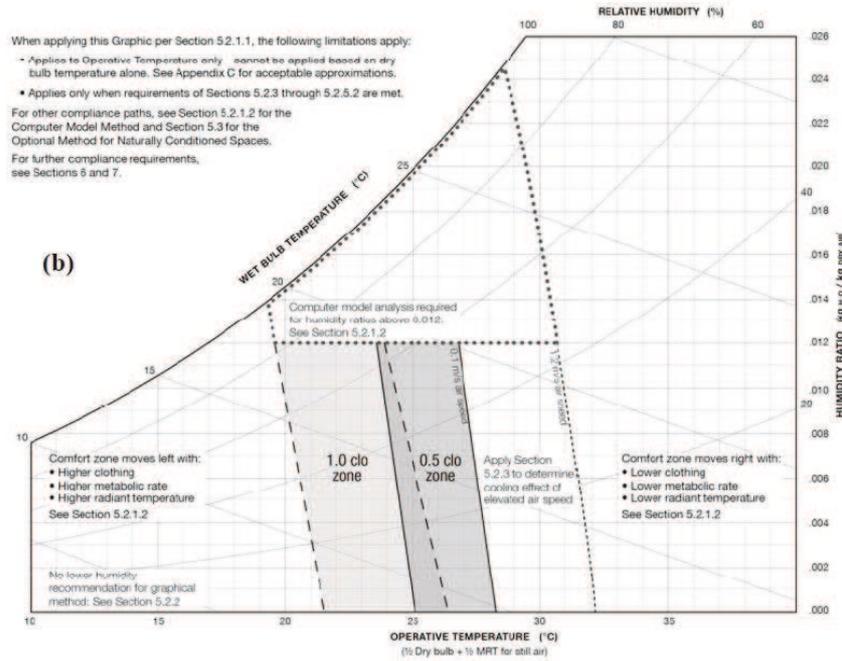


Fig. 3.1 : Zone de confort hygrothermique définie par l'ASHRAE 55

De manière similaire, le Costic [Hoffman, 1994] a construit une zone de confort hygrothermique qui définit les conditions de température d'air et d'humidité spécifique du local confortables sur l'ensemble de l'année (Fig. 3.2).

L'humidité spécifique d'une ambiance utilisée dans la définition des deux zones de confort précédentes s'obtient grâce à l'humidité relative et la température de l'ambiance (Equation (3.1)).

$$HS = \frac{0,622 \times p_{sat}(T) \times HR}{101325 - p_{sat}(T) \times HR} \quad (3.1)$$

Avec :

$$p_{sat}(T) = \exp\left(23,33 - \frac{3802,7}{T + 273,18} - \left(\frac{472,68}{T + 273,18}\right)^2\right)$$

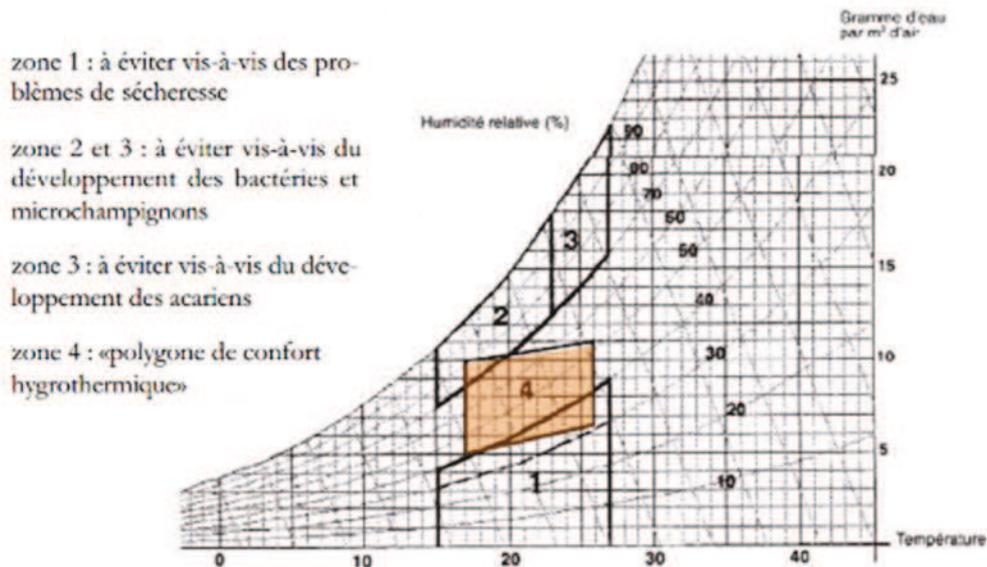


Fig. 3.2 : Zone de confort hygrothermique définie par le COSTIC

### 3.2.2 Définition du critère de confort hygrothermique des bâtiments en tuffeau

Une des problématiques des bâtiments en tuffeau est la présence d'humidité relative élevée et variable en été comme observée sur la Fig. 1.20 (cf. 1.3). Cette humidité peut être une source potentielle d'inconfort qu'il est donc nécessaire d'évaluer.

Parmi les indicateurs que nous avons évoqués au paragraphe précédent, le PMV et les zones de confort de l'ASHRAE et du Costic permettent d'appréhender le confort du double point de vue température et humidité. Cependant, le PMV a été défini pour des conditions ambiantes stationnaires ou faiblement variables [Moujalled, 2007] qui ne conviennent pas au patrimoine que nous étudions. En effet, nous avons constaté une variation significative de la température dans les pièces sous toiture (1.3.3.2) et de l'humidité relative sur l'ensemble du panel suivi. Par ailleurs, Candas et al. [Candas, 2000] remettent en cause la représentativité de l'échantillon de population utilisé pour établir les relations empiriques entre PMV et PPD.

Enfin, la définition d'une zone de confort permet de considérer l'adaptation de l'occupant au travers de la modification de sa vêtue, de son activité, etc. Elle donne aussi la possibilité d'appréhender la diversité des occupants.

Nous nous intéressons plus particulièrement à la zone définie par le Costic car elle a été construite pour une population française alors que celles de l'ASHRAE ont été établies pour une population américaine. Les climats extérieurs ne sont pas les mêmes, les populations s'habituent donc à des ambiances confortables différentes. Par ailleurs, l'ASHRAE considère qu'une humidité spécifique très faible voire nulle peut être confortable ce qui va à l'encontre des préconisations sanitaires [Schrive, 2009].

Nous caractérisons donc le confort des pièces en tuffeau en calculant le taux d'inconfort de la pièce. Pour cela, nous définissons les ensembles suivants :

Zconfort : ensemble de couples (T, HS) respectant les conditions de la zone de confort hygrothermique du Costic (Fig. 3.2).

A : ensemble de couples (T, HS) caractérisant l'ambiance étudiée

Card(A)=n

Aconfort : une partie de A tel que  $(T, HS) \in Z_{confort}$   
 $Card(A_{confort})=m$

$$Taux_{inc} = \frac{n - m}{n} \quad (3.2)$$

Le taux d'inconfort  $Taux_{inc}$  est donc égal au pourcentage de points (Température, Humidité spécifique) hors de la zone de confort par rapport au nombre total de points pour une évolution horaire de la température ambiante (en °C) et de l'humidité spécifique ambiante (kg/kg<sub>airsec</sub>).

Afin de valider la pertinence de ce critère, nous l'appliquons aux mesures expérimentales réalisées sur les bâtiments en tuffeau et décrites au Chapitre 1.

### 3.2.3 Application du critère aux mesures expérimentales

L'application du critère aux mesures expérimentales s'effectue en deux temps. Dans une première partie, le taux d'inconfort est calculé sur deux mois d'été pour l'ensemble des pièces instrumentées décrites au Chapitre 1. Dans un second temps, nous étudions l'évolution du taux d'inconfort dans un bâtiment en tuffeau non réhabilité sur une année complète. Le calcul du taux d'inconfort est issu du diagramme hygrothermique des ambiances de chaque pièce dont la Fig. 3.3 présente un exemple.

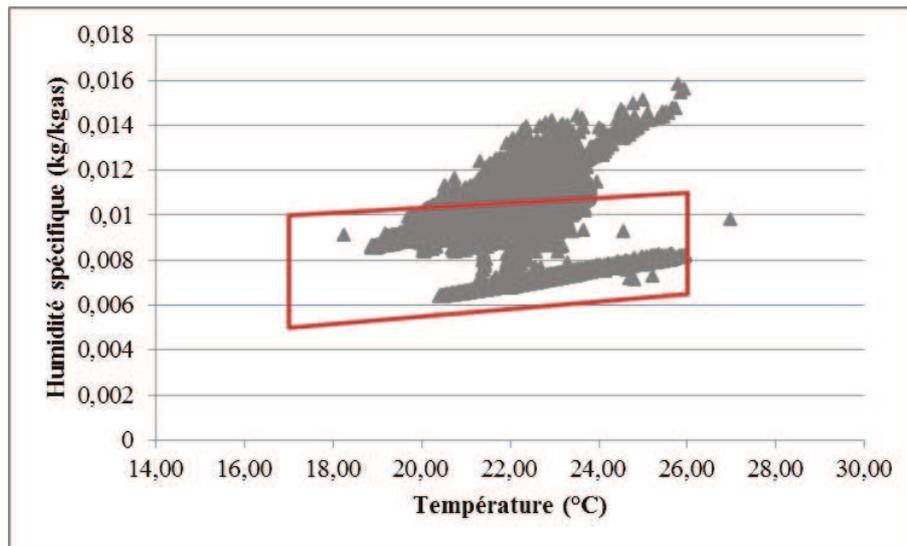


Fig. 3.3 : Exemple de diagramme de confort hygrothermique d'une pièce

#### 3.2.3.1 Taux d'inconfort hygrothermique en été

Nous calculons le taux d'inconfort hygrothermique des 21 pièces des bâtiments en tuffeau dont l'ambiance a été suivie pendant un été (cf. 3.1). Les résultats sont donnés sur la Fig. 3.4.

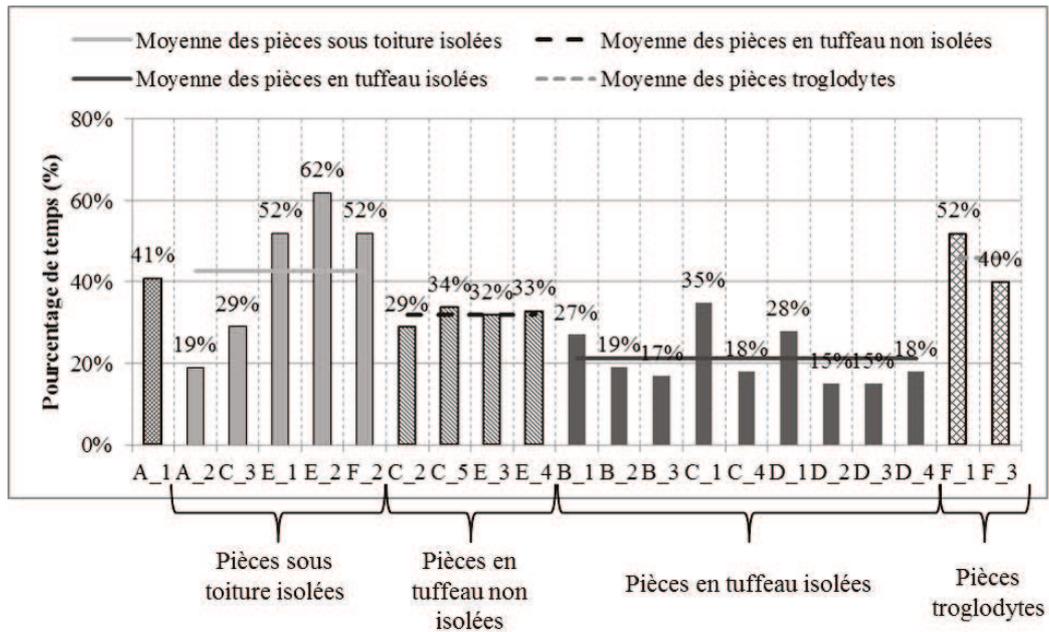


Fig. 3.4 : Taux d'inconfort hygrothermique mesurés dans 21 pièces sur un été

L'évaluation des 21 pièces instrumentées met en évidence que le taux d'inconfort est très variable sur ce panel : de 15% à 62%.

Les pièces troglodytes ont le taux d'inconfort moyen le plus élevé (49%) proche de celui des pièces sous toiture (42%). Les pièces en tuffeau quant à elles sont inconfortables pendant environ un tiers de l'été.

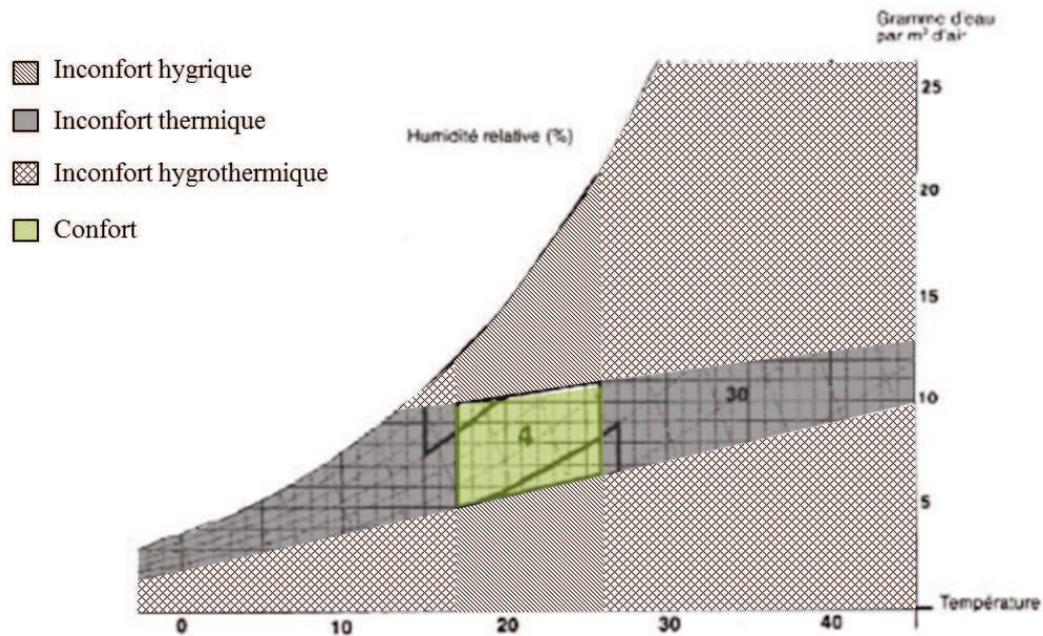


Fig. 3.5 : Zone de confort hygrothermique et sources d'inconfort

Par ailleurs, les sources d'inconfort peuvent être de trois natures (Fig. 3.5) :

- Liées à la température ;
- Liées à l'humidité ;
- Liées à l'effet combiné de la température et de l'humidité.

Le taux d'inconfort est ainsi décomposé suivant les trois sources possibles (Fig. 3.6).

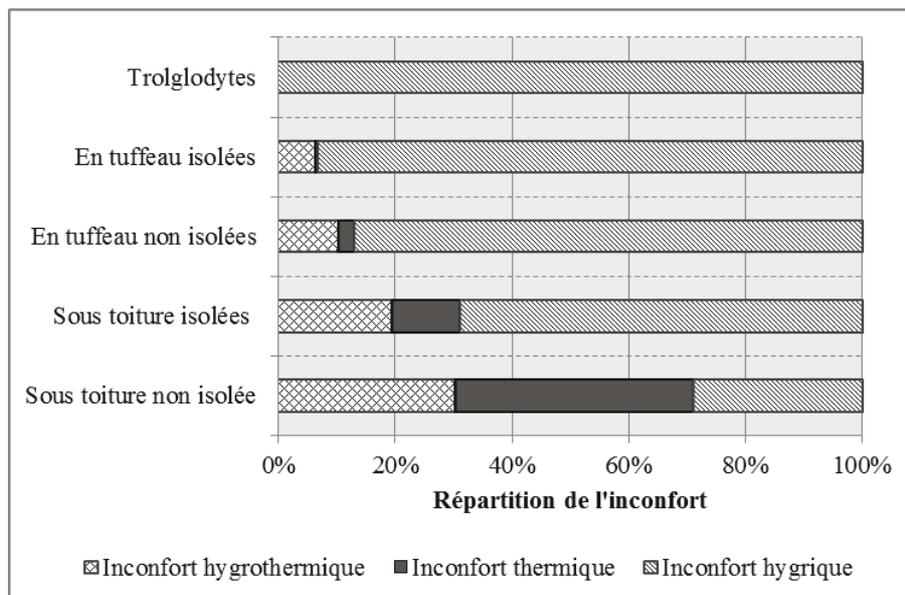


Fig. 3.6 : Répartition du taux d'inconfort suivant les sources

Nous constatons que l'inconfort est d'abord hygrique dans les bâtiments en tuffeau (Fig. 3.6) :

- Les pièces troglodytes souffrent d'un inconfort uniquement hygrique ;
- Les pièces en tuffeau non isolées ont majoritairement un inconfort hygrique (87% de l'inconfort est d'origine hygrique) avec une faible part d'hygrothermique (10%) ;
- Les pièces en tuffeau isolées sont majoritairement inconfortables à cause de l'humidité.
- Les pièces sous toiture occupées (uniquement celles isolées) ont une part d'inconfort liée à l'humidité élevée (69%).

Les résultats précédents mettent en évidence que le taux d'inconfort est plus important dans les pièces sous toiture et troglodytes que dans celles en tuffeau. Par ailleurs, l'isolation des pièces en tuffeau permet de réduire le taux d'inconfort qui est de 32% dans les pièces non isolées et 21% dans les pièces isolées.

Nous retrouvons ici une combinaison des conclusions sur l'analyse de la température et de l'humidité intérieure (cf. Chapitre 1 paragraphe 3) car les pièces troglodytes présentaient le pourcentage de temps le plus élevé avec une humidité relative supérieure à 60% et l'isolation des pièces en tuffeau permettait de réduire le pourcentage de temps en surchauffe estivale.

Par ailleurs, l'application du taux d'inconfort met en évidence que l'inconfort d'origine hygrique est majoritaire sur le patrimoine en tuffeau.

Dans les pièces en tuffeau isolées, les parts thermiques et hygrothermiques d'inconfort sont plus faibles que pour les pièces sans isolation.

### 3.2.3.2 Évolution du confort hygrothermique au cours de l'année

Nous complétons l'analyse du taux d'inconfort estival par l'étude de son évolution au cours de l'année sur un cas particulier. Il s'agit d'un bâtiment, le cas E présenté au Chapitre 1, ayant subi peu de modifications par rapport à son état initial (uniquement l'isolation de la toiture en laine de verre et la modification d'une partie des menuiseries). Ce bâtiment a été suivi pendant une année complète de l'automne 2012 à l'été 2013.

Quatre pièces de ce logement ont été instrumentées en température et humidité relative : deux pièces sous toiture isolées (E\_1 et E\_2) et deux pièces en tuffeau non isolées (E\_3 et E\_4). Le taux d'inconfort est calculé dans les quatre pièces par saison et présenté dans la Fig. 3.7.

Le taux d'inconfort est très variable en fonction des saisons et des pièces : de 9% à 77% (Fig. 3.7). En moyenne, l'automne 2012 est la saison la plus confortable (12%) et l'hiver 2013 la plus inconfortable (56%).

Les deux pièces sous toiture (E\_1 et E\_2) présentent un inconfort supérieur à 50% en été. Au contraire, le taux d'inconfort des pièces au rez-de-chaussée (en tuffeau non isolées) diminue en été pour atteindre 30% environ.

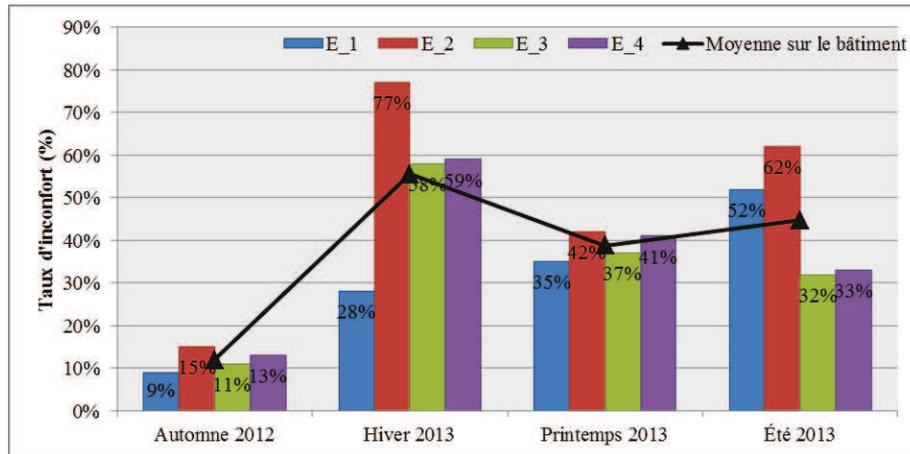


Fig. 3.7 : Taux d'inconfort saisonnier suivant les pièces du cas E

L'évolution du taux d'inconfort sur ces quatre pièces met en évidence que pour une même pièce, les variations sont importantes suivant les saisons. Les profils d'évolution peuvent être classés en deux catégories suivant le type de pièces : sous toiture ou en tuffeau non isolée. Pour les pièces sous toiture, les saisons intermédiaires : printemps et automne sont les plus confortables alors que les extrêmes présentent des taux d'inconfort pouvant être élevés (62% pour le cas E\_2 en hiver 2013). Les pièces en tuffeau ont un pic d'inconfort en hiver qui descend ensuite régulièrement pour atteindre sa valeur minimale en automne.

Nous nous intéressons à présent aux sources d'inconfort d'un bâtiment en tuffeau. Nous concentrons l'étude sur la pièce E\_4 car elle présente les caractéristiques d'une pièce en tuffeau sans travaux de réhabilitation. Les diagrammes de confort hygrothermique sont présentés dans la Fig. 3.8 pour chaque saison.

La Fig. 3.8 souligne l'évolution des sources d'inconfort en fonction des saisons sur la pièce E\_4 :

- En hiver, l'humidité spécifique est faible ce qui provoque un inconfort alors qu'en été, elle est au-dessus du seuil supérieur ;
- En hiver et au printemps, la température intérieure subit de très grandes variations (13 à 29°C). Celles-ci peuvent être liées à la présence d'une cheminée : la température augmente significativement lors de son fonctionnement. Par ailleurs, elle descend régulièrement en deçà des 17°C : la programmation manuelle du chauffage pendant les périodes d'inoccupation peut en être la cause.

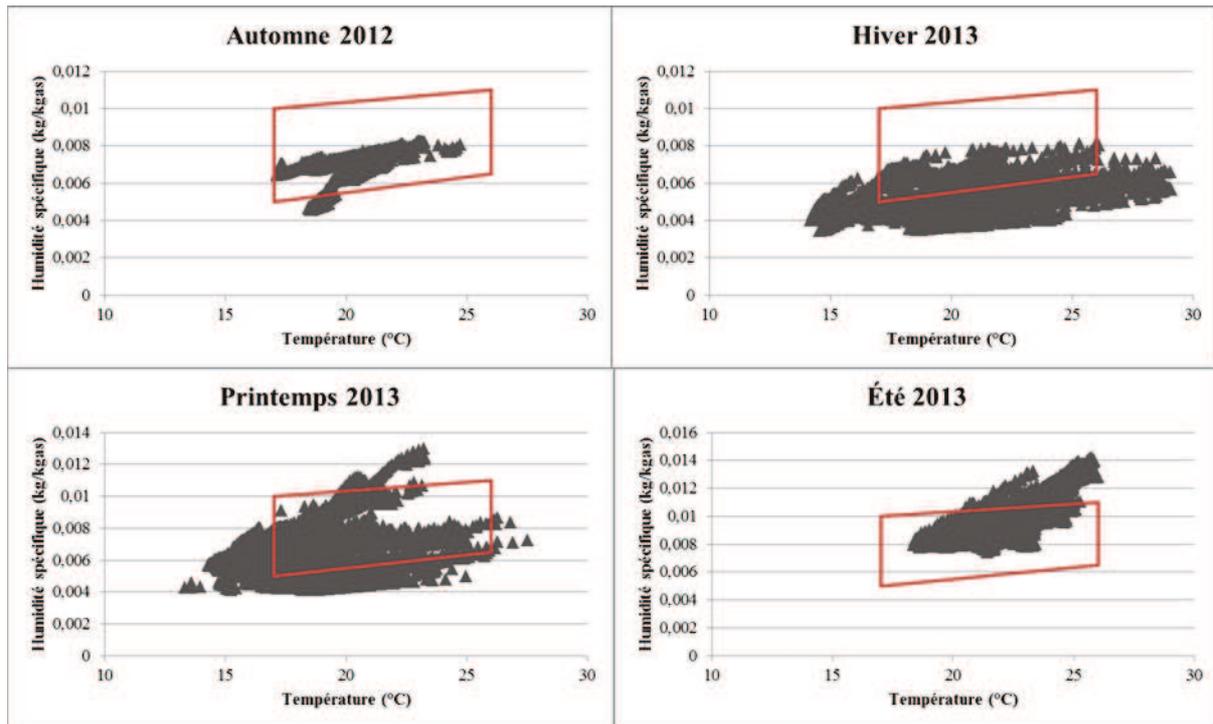


Fig. 3.8 : Conditions hygrothermiques de la pièce E\_4 sur une année (automne 2012 à été 2013)

Nous constatons ainsi que l'humidité spécifique intérieur évolue par cycle : elle est faible en hiver et augmente progressivement jusqu'en été où elle atteint son maximum puis diminue jusqu'à l'hiver. La mise en relation des humidités intérieures et extérieures met en évidence que les deux humidités spécifiques ont des évolutions très proches (Fig. 3.9).

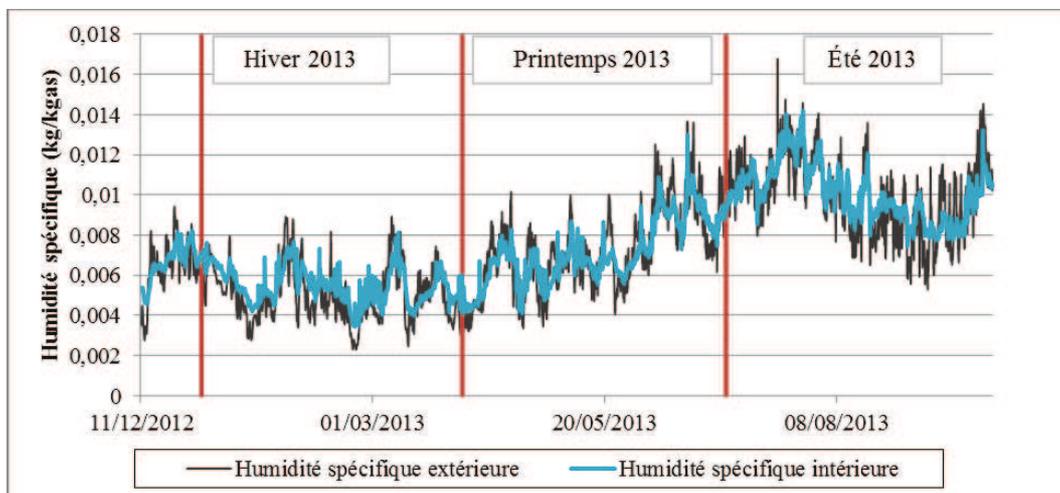


Fig. 3.9 : Comparaison des évolutions des humidités spécifiques intérieures et extérieures

### 3.2.3.3 Conclusions sur le critère d'évaluation du confort hygrothermique

L'évaluation du confort intérieur des bâtiments en tuffeau au travers du calcul du taux d'inconfort **hygrothermique** des pièces permet d'apporter des informations plus complètes que l'analyse menée individuellement sur la température et l'humidité relative (Chapitre 1 paragraphe 3). En effet, les pièces instrumentées ont montré qu'elles étaient confortables

thermiquement en été, toutefois le taux d'inconfort a mis en évidence que lorsqu'il y a inconfort il est majoritairement lié à une humidité trop élevée.

Cet indicateur permet aussi d'apprécier la variation des causes d'inconfort au fur et à mesure des saisons : humidité faible ou élevée, température élevée.

## 3.3 Évaluer le risque de dégradation de la pierre de tuffeau

Ce critère a vocation à évaluer si le projet provoque ou aggrave les risques d'altérations du bâtiment considéré.

### 3.3.1 Aperçu de quelques critères d'évaluation du risque de dégradation des pierres

La dégradation du tuffeau est liée à la présence de diverses altérations que nous avons présentées au Chapitre 1. Les causes de ces altérations varient :

- Gel au sein de la pierre ;
- Cristallisation des sels ;
- Développement de moisissures ;
- Etc.

La réhabilitation du bâti peut accentuer les effets de ces sources ou parfois les initier. Il est donc nécessaire d'évaluer le risque ou l'absence de risque de dégradation du tuffeau provoqué par une réhabilitation.

Des indicateurs existent pour chaque source d'altérations et se calculent de manière plus ou moins sophistiquée.

Berger et al. [Berger, 2012] proposent d'évaluer le risque de dégradation liée au gel en calculant le nombre d'occurrences où les conditions de température de gel de l'eau au sein de la pierre sont atteintes. Puis, ils comparent cette valeur à la résistance au gel des matériaux définie par la norme 12371 [NF 12371].

Les dégradations causées par la cristallisation des sels peuvent être évaluée en calculant la pression de cristallisation qui s'exerce au sein de la pierre [Espinosa, 2008]. Benavente et al. [Benavente, 2004] proposent des indicateurs de durabilité basés sur la perte et/ou prise de masse liée à la cristallisation des sels. Ces deux indicateurs nécessitent la connaissance de la distribution des pores dans le matériau.

De nombreux modèles de développement de moisissures existent. Vereecken et al. [Vereecken, 2012] en dressent un portrait, grâce auquel Berger et al. [Berger, 2012] réalisent un tableau de synthèse des modèles existants (Tableau 3.1).

**Tableau 3.1: Modèles de développement de moisissures existants (issus de Berger et al.)**

Modèle	AIE Annexe 14	Time of wetness	Modèle VTT	Courbes isoplèthes	Bio-hygrothermal
Influence de T	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Influence de HR	Indirectement	Oui	Oui	Oui	Oui
Prise en compte des matériaux	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Développement (D) ou initiation (I)	I	I	D	D (modéré)	D
Paramètres d'entrées	Tint, Text, Tsint	HRint	Tint, HRint	Tint, HRint	Tint, HRint, bilan hydrique des spores
Indicateurs	$\tau = \frac{T_s^{min} - T_e}{T_i - T_e} \geq 0,7$	Ratio de temps où HRint > 80%	Index de moisissure M	Courbes isoplèthes	Teneur en eau minimal de la spore
Couplage modèle Bâtiment	Non	Non	Oui	ESP-r	WUFI-bio

Nous avons vu que la présence d'eau liquide au sein et en surface de la pierre est un vecteur de désordre commun aux différentes sources d'altération. La condensation en surface peut donc aussi être un critère d'évaluation du risque de désordre [Berger, 2012]. La température de surface intérieure de la paroi est alors comparée à la température de rosée de l'ambiance intérieure. Le nombre d'occurrences où la température de surface est inférieure à la température de rosée caractérise le risque de dégradation.

Nous observons que le point commun à tous ces risques est la présence d'eau.

### 3.3.2 Définition du critère de dégradation des pierres de tuffeau

Les sources d'altérations que nous avons présentées au paragraphe précédent provoquent chacune un risque de dégradation de la pierre. Il n'est toutefois pas possible de déterminer les proportions de présence des unes par rapport aux autres. Or, elles sont toutes liées à la présence d'humidité dans la pierre. Il apparaît donc pertinent de caractériser la source primaire d'altérations par la présence d'humidité pour ainsi considérer l'ensemble des maladies potentielles de la pierre.

Nous rappelons que l'objectif est d'évaluer si les stratégies de réhabilitation accentuent un risque de dégradation déjà présent voir en créent un nouveau. Nous choisissons donc de caractériser l'évolution de la teneur en eau après réhabilitation. Le but est de juger si la stratégie mise en place entraîne une accumulation d'eau au sein du tuffeau par rapport au cas sans réhabilitation. S'il y a une augmentation fréquente et continue de la teneur en eau liée à la réhabilitation, le risque d'apparition d'altérations sur la pierre augmente.

Le critère que nous retenons est la teneur en eau moyenne au sein du tuffeau cinq ans après la réhabilitation. Les cinq années étant soumises à des conditions météorologiques identiques.

La période de cinq ans avant l'analyse a vocation à laisser un temps de stabilisation du comportement du bâtiment après la mise en place de la réhabilitation.

## 3.4 Évaluer le coût économique de la réhabilitation

L'objectif de ce critère de décision est d'évaluer si le projet est financièrement soutenable.

### 3.4.1 Aperçu de quelques critères d'évaluation du coût d'une réhabilitation

Le coût d'une réhabilitation peut être évalué de différentes manières. Les indicateurs les plus courants sont :

- L'investissement direct : il s'agit du premier coût supporté par les acteurs. Il est utilisé dans plusieurs études multicritères de réhabilitation [Murray, 2014], [Asadi, 2014], [Pernodet, 2010]. Il se définit comme la somme de chaque élément modifié (Equation 3.1).

$$I = \sum_{paroi} Q_{paroi} \times P_{paroi} \times \alpha_{paroi} \quad (3.1)$$

Avec  $Q_{paroi}$  la quantité de paroi considérée mise en œuvre dans la solution en m<sup>2</sup>

$P_{paroi}$  le prix associé à la paroi considérée en €/m<sup>2</sup>

$\alpha_{paroi}$  un coefficient égal à 1 si le type de paroi est modifié dans la solution et égal à 0 sinon.

- Le coût global : le coût global appliqué à une réhabilitation comprend les coûts liés à la mise en place des actions de réhabilitation, à la maintenance des systèmes, à l'exploitation du bâtiment et à sa fin de vie [ISO 15686-5]. Cette approche considère le cycle de vie du bâtiment [Cetiner, 2014] et doit donc prendre en compte l'évolution du contexte économique : prix des énergies, dépréciation de la monnaie, etc. F. Pernodet [Pernodet, 2010] propose la formule suivante adaptée à une réhabilitation (Equation 3.2) :

$$CG = I + \sum_{n=1}^N K_n \times D_n \quad (3.2)$$

Avec  $I$  l'investissement (voir équation 3.1)

$N$  le nombre d'années considérées pour l'étude

$K_n$  le coefficient caractérisant le contexte économique (prise en compte du taux d'inflation et du taux d'actualisation de la monnaie).

$D_n$  les dépenses d'exploitation.

- Le temps de retour sur investissement brut : il s'agit de déterminer le nombre d'années d'exploitation du bâtiment nécessaires pour rembourser l'investissement initial [Papadopoulos, 2002].

D'autres indicateurs, moins courants, évaluent la plus-value sur le bâtiment (valeur immobilière) au travers de la réhabilitation [Martinaitis, 2004].

### 3.4.2 Définition du critère de coût d'une réhabilitation de bâtiments en tuffeau

Nous établissons une synthèse (Tableau 3.2) des avantages et inconvénients des différents critères d'évaluation du coût d'une réhabilitation présentés ci-dessus.

**Tableau 3.2 : Synthèse des avantages et inconvénients des critères de coût d'une réhabilitation**

	Avantages	Inconvénients
<b>Investissement direct</b>	Critère simple et compréhensible Évaluation du premier coût supporté	Pas de calcul de la rentabilité économique
<b>Coût global</b>	Calcul de la rentabilité économique Considération pour les coûts liés à l'entretien Intégration du contexte économique Considération pour l'évolution du prix des énergies	Hypothèses fortes : nombreux paramètres de calcul, durée de l'analyse Nécessité du calcul des rendements des systèmes Redondance avec critère des performances énergétiques en considérant les besoins de chauffage
<b>Temps de retour sur investissement</b>	Calcul de la rentabilité économique	Hypothèses fortes : nombreux paramètres de calcul Redondance avec critère des performances énergétiques en considérant les besoins de chauffage

La nécessité d'intégrer les consommations d'énergie du bâtiment (liés à leur système et au type d'énergie) au calcul du coût global et du temps de retour sur investissement, nous fait pencher pour l'investissement comme critère d'évaluation du coût de la réhabilitation.

Il est calculé en sommant le coût de chaque action élémentaire réalisée par la stratégie (parmi l'isolation des parois, de la toiture, du plancher bas, le changement des fenêtres et l'installation d'un système de ventilation). L'investissement est ramené au mètre carré habitable pour la même raison que les besoins de chauffage : les travaux réalisés peuvent amener à un gain ou une perte d'espace, l'exemple le plus courant étant l'isolation des combles : aménageables ou perdus. De cette manière, les résultats sont comparables pour l'ensemble des alternatives.

Le critère d'évaluation du coût de la réhabilitation retenu est l'investissement direct en euros par mètre carré habitable (€/m<sup>2</sup>).

## 3.5 Conclusions

Le processus d'aide à la décision d'une stratégie de réhabilitation nécessite de juger si les alternatives proposées répondent de manière pertinente aux enjeux soulevés par le contexte et les volontés du ou des décideur(s). Quatre enjeux majeurs du patrimoine en tuffeau ont été retenus dans ce travail et ont permis la définition de critères de décision.

La construction de ces critères menée dans les paragraphes précédents a mis en évidence que leurs évaluations nécessitent le calcul de plusieurs données d'entrée (Tableau 3.3).

**Tableau 3.3 : Synthèse des enjeux, des critères de décision associés et de leurs données d'entrée**

<b>Enjeux</b>	<b>Critères</b>	<b>Données d'entrée</b>
<b>Améliorer la performance énergétique</b>	Besoins de chauffage annuels par mètre carré habitable (kWh/m <sup>2</sup> .an) Abrégé Bchauf	Besoins de chauffage annuels du logement Surfaces habitables
<b>Améliorer le confort hygrothermique</b>	Taux d'inconfort (%) Abrégé Tinc	Température ambiante intérieure en évolution horaire Humidité spécifique ambiante intérieure en évolution horaire
<b>Éviter le risque de dégradation de la pierre</b>	Moyenne de la teneur en eau dans le tuffeau pour la 5 <sup>ème</sup> année après la réhabilitation (kg/kg) Abrégé Wctuf	Teneur en eau dans le tuffeau sur 5 ans
<b>Minimiser le coût de la réhabilitation</b>	Investissement initial par mètre carré habitable (€/m <sup>2</sup> ) Abrégé Inv	Coût de chaque action élémentaire de réhabilitation Surfaces habitables

L'évaluation de l'ensemble des stratégies sur les quatre critères définis dans les paragraphes précédents, indispensable à l'établissement des recommandations, nécessite donc le calcul des besoins de chauffage annuels du bâtiment, l'évolution des températures et humidités spécifiques intérieures sur une année ainsi que celle de la teneur en eau au sein du tuffeau sur cinq ans.

La construction d'un modèle hygrothermique du bâtiment paraît être une étape indispensable pour obtenir ces données en un temps raisonnable. Le choix de l'outil de modélisation fait l'objet du chapitre suivant.

## **Chapitre 4 La modélisation hygrothermique des bâtiments en tuffeau**

Au chapitre précédent, nous avons établi les critères de décision que nous utilisons dans notre processus de sélection. Les données d'entrée indispensables à leurs calculs nécessitent un outil de modélisation des bâtiments en tuffeau.

Toutefois, l'outil que nous allons sélectionner doit permettre de modéliser le comportement énergétique de ces bâtiments au plus proche de la réalité. Il doit donc prendre en compte les différentes spécificités de ces bâtiments.

Pour sélectionner l'outil adapté à nos besoins, notre démarche s'organise en plusieurs étapes. Dans un premier temps, à partir des problématiques de la réhabilitation des bâtiments en tuffeau que nous avons identifiées aux Chapitre 1 et Chapitre 2, nous sélectionnons l'outil qui répond a priori aux besoins de ce patrimoine. Ensuite, nous déterminons les paramètres d'entrée du modèle qui affectent nos critères de décision pour mettre en avant leurs sources d'incertitude. Enfin, nous comparons le modèle aux mesures expérimentales menées sur une cellule en tuffeau pour vérifier la pertinence des résultats de l'outil.

Pour répondre à ces différentes étapes, le chapitre s'organise en quatre parties. La première consiste en la sélection de l'outil à partir d'un cahier des charges en lien avec les problématiques du patrimoine en tuffeau. La seconde s'oriente sur une bibliographie synthétique des méthodes d'analyse de sensibilité et de comparaison de modèle à des mesures expérimentales pour introduire les deux dernières parties : une analyse de sensibilité menée sur les critères de décision et la comparaison du modèle à des mesures expérimentales.

## 4.1 La sélection de l'outil de modélisation énergétique adapté aux bâtiments en tuffeau

### 4.1.1 La construction du cahier des charges de l'outil

Au travers des chapitres précédents, nous avons identifié les spécificités des bâtiments en tuffeau et les problématiques liées à leurs réhabilitations. Il est nécessaire que l'outil de modélisation que nous allons utiliser intègre ces caractéristiques pour être au plus proche du comportement réel de ces bâtiments.

Un cahier des charges est déterminé vis-à-vis de ces spécificités.

Ainsi, au Chapitre 1 paragraphe 3.3, nous avons constaté qu'il n'est pas possible de généraliser le comportement thermique de ces bâtiments y compris au sein même d'un logement. En effet, le panel de bâtiments suivis a montré des différences notables d'évolution de la température entre les différentes pièces du logement. De plus, les pièces sous toiture ont montré des amplitudes et des maximums de température durant un été plus élevés que les pièces en tuffeau. Cette diversité de comportement doit être intégrée dans la modélisation.

Par ailleurs, un des aspects essentiels du patrimoine en tuffeau est la présence et les effets de l'humidité dans le bâtiment. A l'échelle de la paroi, nous avons constaté une importante variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau ce qui peut modifier sensiblement le comportement de l'enveloppe. De plus, l'humidité est le premier vecteur d'altération de la pierre.

A l'échelle de la pièce, les mesures expérimentales ont mis en évidence une humidité intérieure élevée et variable au cours de l'année qui peut affecter le confort.

Enfin, les bâtiments en tuffeau à l'instar des bâtiments anciens sont majoritairement ventilés naturellement. Leur renouvellement d'air est par conséquent variable suivant les conditions extérieures de vent et de température. Les débits de renouvellement d'air diffèrent donc sensiblement sur une année.

Les problématiques mises en évidence dans les paragraphes précédents nous permettent de dresser le cahier des charges de l'outil que nous souhaitons utiliser :

1. Modélisation multizone du bâtiment ;
2. Calcul des transferts de masse au sein de l'enveloppe ;
3. Couplage des transferts de masse et de chaleur au sein de l'enveloppe ;
4. Évolution des caractéristiques des matériaux avec la teneur en eau ;
5. Couplage des grandeurs de l'enveloppe à celles de l'ambiance.
6. Calcul du taux de renouvellement d'air par les défauts d'étanchéité ;
7. Prise en compte dans le calcul du renouvellement d'air de l'effet du vent et du tirage thermique.

### 4.1.2 Aperçu des outils existants

Une large palette d'outils de modélisation existe, le site du département de l'énergie des États-Unis en dresse un aperçu [DoE]. Actuellement, les modèles les plus couramment utilisés sont des modèles thermiques avec une gestion relativement pauvre de l'humidité [Rode, 2008],

[Janssens, 2008] : l'humidité ambiante est gérée de manière simplifiée et peu de modèles intègrent le calcul des transferts de masse à l'échelle de la paroi.

Toutefois, depuis les années 2000, de nouveaux modèles qui prennent en compte les effets de l'humidité sur le comportement des bâtiments ont émergé [Hens, 2008]. En effet, des études [Moon, 2014], [Rode, 2008] dont l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie et le programme de recherche Humibatex [Humibatex, 2011] ont mis en évidence que la prise en compte de l'humidité fournit des résultats plus précis pour l'évaluation du comportement du bâti. L'intégration des effets de l'humidité dans les équations des modèles affectent les sorties. Moon et al. [Moon, 2014] étudient les différences entre un modèle hygrothermique et un modèle thermique. Des écarts sont constatés au niveau des besoins de chauffage, de la qualité de l'air intérieur, des conditions ambiantes et du risque de dégradation des matériaux. Rode et al. [Rode, 2008] confirment l'influence de l'humidité sur les performances énergétiques du bâti et la durabilité des matériaux.

Les outils existants se distinguent au niveau de la finesse de la décomposition spatiale qu'ils utilisent autant à l'échelle de l'ambiance (volume) qu'à celle de la paroi. Woloszyn et al. [Woloszyn, 2008] considèrent quatre catégories de granularité (décomposition spatiale) pour la zone d'air et l'enveloppe (Tableau 4.1).

**Tableau 4.1 : Niveau de granularité des outils existants**

<b>Approche</b>	<b>Zone d'air</b>	<b>Enveloppe</b>
<b>Simplifié</b>	Mono-zone (bâtiment = 1 zone)	Modèles type « fonction de transfert »
<b>Intermédiaire</b>	Multi-zone (1 pièce = 1 zone)	Modélisation 1D
<b>Fine</b>	Zonal (1 pièce = plusieurs zones)	Modélisation 2D
<b>Très fine</b>	CFD (1 pièce = milliers/millions de zones)	Modélisation 3D

Dans ce paragraphe, nous dressons un aperçu des modèles hygrothermiques existants et de leur granularité. Cette liste est issue de Woloszyn et al. [Woloszyn, 2008] produite en 2008 et actualisée pour certains outils ayant évolué ces dernières années (Tableau 4.2). Nous n'avons retenu que les outils disponibles.

**Tableau 4.2 : Aperçu d'outils de modélisation hygrothermique**

Nom	Site web/Référence	Disponibilité	Origine	Granularité	
				Air	Enveloppe
BSim	<a href="http://www.bsim.dk">www.bsim.dk</a>	Commercial	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur et Humidité
Delphin	<a href="http://www.bauklimatik.-dresden.de">www.bauklimatik.-dresden.de</a>	Commercial	Enveloppe	Simplifié	Fine Chaleur et Humidité
Energy Plus	<a href="http://www.apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus">www.apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus</a>	Gratuit	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur et Humidité
ESP-r	<a href="http://www.esru.strath.ac.uk">www.esru.strath.ac.uk</a>	Gratuit	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur et Humidité
IDA-ICE	<a href="http://www.equa.se">http://www.equa.se</a>	Commercial	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur et Humidité

HAML ab	<a href="http://sts.bwk.tue.nl/hamlab">http://sts.bwk.tue.nl/hamlab</a>	Gratuit	Energie	Intermédiaire Possibilité très fine	Simplifié Chaleur et humidité possibilité très fine
HAM- Tools	<a href="http://www.ibpt.org">www.ibpt.org</a>	Gratuit	Chaleur, Air et Humidité	Intermédiaire	Intermédiaire chaleur et humidité
SPARK	<a href="http://gundog.lbl.gov/">http://gundog.lbl.gov/</a>	Gratuit	Energie	Intermédiaire re/Fine	Intermédiaire chaleur et humidité
TRNS YS	<a href="http://sel.me.wisc.edu/trnys/">Sel.me.wisc.edu/trnys/</a>	Commercial	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire chaleur, simplifié humidité
WUFI- Plus	<a href="http://www.wufi.de">www.wufi.de</a>	Commercial	Enveloppe	Simplifié	Intermédiaire chaleur et humidité

Deux catégories d'outils peuvent être distinguées :

- Les « design-integrated » : ils nécessitent la programmation de l'ensemble des équations qui régissent le modèle (ex : Ham-tool);
- Les « design-friendly » : ils représentent des « boîtes noires » où les équations sont déjà programmées (ex : TRNSYS).

### 4.1.3 La sélection et la description de l'outil de modélisation

#### 4.1.3.1 Sélection d'EnergyPlus

Pour des raisons pratiques, nous nous orientons vers un outil design-friendly qui ne nécessite pas de programmation des équations. Ainsi, parmi les outils cités dans le Tableau 4.2, deux a priori répondent aux cinq premiers points du cahier des charges : WUFI-Plus et EnergyPlus. Cependant, WUFI-Plus présente une décomposition simplifiée de la zone d'air et ne permet pas de représenter les phénomènes de ventilation naturelle indispensable à la modélisation des bâtiments en tuffeau.

Notre choix se porte donc sur EnergyPlus. Ce logiciel permet la simulation dynamique du comportement énergétique d'un bâtiment. Basé sur les outils BLAST et DOE-2, il permet le calcul des besoins de chauffage et de refroidissement pour assurer un confort défini par l'utilisateur. Il considère l'éclairage, la ventilation, etc. Il est en constante évolution avec la proposition de mises à jour régulières par le laboratoire de Berkeley qui gère sa distribution. Un algorithme à l'échelle paroi a été intégré à cet outil en 2011 : HaMT (Heat and Moisture Transfer). Cet algorithme couple les transferts de chaleur et de masse au sein de la paroi en une dimension. Il modélise par volumes finis le mouvement et le stockage de la chaleur et de l'humidité qui transitent de l'intérieur vers l'extérieur de la paroi.

Plusieurs raisons expliquent notre choix :

- Il présente une granularité intermédiaire pour les deux niveaux zone d'air et enveloppe ;

- Il modélise la ventilation naturelle au travers de la surface équivalente de fuite et des effets du vent et du tirage thermique ;
- Il couple les transferts de chaleur et de masse au sein de la paroi ;
- Il couple l'humidité en surface de la paroi à celle de l'ambiance (volume d'air) ;
- Il est ouvert avec une communauté d'utilisateurs importante et active.

Dans le cadre de ce travail, nous utilisons la version 7.2 du logiciel.

#### 4.1.3.2 Description des équations du modèle

##### 4.1.3.2.1 A l'échelle de la paroi

Une des raisons pour laquelle EnergyPlus a été retenu est qu'il couple les transferts de chaleur et de masse au sein de la paroi. La combinaison des effets entre les deux phénomènes intervient à plusieurs niveaux [Piot, 2009] :

- La température et la teneur en eau affectent certaines caractéristiques du matériau comme la conductivité thermique ;
- La température en influant sur l'humidité relative modifie localement la répartition de l'humidité au sein du matériau ;
- L'énergie liée à l'eau transportée s'additionne au bilan énergétique du volume de matériau.

Dans l'algorithme HaMT récemment ajouté, les trois niveaux précédents sont intégrés. Les équations résolues par cet algorithme ont été développées par Künzel en 1995 [Künzel, 1995]. Il s'agit des mêmes équations que celles intégrées au logiciel WUFI 1D à l'échelle de la paroi.

Elles ont été obtenues à partir des équations régissant les équilibres en énergie et en humidité dans le matériau dont les équations sont données ci-dessous (Equations (4.1) et (4.2)).

$$\frac{\partial H}{\partial T} = -\nabla q + S_h \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(g_w + g_v) + S_w \quad (4.2)$$

Künzel a défini les équations couplées de calcul de la température et de l'humidité relative intérieure [Künzel, 1995], [EERE, 2012] en considérant les dépendances suivantes :

- Enthalpie totale avec humidité ;
- Conductivité thermique avec humidité ;
- Flux d'humidité avec température.

Elles sont appliquées à un problème à une dimension (Equations (4.3) et (4.4)).

$$\frac{\partial H \partial T}{\partial T \partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) \quad (4.3)$$

Les termes de l'équation (4.3) représentent respectivement le stockage, le transport et la génération de chaleur dans le matériau.

$$\frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_w \frac{\partial w \partial HR}{\partial HR \partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) \right) \quad (4.4)$$

De la même manière que pour l'équation (4.3), les trois termes de l'équation (4.4) décrivent le stockage de l'humidité, le transport liquide et le transport vapeur au sein du matériau.

Les équations sont alors résolues individuellement par discrétisation de l'espace en volume fini [Künzel, 1995]. Le calcul est réalisé de manière itérative.

Les données nécessaires à la résolution des équations précédentes sont synthétisées dans le Tableau 4.3.

**Tableau 4.3 : Données nécessaires au calcul de l'algorithme HaMT**

Type de données	Grandeurs
Conditions aux limites	Température au niveau des surfaces extérieures et intérieures
	Humidité relative au niveau des surfaces extérieures et intérieures
Caractéristiques des matériaux	Épaisseur
	Masse volumique
	Chaleur spécifique
	Porosité
	Teneur en eau du matériau en fonction de l'humidité relative de l'ambiance
	Coefficient de transport liquide par succion en fonction de la teneur en eau
	Coefficient de transport liquide par redistribution en fonction de la teneur en eau
	Coefficient de diffusion de la vapeur en fonction de l'humidité relative
Conditions initiales	Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau
	Teneur en eau

#### 4.1.3.2.2 A l'échelle de l'ambiance : couplage entre l'enveloppe et l'ambiance

Le couplage entre l'enveloppe et l'ambiance s'effectue par la prise en compte des conditions en surface dans les équations d'équilibre thermique (Equation 4.5) et hygrique (Equation 4.6) de l'ambiance.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (4.5)$$

La définition des termes de l'équation (4.5) est donnée dans le Tableau 4.4.

**Tableau 4.4 : Définition des termes de l'équation (4.5)**

$C_z \frac{dT_z}{dt}$	Énergie stockée dans la pièce
$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$	Somme des gains convectifs internes
$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$	Somme des transferts convectifs de chaleur provenant des surfaces de la zone
$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$	Transferts de chaleur liés aux infiltrations en provenance des autres pièces
$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$	Transferts de chaleurs liés aux infiltrations d'air extérieur
$\dot{Q}_{sys}$	Production de chaleur du système

L'équation d'équilibre liée à l'humidité a une forme similaire (Equation (4.6)). La définition des différents termes est donnée dans le Tableau 4.5.

$$\rho_{air} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass_{sched\ load}} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air,z} (W_{surfs_i} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t) + \dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t) \quad (4.6)$$

**Tableau 4.5 : Définition des termes de l'équation (4.6)**

$\rho_{air} V_z C_w \frac{dW_z}{dt}$	Humidité stockée dans le volume d'air (zone)
$\sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{mass_{sched\ load}}$	Somme des apports par les gains latents avec $N_{sl}$ le nombre de sources latentes
$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} A_i h_{mi} \rho_{air,z} (W_{surfs_i} - W_z^t)$	Transferts convectifs d'humidité en provenance des surfaces de la zone
$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$	Transferts d'humidité liés aux infiltrations en provenance des autres zones
$\dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t)$	Transferts d'humidité liés aux infiltrations d'air extérieur
$\dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t)$	Production ou évacuation d'humidité liée au système

Les données issues de la modélisation à l'échelle de la paroi ( $T_{si}$ ,  $W_{surfi}$ ) sont intégrées à l'équilibre hygrothermique de l'ambiance à chaque pas de temps. Il n'y a pas de couplage entre température et humidité au sein de l'ambiance. Par ailleurs, il n'y a pas de bouclage au sein d'un même pas de temps entre les conditions ambiantes et celles de la paroi [EERE, 2012].

## 4.1.3.3 Les vérifications d'EnergyPlus

## 4.1.3.3.1 L'algorithme HaMT à l'échelle de la paroi

EnergyPlus avec l'algorithme HaMT pour les transferts au sein de la paroi n'a pas fait l'objet de validation.

Il a cependant déjà été utilisé. Spitz et al. [Spitz, 2013] ont réalisé la modélisation d'une cellule expérimentale à ossature bois avec EnergyPlus et l'algorithme HaMT. Leur objectif est de comparer les températures et humidités mesurées en différents points de la paroi à celles calculées. Le calage du modèle est réalisé par optimisation des valeurs de six paramètres. Cependant, les résultats obtenus après optimisation montrent des écarts encore élevés avec les mesures de température et d'humidité. De plus, pour cinq paramètres sur les six utilisés, la simulation optimale est obtenue avec la valeur limite de la plage d'incertitude (haute ou basse).

Par ailleurs, l'outil WUFI 1D a été validé par un benchmark, celui de la norme EN 15026 [NF 15026]. L'évolution et la distribution de la teneur en eau au sein d'une paroi homogène ont été comparées à une solution analytique et montrent des écarts maximum de 2,5% par rapport aux résultats théoriques. Oustad et al. [Oustad, 2005] ont aussi comparé l'évolution de la teneur en eau calculée par WUFI à celle mesurée expérimentalement pour plusieurs configurations de toiture. Cette étude met en évidence une bonne corrélation des tendances mais des différences en termes de valeur (environ 2%). Künzel [Künzel, 1998] ont mené la validation de cet outil sur trois configurations de paroi : un mur en grès, une paroi avec isolation thermique par l'extérieur et une toiture en béton cellulaire auto clavé. Les résultats obtenus sur ces exemples sont cohérents avec les mesures expérimentales.

Les équations régissant les transferts de chaleur et de masse dans la paroi dans EnergyPlus sont identiques à celles de WUFI. Afin de s'assurer du choix de l'outil EnergyPlus et de ses résultats, nous vérifions leur cohérence avec ceux de WUFI en comparant l'évolution de la teneur en eau dans une paroi homogène calculée par les deux outils. Les hypothèses de modélisation que nous utilisons pour cette comparaison sont issues du benchmark n°2 décrit dans Hagentoft et al. [Hagentoft, 2004] :

- A l'état initial, le matériau est en équilibre hygrique avec l'ambiance intérieure dont la température est fixée à 20°C et l'humidité relative à 95%.
- A l'instant  $t=1$ , les conditions ambiantes extérieures et intérieures sont fixées et constantes en température et en humidité relative (Tableau 4.6).
- Les conditions climatiques extérieures considèrent qu'il n'y a ni rayonnement solaire, ni pluie et ni vent.

**Tableau 4.6 : Conditions ambiantes de la comparaison entre EnergyPlus et WUFI 1D [Hagentoft, 2004]**

	Extérieur	Intérieur
Température (°C)	20	20
Humidité relative (%)	45	65

Il est nécessaire de préciser la différence d'échelle entre les deux outils : EnergyPlus s'attache à la modélisation d'un volume d'air, alors que Wufi s'intéresse à celle d'une paroi.

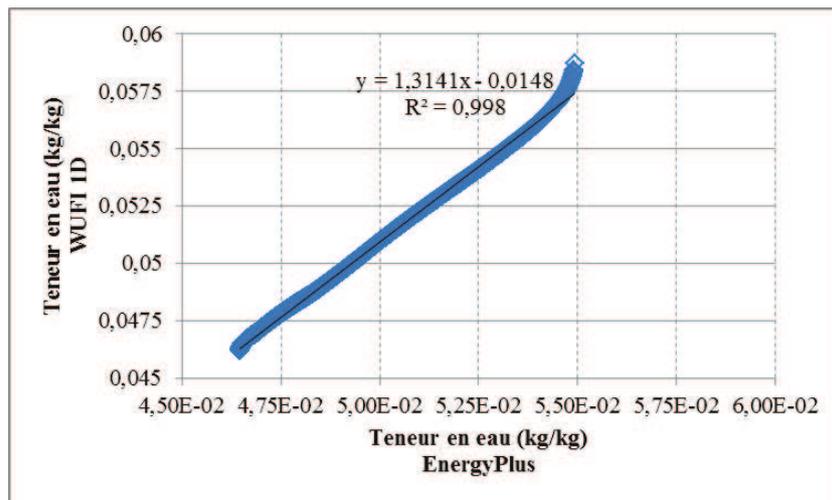
Pour comparer les deux outils, une zone de  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$  est modélisée sur EnergyPlus. Cinq surfaces sont simulées comme des parois adiabatiques et insensibles à l'humidité pour que l'ensemble des transferts thermiques et hygriques aient lieu au sein de la sixième paroi.

Le matériau considéré dans cette étude est le tuff issu de la base de données de Wufi dont les propriétés sont données dans le Tableau 4.7. Notons ici que le tuff est une pierre calcaire poreuse différente du tuffeau, elle a été exploitée principalement en Italie. Le choix s’est porté sur cette roche car elle présente des propriétés hygrothermiques proches du tuffeau et l’ensemble de ses caractéristiques sont disponibles dans la base de données de Wufi. La paroi a une épaisseur de 20 cm.

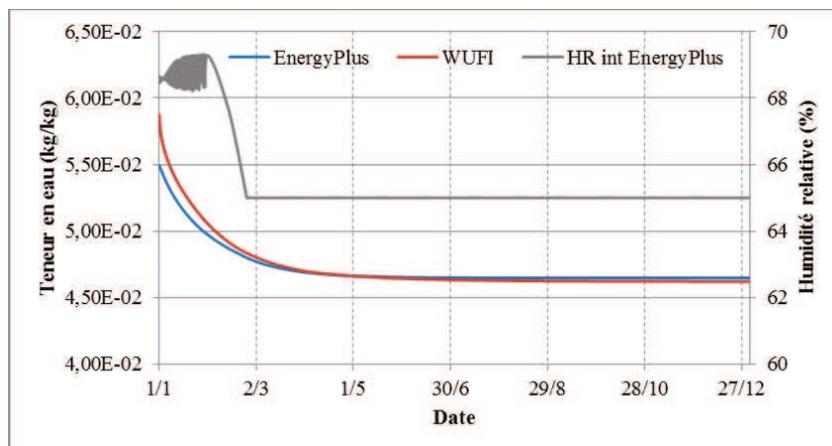
**Tableau 4.7 : Propriétés hygrothermiques du tuff (issues de Wufi Database)**

Propriétés	
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1450
Porosité (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,45
Capacité calorifique (J/kg.K)	925
Conductivité thermique (W/m.K)	0,338
Facteur de résistance à la diffusion (-)	10

L’évolution temporelle de la teneur en eau dans le mur est comparée pendant une année avec les conditions initiales et ambiantes du benchmark n°2 et précisées plus haut. Les résultats obtenus sur les deux modèles ont une corrélation forte (Fig. 4.1). Toutefois, la teneur en eau calculée par WUFI est plus élevée que celle obtenue grâce à EnergyPlus (coefficient directeur de 1,3).



**Fig. 4.1 : Comparaison des teneurs en eau calculées par WUFI 1D et EnergyPlus**



**Fig. 4.2 : Évolution des teneurs en eau au sein de la paroi calculées par EnergyPlus et WUFI**

Les différences entre les deux modèles sont faibles (Fig. 4.1 et Fig. 4.2) : l'écart relatif moyen est égal à 1% et il n'excède pas 7% en valeur absolue. Cependant, les écarts les plus importants sont observés sur les deux premiers mois de la simulation (jusqu'en mars). Cette période correspond à un temps de stabilisation de l'humidité relative intérieure à 65% dans le logiciel EnergyPlus alors que WUFI impose dès l'instant initial une humidité relative égale à 65%. Ces différences de conditions intérieures peuvent expliquer les écarts constatés entre les deux teneurs en eau.

Cette analyse nous a permis de vérifier que l'évolution de la teneur en eau calculée par l'algorithme HaMT d'EnergyPlus est cohérente avec celle de WUFI.

### 4.1.3.3.2 *Le modèle de bâtiment*

Du point de vue de l'ambiance, le modèle thermique d'EnergyPlus a été validé par le test de l'ASHRAE 1052 [EnergyPlus, 2012] sur 16 cas analytiques. Les différents cas permettent de tester plusieurs aspects du modèle : convection et conduction, gains solaires et masques, infiltration, rayonnement grandes longueurs d'onde. Les résultats obtenus présentent une forte corrélation avec les solutions théoriques de chaque cas.

L'algorithme HaMT d'EnergyPlus est encore peu utilisé. Hong et al. [Hong, 2012] ont réalisé, grâce à ce modèle, l'étude de stratégies de réhabilitation des Archives nationales au Royaume-Uni. La particularité d'un tel bâtiment est l'obligation de maintenir des conditions en température et en humidité stables pour préserver les ouvrages qui y sont conservés. La température et l'humidité relative de ce bâtiment ont donc été suivies ce qui a permis de caler le modèle. Les deux principaux paramètres ayant servi le calage sont le débit de ventilation et les échanges d'air entre les zones. Les écarts en température et en humidité relative sont faibles après calage (1,5°C au maximum en température et 6% en humidité relative).

## 4.2 Un aperçu des méthodes d'analyse de sensibilité, étude d'incertitude et confrontation modélisation/expérimentation

Dans cette partie, nous dressons un rapide aperçu des méthodes d'analyse de sensibilité dont l'objectif à terme sur ce travail est de déterminer les paramètres influents sur nos critères de décision. Cet aperçu est complété par la présentation d'une méthode d'analyse d'incertitude et des indicateurs de comparaison entre modèle et mesures. Ils nous seront utiles pour vérifier que le logiciel EnergyPlus fournit des résultats proches de la réalité sur le patrimoine en tuffeau.

### 4.2.1 Les méthodes d'analyse de sensibilité

#### 4.2.1.1 État de l'art

Une analyse de sensibilité a pour objectif d'évaluer à quel paramètre et en quelle proportion est due la variation des sorties du modèle [Spitz, 2012]. Loucks et al. [Loucks, 2005] définit aussi l'analyse de sensibilité comme la détermination du changement d'une sortie du modèle qui résulte d'une faible variation d'une donnée d'entrée.

Elles permettent ainsi d'identifier :

- Les paramètres avec une forte influence sur les sorties ;
- Les paramètres avec une faible influence sur les sorties ;
- Les corrélations entre les paramètres.

Les applications des analyses de sensibilité sont larges car elles peuvent prendre part à l'élaboration de tous les modèles. Ainsi, Saltelli et al. [Saltelli, 2000] décrivent quelques exemples d'analyse de sensibilité appliqués à des domaines différents comme l'écologie, la chimie et l'économie.

Dans le domaine du bâtiment, la thèse de C. Spitz a posé les bases de l'analyse de sensibilité au service de la connaissance de la fiabilité des outils de modélisation [Spitz, 2012].

Plusieurs méthodes existent :

- Méthodes de screening : elles permettent de déterminer les paramètres influents grâce à un nombre restreint de simulation. Elles fournissent uniquement des informations qualitative sur l'effet du paramètre sur la sortie [Jacques, 2005], [Saltelli, 2008] ;
- Analyses de sensibilité locale : elles permettent d'estimer la variation de la sortie du modèle liée à une perturbation du paramètre autour de sa valeur nominale [Spitz, 2012], [Saltelli, 2000] ;
- Méthodes des plans d'expérience : elles aident la détermination de l'influence de différents paramètres sur une ou plusieurs sorties en minimisant le nombre d'expériences à réaliser [Flory-Celini, 2008] ;
- Analyses de sensibilité globale : elles sont similaires aux analyses de sensibilité locale à la différence que l'ensemble de la plage de variation du paramètre est explorée [Saltelli, 2008], [Mara, 2000], [Jacques, 2005].

#### 4.2.1.2 Démarche de l'analyse de sensibilité locale

Une étude de sensibilité locale se concentre sur une région localisée de l'espace des données d'entrée au voisinage de la valeur nominale de chaque paramètre [Saltelli, 2000]. Elle se focalise sur l'effet d'un paramètre à la fois pour déterminer la contribution du paramètre à la variation de la donnée de sortie étudiée. Pour cela, les interactions ne sont pas étudiées évitant ainsi les phénomènes de compensation (lorsque les effets de deux paramètres sont contradictoires et qu'ils s'annulent) [Spitz, 2012]. La perturbation appliquée à chaque paramètre doit être faible pour garantir la linéarité de la sortie du modèle.

Nous définissons de manière théorique le modèle sous la forme :

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x)$$

Où  $Y$  est la sortie et  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  est l'ensemble des paramètres considérés dans le modèle.

Un indice de sensibilité réduit pour chaque paramètre  $i$  est défini [Saltelli, 2000] pour évaluer l'effet de chaque paramètre (Equation (4.7)).

$$S_i(t) = x_i \frac{\partial Y_k(t)}{\partial X_i} \tag{4.7}$$

Avec  $k$ , le nombre de paramètres indépendants retenus pour cette analyse.

L'approximation numérique est définie par Spitz [Spitz, 2012] par (Equation (4.8)) :

$$S_i(t) = x_i \frac{\Delta Y_k(t)}{\Delta X_i} = x_i \frac{[Y(x_1, x_2, \dots, x_{i+\Delta i}, \dots, x_k) - Y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k)]}{\Delta x_i} \tag{4.8}$$

### 4.2.1.3 Analyses de sensibilité appliquées aux critères de décision

Dans ce paragraphe, l'objectif est de faire un rapide état des lieux des analyses de sensibilité menées sur les critères de décision que nous avons retenus. Nous nous intéressons donc aux trois critères d'évaluation liés à la modélisation des bâtiments : les besoins de chauffage annuels, le taux d'inconfort hygrothermique et la teneur en eau dans le tuffeau.

Aucune étude de sensibilité n'a été menée précisément sur ces critères appliqués au patrimoine en tuffeau. Toutefois, il est possible de tirer des conclusions d'études similaires.

Ainsi, C. Spitz [Spitz, 2012] a mené une étude des paramètres influents sur les besoins de chauffage d'un bâtiment respectant la RT2005. L'outil de modélisation utilisé était EnergyPlus (calcul des transferts thermiques dans les parois par fonction de transfert). Les conclusions principales sont que les paramètres les plus influents sur les besoins de chauffage sont le taux de renouvellement d'air, les caractéristiques thermiques (épaisseur et conductivité thermique) des matériaux d'isolation et la température de consigne.

En ce qui concerne le taux d'inconfort hygrothermique, aucune étude n'a été menée avec la définition que nous avons retenue (3.2.2). Cependant, l'inconfort thermique estival a été étudié : il est calculé suivant la RT2005 (nombre d'heures où la température intérieure est supérieure à 28°C). L'analyse de sensibilité, réalisée par Spitz [Spitz, 2012], soulève l'influence notable :

- Du coefficient d'absorptivité de l'enduit extérieur,
- Des coefficients de convection,
- Du coefficient de transmission du vitrage,
- Du taux de renouvellement d'air,
- De la masse volumique et de la chaleur spécifique du plancher bas.

Cette étude nous fournit des informations sur notre critère de décision en caractérisant les paramètres influant sur la température intérieure. Pour compléter cette étude et identifier les paramètres affectant notre critère d'inconfort, une analyse de sensibilité de l'humidité intérieure doit être menée.

Enfin, la sensibilité de la teneur en eau dans la paroi n'a pas été étudiée avec l'outil EnergyPlus. Cependant, Holm et al. [Holm, 2000] ont mené une étude avec le logiciel similaire WUFI. La paroi étudiée est une toiture en béton cellulaire autoclave. Les paramètres les plus influents sur la teneur en eau dans cette paroi sont les propriétés des matériaux : principalement la courbe de sorption, les coefficients de transport liquide et la perméabilité à la vapeur.

Les études précédentes permettent d'identifier une liste de paramètres d'entrée du modèle (Tableau 4.8) qui peuvent affecter les critères de décision qui nous intéressent et propager ainsi leurs incertitudes.

**Tableau 4.8 : Présélection de paramètres affectant les critères de décision**

Paramètres	Critères affectés
Epaisseur des matériaux d'isolation	Besoins de chauffage
Conductivité thermique des matériaux d'isolation	Besoins de chauffage
Température de consigne	Besoins de chauffage
Coefficient de convection	Taux d'inconfort
Coefficient de transmission du vitrage	Taux d'inconfort
Taux de renouvellement d'air	Taux d'inconfort
Masse volumique des matériaux	Taux d'inconfort
Chaleur spécifique des matériaux	Taux d'inconfort
Coefficient d'absorption de l'enduit extérieur	Taux d'inconfort
Isotherme de sorption des matériaux	Teneur en eau
Coefficient de transport liquide	Teneur en eau
Perméabilité à la vapeur des matériaux	Teneur en eau

#### 4.2.2 Analyse d'incertitude et comparaison d'un modèle à des mesures

##### 4.2.2.1 Analyse d'incertitude par la méthode de Monte Carlo

Une analyse d'incertitude cherche à évaluer un intervalle de confiance de la sortie d'un modèle à partir de l'incertitude des paramètres d'entrée [MacDonald, 2001].

On définit pour chaque paramètre son incertitude et sa distribution dans la plage de variation. Une des analyses d'incertitude les plus connues est la méthode Monte-Carlo : les plages de variation des paramètres sont explorées aléatoirement suivant leur distribution : pour chaque valeur retenue, les sorties du modèles sont calculées. Pour obtenir un échantillonnage satisfaisant, le nombre de simulation doit être élevé [Spitz, 2012] et peut donc être amélioré par des techniques d'échantillonnage plus performantes type Latin Hypercube Sampling.

Ensuite, les relations ou l'absence de relation entre les sorties du modèle et les valeurs de paramètres sont analysées. Il est ainsi possible de déterminer des effets linéaires, des valeurs seuils ou une absence d'influence [Burhenne, 2010].

Enfin, l'incertitude de la sortie du modèle ainsi que sa distribution peuvent être estimée à partir des résultats obtenus sur l'ensemble de l'échantillon.

##### 4.2.2.2 Les indicateurs de comparaison modèle/mesures

L'ASHRAE [ASHRAE, 2002] définit deux indicateurs de comparaison d'un modèle à des mesures expérimentales pour les besoins de chauffage. Ces indicateurs évaluent la cohérence des résultats du modèle avec les mesures selon deux points de vue : la moyenne de la grandeur considérée et son évolution dynamique.

- Erreur moyenne normalisée (Equation (4.9)) (NMBE pour Normalized Mean Bias Error) :

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (4.9)$$

- Coefficient de variation de l'erreur des moindres carrés (Equation (4.10)) (CVRMSE pour Coefficient Variation of Mean Square Error) :

$$CVRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2 / n}}{\bar{m}} \quad (4.10)$$

Avec  $m_i$  les mesures expérimentales au pas de temps  $i$   
 $s_i$  les résultats de la simulation au pas de temps  $i$   
 $n$  le nombre de pas de temps étudié

L'indicateur NMBE fournit des informations sur la comparaison entre les moyennes issues du modèle et des mesures. L'indicateur CVRMSE analyse les écarts d'évolution entre le modèle et les résultats expérimentaux.

## 4.3 L'analyse de sensibilité de l'humidité spécifique intérieure d'un bâtiment en tuffeau

Au paragraphe 4.2.1.3, nous avons fait un état des lieux des analyses de sensibilité menées sur les données d'entrée de nos critères de décision. Ainsi, des études ont déjà été réalisées sur les besoins de chauffage, la température intérieure et la teneur en eau. Il manque toutefois l'identification des paramètres qui affectent l'humidité spécifique, nécessaire au calcul du taux d'inconfort. Nous menons donc ici une analyse de sensibilité locale sur l'humidité spécifique intérieure d'un bâtiment en tuffeau. Il s'agit de compléter la présélection des paramètres qui modifient nos critères de décision commencée dans le Tableau 4.8.

### 4.3.1 Méthodologie

#### 4.3.1.1 Description de l'étude de cas

Le cas d'étude pour l'analyse de sensibilité de l'humidité intérieure est un cas fictif d'une maison rurale en tuffeau datant du 16<sup>ème</sup> siècle. Le bâtiment a une surface habitable de 200 m<sup>2</sup> répartis sur deux niveaux (rez-de-chaussée et 1<sup>er</sup> étage). Il est composé de quatre zones occupées : cuisine et séjour au rez-de-chaussée et chambres et salle de bain au 1<sup>er</sup> étage. Les combles et la grange sont aussi intégrés au modèle. Le bâtiment est orienté Nord/Sud. La Fig. 4.3 présente une vue du cas d'étude.

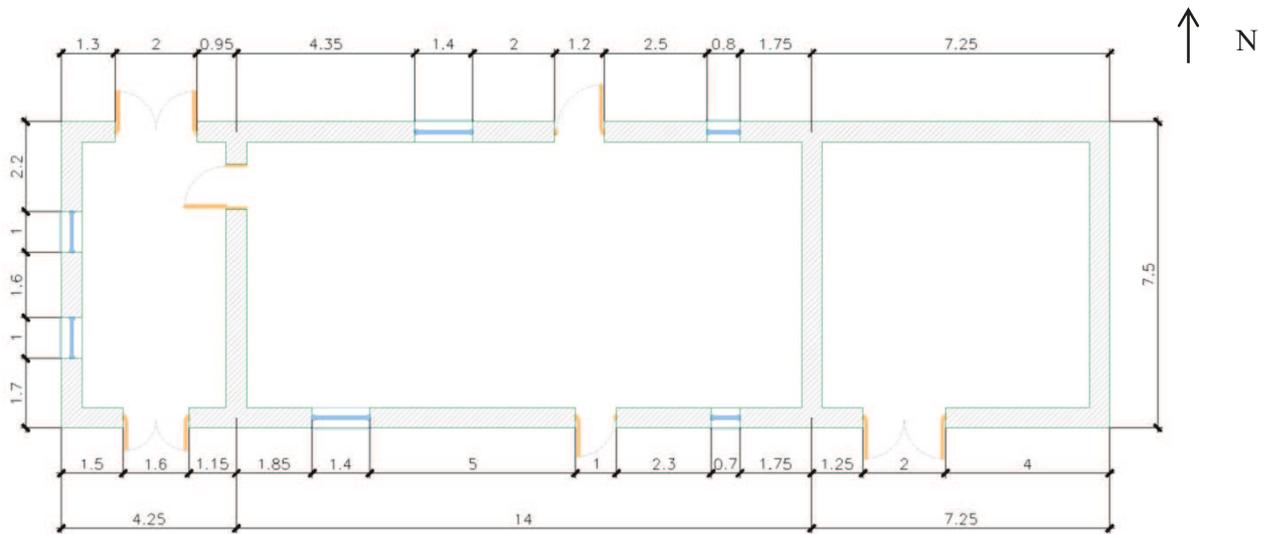


Fig. 4.3 : Plan du rez-de-chaussée du cas d'étude

Les caractéristiques principales des parois sont données dans le Tableau 4.9.

Tableau 4.9 : Description de parois principales du cas d'étude

Paroi	Matériaux	Épaisseur (cm)
Fenêtre	Vitrage	0,4
Plancher bas	Carreaux de terre cuite	5
Toiture non isolée	Ardoise	3
Toiture isolée	Ardoise	3
	Lame d'air	5
	Laine de verre	10
	Plâtre	1,3
Plancher intermédiaire (entre RDC et 1 <sup>er</sup> étage)	Parquet bois	5
	Lame d'air	10
	Plâtre	1,3
Plancher intermédiaire (entre 1 <sup>er</sup> étage et combles)	Parquet bois	5
	Laine de verre	10
	Plâtre	1,3
Murs verticaux	Tuffeau	50

Les conditions climatiques imposées sont celles du fichier Meteonorm de la ville d'Angers (47°25'00''N – 0°31'23''W, France).

La ventilation est naturelle. Le débit d'infiltration est calculé grâce à l'équation (4.11). Il dépend de la surface équivalente de fuite ( $A_L$ ), de la vitesse du vent ( $V_{vent}$ ) et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur pour chaque zone [EERE, 2012].

$$Inf = \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_s \Delta T + C_w (V_{vent})^2} \quad (4.11)$$

L'occupation est simulée par des gains internes de 5 W/m<sup>2</sup> en période d'occupation dans la cuisine, le séjour, les chambres et la salle de bain [RT2005]. Aucune source d'humidité intérieure n'est prise en compte. Le scénario d'occupation est celui de la RT 2005 [RT2005] : occupation de 16h à 10h en semaine et occupation permanente le week-end.

La température de consigne est fixée à 19°C en période d'occupation et 16°C autrement.

#### 4.3.1.2 Démarche appliquée à l'humidité intérieure

Dans un premier temps, nous réalisons une présélection des paramètres du modèle d'après la littérature et des équations régissant le calcul de cette grandeur. De manière générale, les données d'entrée peuvent être classées en quatre catégories [Spitz, 2012], [Spitz, 2013] :

- Données géométriques du bâtiment ;
- Caractéristiques hygrothermiques des matériaux : épaisseur, conductivité thermique, teneur en eau initiale, isotherme de sorption, coefficient de succion, résistance à la diffusion, etc. ;
- Conditions climatiques extérieures : humidité relative extérieure, température, rayonnement solaire, etc.
- Usage du bâtiment : température ambiante intérieure, gains internes, taux de renouvellement d'air, etc.

L'équation (4.6) qui régit le calcul de l'humidité intérieure ambiante fait intervenir plusieurs paramètres : les coefficients de convection surfacique, le taux de renouvellement d'air, les gains internes. La teneur en eau en surface des parois des zones est aussi une donnée d'entrée de cette équation. Elle est, elle-même, déterminée grâce aux caractéristiques hygrothermiques des matériaux et aux conditions intérieures et extérieures (Equation (4.4)).

Nous choisissons de nous concentrer sur 102 paramètres parmi les caractéristiques hygrothermiques des matériaux (épaisseur, conductivité thermique, densité, isotherme de sorption, etc.) et l'usage du bâtiment (gains internes, surface équivalente de fuite, etc.) dont la liste est donnée en Annexe B.

Pour garantir la linéarité de la sortie du modèle par rapport à la variation de la donnée d'entrée, une perturbation de 5% est appliquée à chaque paramètre indépendamment.

La sortie du modèle étudiée est la moyenne sur une année de l'humidité spécifique intérieure en  $\text{kg}/\text{kg}_{\text{airsec}}$ . Ainsi, les indices de sensibilité, dont l'équation (4.8) a été donnée au paragraphe 4.2.1.2, sont calculés pour chaque paramètre et pour chaque zone occupée du cas d'étude (cuisine, séjour, chambre et salle de bain).

Les indices de sensibilité des quatre zones sont normalisés par rapport à l'indice maximum en valeur absolue et sont ainsi compris entre -1 et 1 (Equation (4.12)) [Spitz, 2012].

Un indice de sensibilité négatif signifie que l'accroissement du paramètre d'entrée induit une augmentation de l'humidité spécifique moyenne. Au contraire, un indice de sensibilité positif souligne que l'augmentation de la valeur du paramètre provoque une diminution de l'humidité spécifique moyenne.

$$S_{i,norm}(t) = \frac{S_i(t)}{\max_k(S_k(t))} \quad (4.12)$$

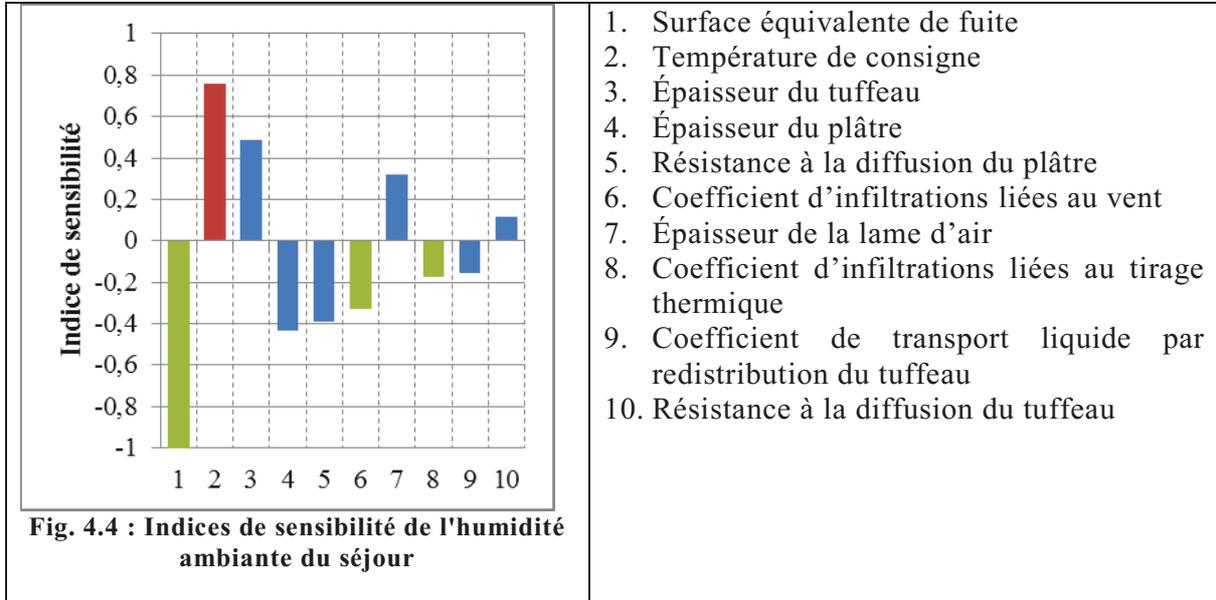
L'étude se concentre sur les paramètres dont l'indice de sensibilité est supérieur à 0,1 en valeur absolue. En deçà de ce seuil, nous considérons que l'influence du paramètre sur l'humidité intérieure est négligeable.

#### 4.3.2 Résultats

Nous ne présentons ici que les résultats concernant le séjour (RDC) et la chambre (1<sup>er</sup> étage). Une étude identique a été menée pour la cuisine et la salle de bain qui a donné des résultats similaires à ceux que nous explicitons ici. L'ensemble des résultats pour ces deux dernières pièces est donné en Annexe C.

Sur les quatre zones occupées, 30 paramètres présentent un indice de sensibilité nul. Suivant les pièces, le nombre de paramètres dont l'indice de sensibilité est supérieur à 0,1 en valeur absolue varie entre 10 et 12. Les paramètres sont répartis en trois classes avec un code couleur pour les Fig. 4.4 et Fig. 4.5.

- En vert : les paramètres influant le renouvellement d'air ;
- En bleu : les caractéristiques des matériaux ;
- En rouge : les paramètres liés à l'occupation.

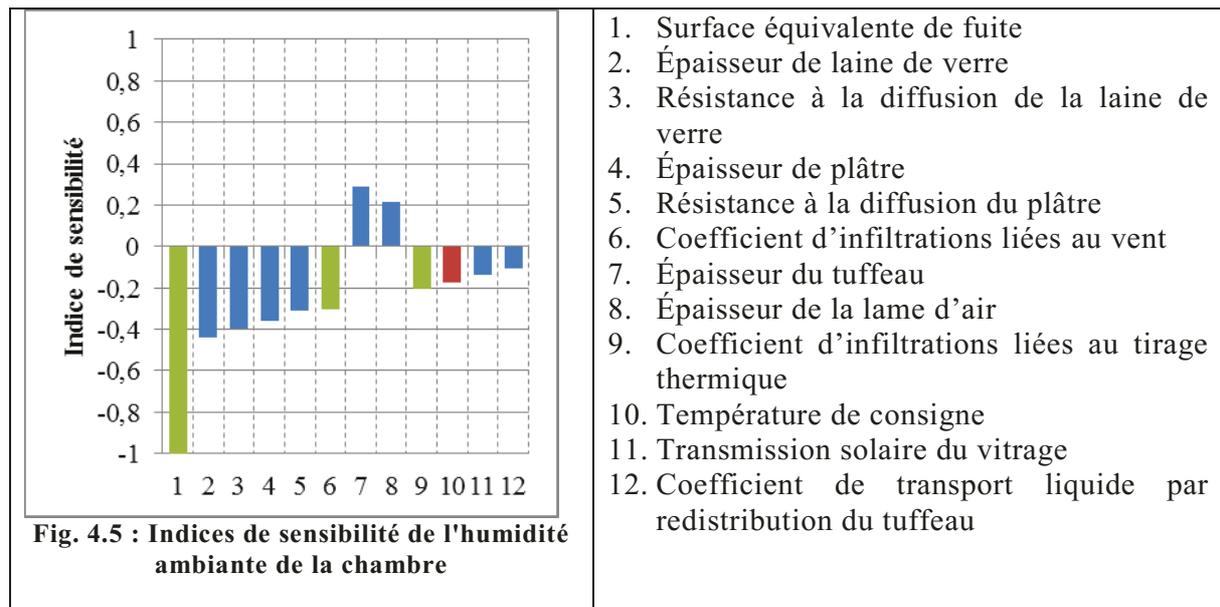


10 paramètres présentent un indice de sensibilité absolu supérieur à 0,1 pour l'humidité du séjour. Le plus influent est la surface équivalente de fuite. La température de consigne a un effet notable sur cette grandeur avec un indice de sensibilité égal à 0,75.

Les deux caractéristiques : épaisseur et résistance à la diffusion du tuffeau et du plâtre font partie des paramètres les plus influents.

Enfin, les deux autres paramètres affectant le renouvellement d'air (8 et 9), les coefficients  $C_s$  et  $C_w$  de l'équation (4.11), possèdent un indice de sensibilité élevé.

Nous constatons que la hausse des paramètres du renouvellement (1, 8 et 9) ainsi que celle des caractéristiques du plâtre (4 et 5) entraînent une augmentation de l'humidité moyenne du séjour. La température de consigne ainsi que les caractéristiques du tuffeau et de la lame d'air quant à eux ont un indice de sensibilité positif.



Au niveau de la chambre, les paramètres influents sur l'humidité sont plus nombreux (12). Le paramètre le plus influent dans cette pièce est aussi la surface équivalente de fuite. Les autres paramètres retenus présentent des indices de sensibilité plutôt faibles (inférieurs à 0,5 en valeur absolue).

De la même manière que pour le séjour, les caractéristiques des matériaux : épaisseur et résistance à la diffusion sont retenus. Toutefois, l'épaisseur de la laine de verre est la plus influente dans cette pièce.

### 4.3.3 Analyse

Les résultats précédents ont mis en évidence que le renouvellement d'air affecte de manière significative l'humidité ambiante des différentes pièces puisque les trois paramètres qui affectent le débit d'air sont parmi les plus influents. Ce résultat est cohérent avec l'équation d'équilibre hygrique de la zone (Equation (4.6)) présentée au paragraphe 4.1.3.2.2. L'apport d'humidité est corrélé à la quantité d'air extérieur qui pénètre le local soit le débit d'infiltration.

Ensuite, les caractéristiques des matériaux principalement l'épaisseur et la résistance à la diffusion présentent des indices de sensibilité élevés. Cependant, suivant les pièces, les matériaux diffèrent :

- Au rez-de-chaussée (cuisine et séjour) : les deux matériaux influents sont le tuffeau et le plâtre ;
- Au 1<sup>er</sup> étage (salle de bain et chambre) : les matériaux laine de verre, tuffeau et plâtre affectent l'humidité intérieure.

Il s'agit des matériaux en contact avec l'ambiance (plâtre et tuffeau) ou à proximité (laine de verre en toiture).

Ces résultats mettent en évidence que l'humidité ambiante d'un bâtiment en tuffeau est majoritairement affectée par la surface équivalente de fuite du local et l'épaisseur et la résistance à la diffusion des matériaux en contact avec l'ambiance ou à proximité. Ainsi, nous pouvons ajouter ces derniers paramètres au Tableau 4.8 pour compléter la liste des données d'entrée qui influencent les critères de décision que nous avons retenus. Stéphan et al. [Stéphan, 2013] ont mené une étude similaire sur l'humidité spécifique avec des indicateurs différents. Les paramètres mis en évidence sont cependant les mêmes.

## 4.4 Confrontation modélisation/ expérimentation

Nous avons sélectionné un outil qui paraît répondre aux exigences du cahier des charges de modélisation des bâtiments en tuffeau. L'objectif de cette partie est de vérifier la pertinence de notre choix en confrontant les résultats du modèle à des mesures expérimentales réalisées sur un cas réel en tuffeau.

Une cellule expérimentale en tuffeau instrumentée est le support de cette vérification. Les mesures sont comparées aux sorties du modèle de la cellule produit grâce à EnergyPlus. Une analyse d'incertitude est menée pour déterminer les relations entre les paramètres d'entrée et les erreurs du modèle pour à terme caler le modèle par rapport aux mesures disponibles.

### 4.4.1 Méthodologie

#### 4.4.1.1 Description de la cellule expérimentale

##### 4.4.1.1.1 Description physique

La cellule expérimentale se situe sur le site du Cerema – DTerOuest à Angers (47°25'00''N – 0°31'23''W, France). Elle a été construite en février 2012.

La cellule se compose d'une seule zone de surface au sol 3x5 m<sup>2</sup> et d'une hauteur de 3 m. Les quatre parois sont orientées suivant les directions cardinales (Nord, Sud, Est, Ouest). Cependant, les trois murs Nord, Est et Ouest sont en contact avec des zones chauffées (Fig. 4.6). Seule la façade Sud donne sur l'extérieur.

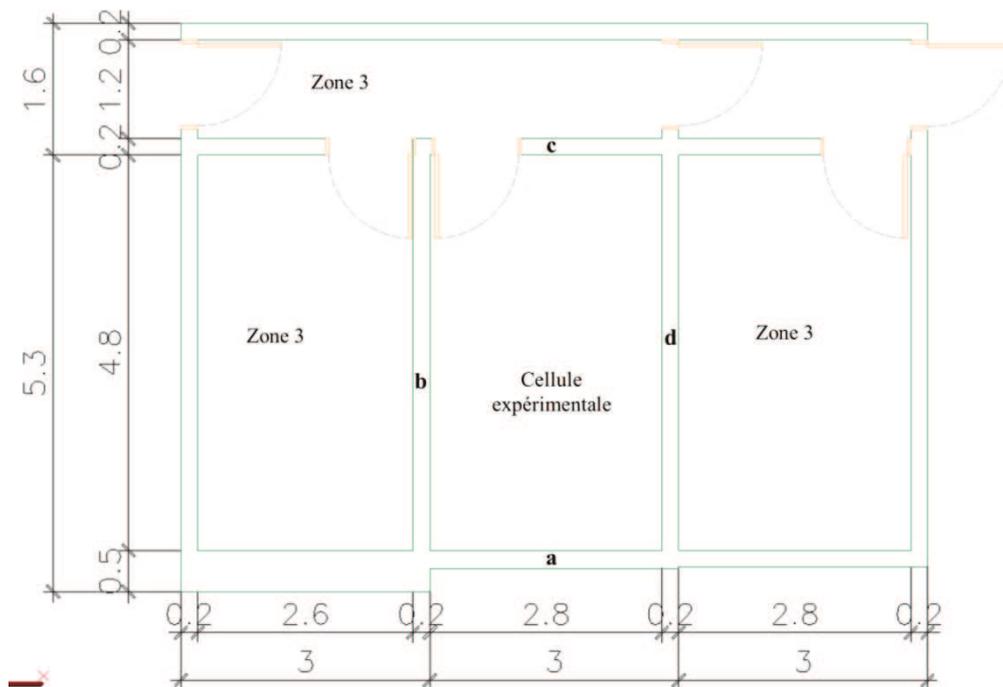


Fig. 4.6 : Plan de la cellule expérimentale



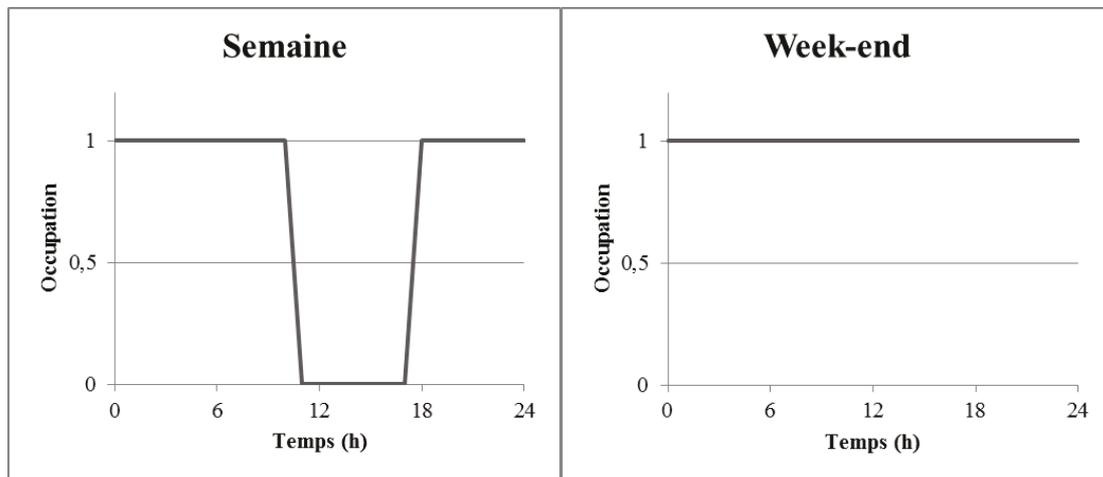
**Fig. 4.7 : Droite : vue de la façade extérieure – Gauche : vue intérieure (isolant) de la cellule expérimentale**

La façade extérieure est en pierre de taille de tuffeau d’une épaisseur de 22 cm avec des joints minces de chaux, sable et eau (Fig. 4.7).

Pour stopper les échanges thermiques et hygriques avec les autres zones, un complexe isolant de 10 cm de laine de verre et pare-vapeur a été ajouté sur les trois parois (b, c et d sur la Fig. 4.6) et le plafond composées de bois (Fig. 4.7). Le plancher est constitué de vinyle sur une dalle béton.

Le chauffage de la cellule est assuré par un convecteur électrique d’une puissance de 2000 W et suit les scénarios d’occupation de la RT 2005 [RT2005] pour un logement (Fig. 4.8). La température de consigne est fixée à environ 19°C en période de confort et environ 16°C en réduit.

Les scénarios de chauffage des autres zones avec lesquelles la cellule expérimentale est en contact sont présentés dans le Tableau 4.10.



**Fig. 4.8 : Scénarios de chauffage de la cellule expérimentale (1 = confort, 0 = réduit)**

**Tableau 4.10 : Scénarios de chauffage des zones en contact avec la cellule expérimentale**

Zones	Semaine	Week-end
1	RT 2005 (soirée + nuit) (Fig. 4.8)	RT 2005 (permanent) (Fig. 4.8)
2	Permanent	Permanent
3	Permanent	Permanent avec léger réduit de la température de consigne

Il n’y a pas de système de ventilation mécanique, le renouvellement d’air s’effectue par les défauts d’étanchéité de la zone. Le taux de renouvellement d’air à 50 Pa ( $n_{50}$ ) est égal à 4,3 h<sup>-1</sup>

<sup>1</sup> ce qui équivaut à un indice  $Q_{4Pa}$  de  $5,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . D'après la norme NF EN 13789 [NF 13789], la cellule expérimentale correspond à un bâtiment ayant une perméabilité à l'air moyenne.

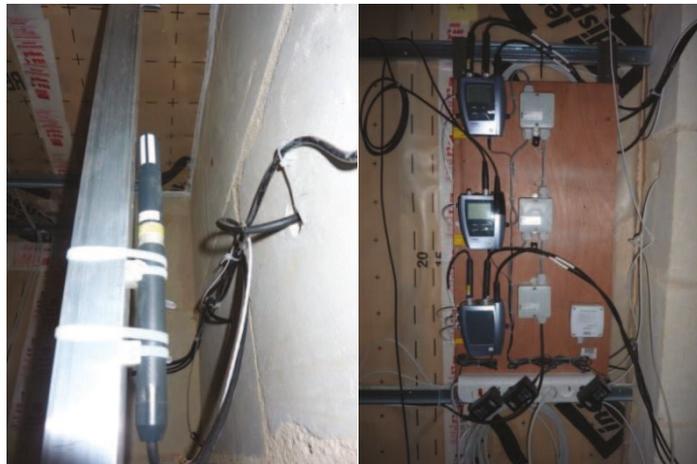
Aucun gain interne ni source d'humidité n'est simulé dans la cellule expérimentale.

#### 4.4.1.1.2 Instrumentation

L'objectif de cette instrumentation est de fournir des données sur l'évolution du comportement hygrothermique réel d'une pièce en tuffeau. Ces mesures doivent servir pour la comparaison du modèle afin de vérifier s'il traduit de manière pertinente le comportement des bâtiments en tuffeau.

Pour cela, les conditions hygrothermiques de l'ambiance sont suivies. La température de l'air et l'humidité relative sont mesurées à 1,80 m de hauteur au milieu de la pièce pour éviter les effets de convection sur les parois (Fig. 4.9).

Le capteur est le modèle HC2 de la marque Rotronic. Sa précision est de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  et  $\pm 0,35\%RH$ . Le pas de temps d'enregistrement est 5 minutes.



**Fig. 4.9 : Droite : Capteurs de température et humidité relative d'ambiance - Gauche : Centrales d'acquisition des données**

La modélisation nécessite la connaissance des conditions aux limites de la cellule. Les températures de surface du plancher, du plafond et des surfaces en contact avec les autres zones sont mesurées au centre de chaque paroi.

Les capteurs sont des thermocouples de la marque Rotronic, modèle AC1913-A avec une précision de  $0,15^\circ\text{C}$ . Le pas de temps d'enregistrement est identique : 5 minutes.

La consommation du convecteur électrique est mesurée avec une incertitude  $\pm 4\%$ .

Une station météo locale mesure les conditions climatiques : température d'air, humidité relative, rayonnement solaire horizontal, vitesse et direction du vent. Les capteurs sont de la marque CIMA. Leurs incertitudes sont données dans le Tableau 4.11.

**Tableau 4.11 : Incertitude de mesures des capteurs de la station météorologique locale**

<b>Grandeur</b>	<b>Incertitude</b>
<b>Température</b>	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
<b>Humidité relative</b>	$\pm 3\%\text{RH}$
<b>Rayonnement solaire horizontal</b>	$\pm 5\%$
<b>Vitesse de vent</b>	$\pm 5\%$
<b>Direction du vent</b>	$\pm 7^{\circ}$

#### 4.4.1.2 Modélisation de la cellule expérimentale

La période de mesures que nous étudions s'étend du 12 février 2013 9h00 au 28 février 2013 23h00. Il s'agit d'une période d'hiver où l'ensemble des données mesurées est apparu fiable. Les propriétés des matériaux sont issues des mesures de K. Beck [Beck, 2006] pour le tuffeau. L'évolution de la conductivité thermique avec la teneur en eau quant à elle provient du modèle de Béziat (Chapitre 1) basé sur la mesure de conductivité sèche [Laurent, 1998]. Les caractéristiques des matériaux constituant les autres parois sont issues de la base de données Wufi.

La température de consigne imposée au modèle pour obtenir les besoins de chauffage est égale à la température d'air mesurée au centre de la pièce. Le fichier de consigne est construit au pas de temps horaire.

Les températures de surface mesurées sont imposées comme conditions aux limites pour le plancher, le plafond et les trois parois en contact avec les autres zones chauffées. Cependant, la température de surface nécessaire au modèle est la température de surface extérieure de la paroi. Dans cette étude, nous avons mesuré la température de surface intérieure. Pour pallier cette différence, les parois sont assimilées à un pare-vapeur de faible épaisseur (1 mm).

Le fichier météo d'entrée d'EnergyPlus est construit avec les mesures de la station météorologique locale pour la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire globale et la vitesse et direction du vent. Les rayonnements solaires diffus et direct sont calculés grâce à la corrélation de Reindl [TRNSYS]. Le pas de temps est d'une heure.

Le renouvellement d'air de la cellule est lié aux infiltrations par les défauts d'étanchéité. Pour modéliser ces infiltrations, le modèle retenu est identique à celui utilisé pour l'analyse de sensibilité sur l'humidité ambiante (paragraphe 4.3.1). Les données nécessaires sont la surface équivalente de fuite, les coefficients d'infiltrations liées au vent et au tirage thermique. Pour cette cellule, la perméabilité à l'air mesurée est de  $5,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  ce qui correspond à une surface équivalente de fuite de  $90 \text{ cm}^2$ . Les coefficients d'infiltrations (Equation (4.11)) sont issus de la documentation d'EnergyPlus [EERE, 2012] préconisés pour un bâtiment à un niveau protégé par quelques édifices alentours.

Aucun pont thermique n'est modélisé.

Les coefficients de convection des parois sont ceux donnés dans la RT 2005 [RT2005].

#### 4.4.1.3 Démarche de comparaison du modèle aux mesures expérimentales

Les objectifs de cette partie sont d'identifier les paramètres qui peuvent être des sources d'erreur du modèle et de vérifier la pertinence de celui-ci en le calant d'un point de vue thermique et hygrique. Pour cela, les deux grandeurs considérées pour la comparaison sont la puissance de chauffage nécessaire pour assurer le confort thermique mesuré et l'humidité spécifique intérieure. La simulation obtenue au terme de cette partie représentera le meilleur compromis de calage en puissance de chauffage et humidité spécifique.

La démarche que nous menons pour atteindre ces objectifs se base sur une analyse d'incertitude par Monte-Carlo sur un nombre restreint de paramètres. L'ensemble du processus est détaillé sur la Fig. 4.10. Les plages d'incertitude des paramètres sélectionnés sont explorées aléatoirement et les indicateurs de comparaison sont calculés pour chaque simulation d'exploration (NMBE et CVRMSE). Suivant les erreurs obtenues sur les simulations, une révision des plages de variation des paramètres peut être réalisée pour s'approcher de la réalité. Ces étapes (2, 3 et 4 sur la Fig. 4.10) sont répétées jusqu'à obtenir une simulation dont les résultats sont cohérents avec la mesure : NMBE inférieure à 5% pour les deux grandeurs.

Les indicateurs de comparaison ont été définis au paragraphe 4.2.2.2 (Equations (4.9) et (4.10)) et sont appliqués à l'humidité spécifique intérieure et à la puissance de chauffage calculés avec un pas de temps horaire. La comparaison du modèle aux mesures est donc menée sur quatre indicateurs que nous noterons :

- NMBE\_HS pour l'erreur moyenne normalisée de l'humidité spécifique ;
- CVRMSE\_HS pour le coefficient de variation de l'erreur des moindres carrés de l'humidité spécifique ;
- NMBE\_Pchfge pour l'erreur moyenne normalisée de la puissance de chauffage ;
- CVRMSE\_Pchfge pour le coefficient de variation de l'erreur des moindres carrés de la puissance de chauffage ;

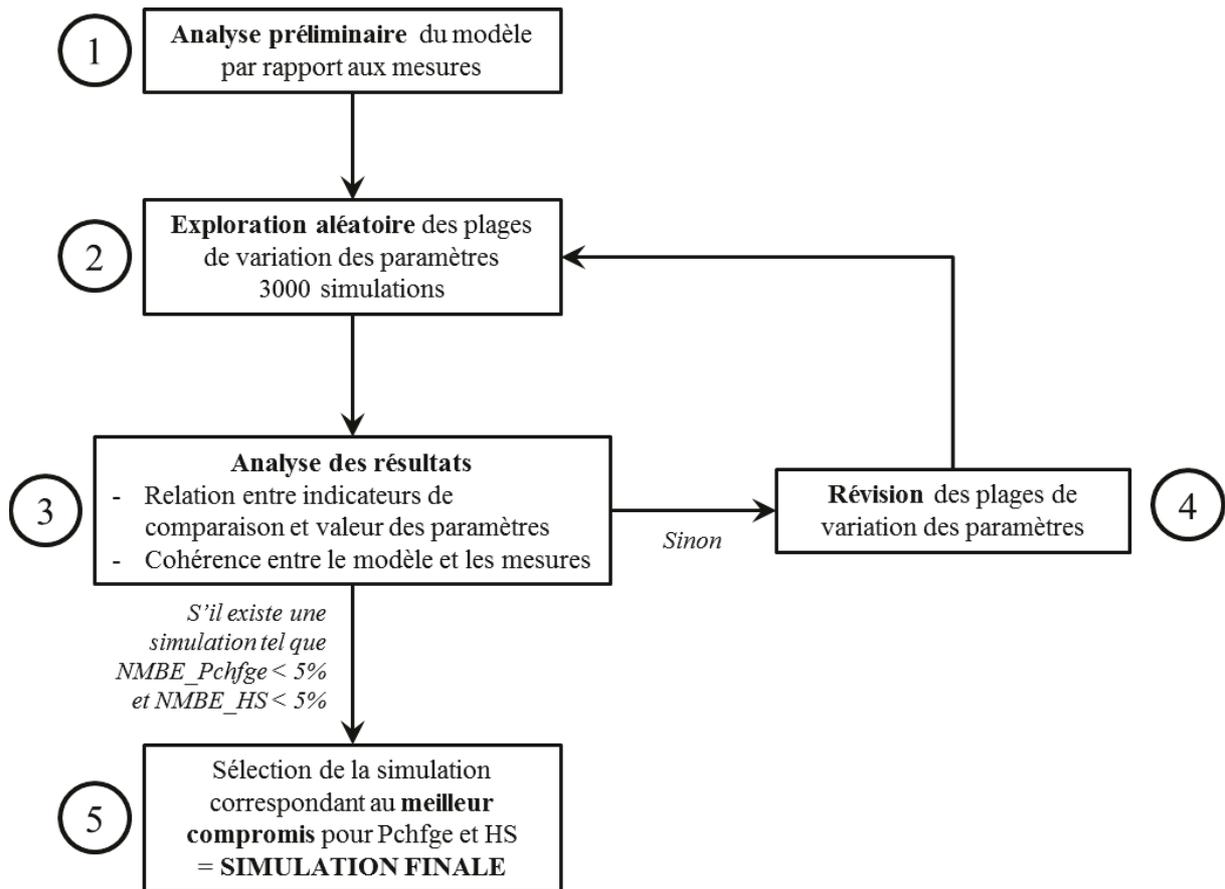


Fig. 4.10 : Processus de vérification des résultats du modèle par rapport aux mesures expérimentales

Avant d'appliquer ce processus, une présélection des paramètres affectant les deux sorties du modèle (Pchfge et HS) et la définition de leur plage d'incertitude sont réalisées. Cette présélection est menée en accord avec les études de sensibilité déjà conduites sur les besoins de chauffage (synthèse présentée au paragraphe 4.2.1.3) et celle menée sur l'humidité ambiante réalisée au paragraphe 3 sur un tuffeau.

17 paramètres sont ainsi retenus concernant le taux de renouvellement d'air, les caractéristiques hygriques et thermiques des matériaux et les coefficients d'échanges surfaciques. Nous définissons une plage de variation des paramètres à partir de l'incertitude expérimentale du paramètre et de la littérature (Tableau 4.12).

- Les plages d'incertitudes des propriétés hygrothermiques des matériaux sont fixées à 20% car cela correspond aux incertitudes de mesures [NF 10456], [NF 12572] ;
- L'incertitude associée au tuffeau est augmentée à 30% car les caractéristiques de cette pierre ont une large variation suivant le lieu d'extraction et les données initiales sont issues d'un tuffeau différent de celui de la cellule expérimentale [Dessandier, 2000], [Chéné, 1999], [Beck, 2006];
- L'incertitude de la conductivité thermique du tuffeau en fonction de sa teneur en eau est fixée à 50% car elle est calculée à partir d'un modèle théorique (Fig. 4.11). L'ensemble de la courbe d'évaluation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau est modifiée par la valeur d'incertitude retenue. Celle-ci ne diffère pas selon le point de la courbe considéré ;
- L'incertitude de la teneur en eau initiale prend en compte l'ensemble des possibilités : du tuffeau totalement sec au tuffeau saturé en eau ;
- Une large plage de variation est considérée sur les coefficients de vapeur de la paroi en tuffeau car nous constatons de fortes lacunes sur cette donnée dans la littérature ;

- La mesure de perméabilité à l'air a mis en évidence une importante surface de fuite (90 cm<sup>2</sup>). La mesure a été complétée par un test de fumée. La cellule a été mise en surpression et une source de fumée a été placée à l'intérieur. Aucune sortie de fumée n'a été constatée en dehors de la cellule que ce soit dans les autres zones ou à l'extérieur du bâtiment. Une incertitude élevée de 50% est donc considérée pour prendre en compte cette absence d'observations d'entrée d'air dans les parois.

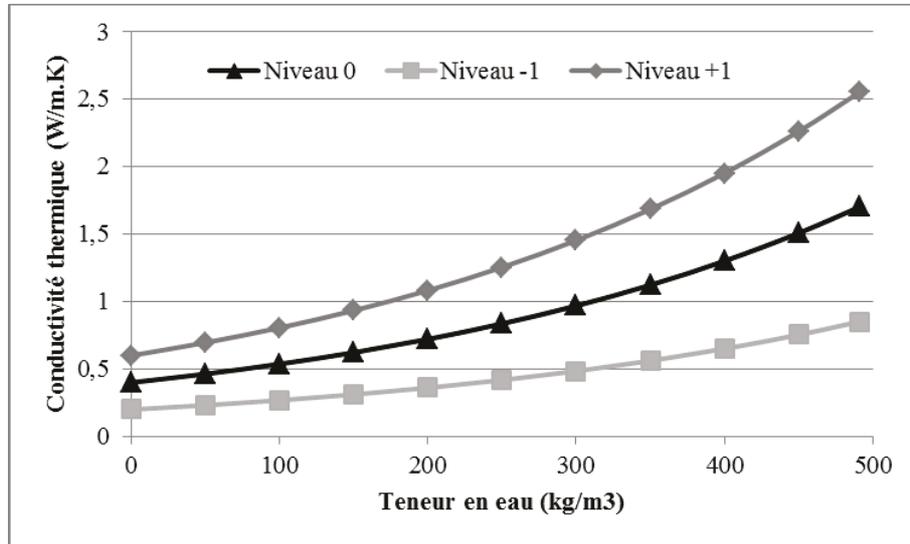


Fig. 4.11 : Plage d'incertitude de la conductivité thermique du tuffeau en fonction de la teneur en eau

Tableau 4.12 : Incertitude des paramètres retenus

	Paramètre	Incertitude
P1	Épaisseur du tuffeau	± 0.02 m
P2	Teneur en eau initiale du tuffeau	0 – 0.24 kg/kg
P3	Courbe de sorption du tuffeau	± 30%
P4	Facteur de résistance à la diffusion du tuffeau	± 30%
P5	Conductivité thermique du tuffeau	± 50%
P6	Coefficient de convection du mur Est	± 20%
P7	Coefficient de convection du mur Ouest	± 20%
P8	Coefficient de convection du plafond	± 20%
P9	Coefficient de convection du mur Nord	± 20%
P10	Coefficient de convection du plancher	± 20%
P11	Coefficient de convection intérieur du mur Sud	± 20%
P12	Coefficient de convection extérieur du mur Sud	± 20%
P13	Coefficient de vapeur extérieur du mur Sud	0 – 6.25 10 <sup>-8</sup>
P14	Coefficient de vapeur intérieur du mur Sud	0 – 2 10 <sup>-8</sup>
P15	Surface équivalente de fuite	± 50%
P16	Coefficient de tirage thermique pour le renouvellement d'air	± 50%
P17	Coefficient de vent pour le renouvellement d'air	± 50%

Pour l'analyse des résultats de l'étape 3 (Fig. 4.10), trois relations entre les valeurs des paramètres et les indicateurs de comparaison (NMBE ou CVRMSE) sont identifiées (Fig. 4.12, Fig. 4.13 et Fig. 4.14).

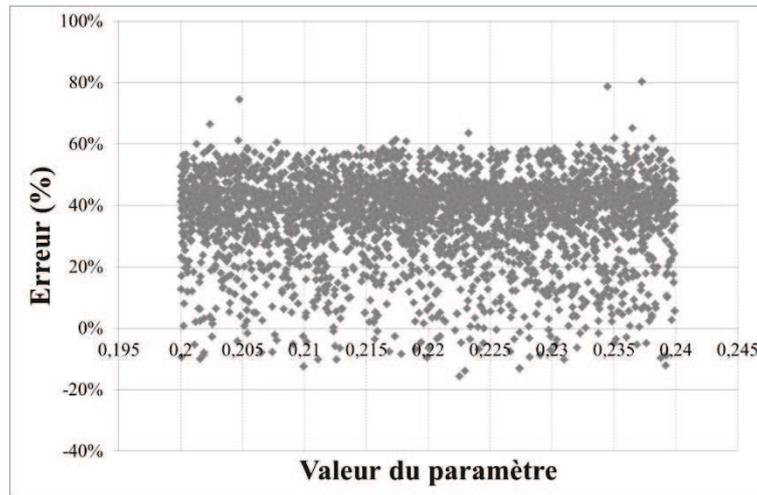


Fig. 4.12 : Absence de relation entre l'erreur du modèle et les valeurs du paramètre

La première tendance (Fig. 4.12) correspond à une absence de relation entre la valeur du paramètre et l'erreur moyenne calculée.

La seconde tendance (Fig. 4.13) que nous nommons « Type 1 » dans la suite du document met en évidence la présence d'une plage de valeurs permettant de minimiser l'erreur. Pour caractériser cette catégorie de relation, les couples d'indicateurs  $(E_{\min}, P_{\min})$  et  $(E_{\max}, P_{\max})$  ainsi que  $A_{\text{err}}$  sont définis.

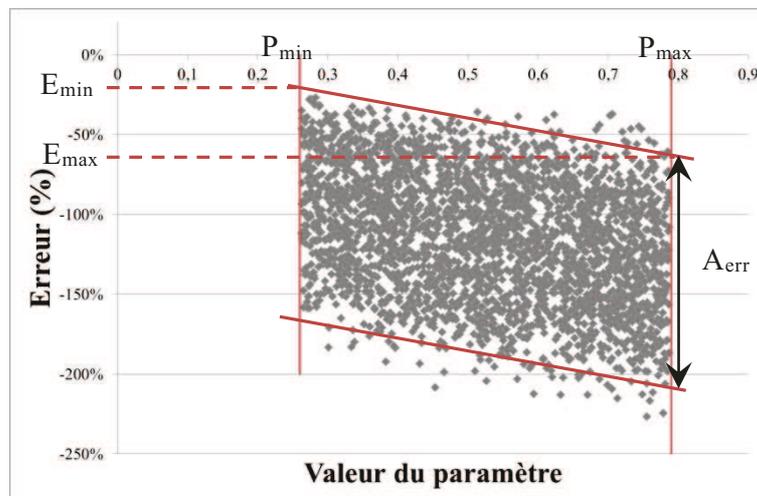


Fig. 4.13 : Relation de Type 1 entre l'erreur du modèle et les valeurs du paramètre

Enfin, la troisième catégorie de relation (Fig. 4.14), nommée « Type 2 » dans les paragraphes suivants, met en évidence qu'en-dessous/au-dessus d'une certaine valeur d'entrée, l'erreur est maximale. Les indicateurs  $(E_{\text{selec}}/P)$  et  $E_{\min}$  sont définis pour caractériser cette relation. Nous prendrons  $E_{\text{selec}}$  égale à 20% dans la majorité des cas.

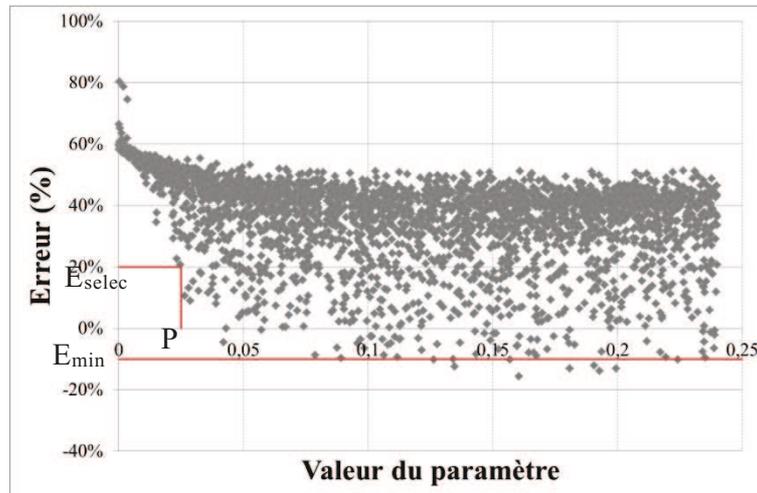


Fig. 4.14 : Relation de Type 2 entre l'erreur du modèle et les valeurs du paramètre

#### 4.4.2 Résultats et discussions

##### 4.4.2.1 Étape 1 : analyse préliminaire des résultats du modèle par rapport aux mesures

###### 4.4.2.1.1 Description préliminaire des données mesurées

Pendant la période retenue, la température extérieure est en moyenne de 3,3°C et l'humidité relative moyenne de 84%. Le Tableau 4.13 dresse une synthèse des conditions météorologiques de cette période, complété par les Fig. 4.15 et Fig. 4.16.

Tableau 4.13 : Synthèse des données météorologiques du 12 au 28 février 2013

	Température extérieure (°C)	Humidité relative extérieure (%)	Rayonnement global horizontal (W/m <sup>2</sup> )	Vitesse de vent (km/h)
Moyenne	3,3	84	74,9	5,7
Maximum	13,1	98	481	15,6
Minimum	-2,1	53	0	0

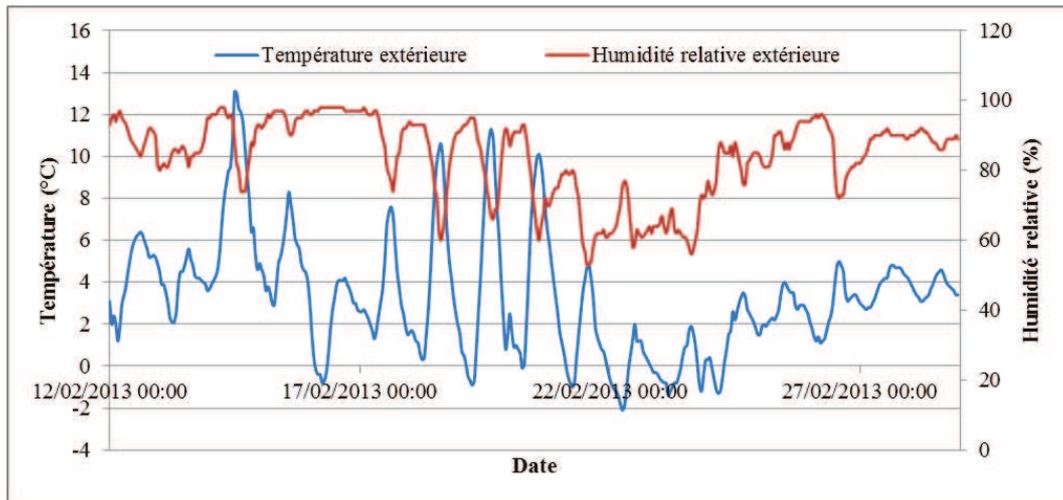


Fig. 4.15 : Température et humidité relative extérieures mesurées sur le site d'Angers (France, 49)

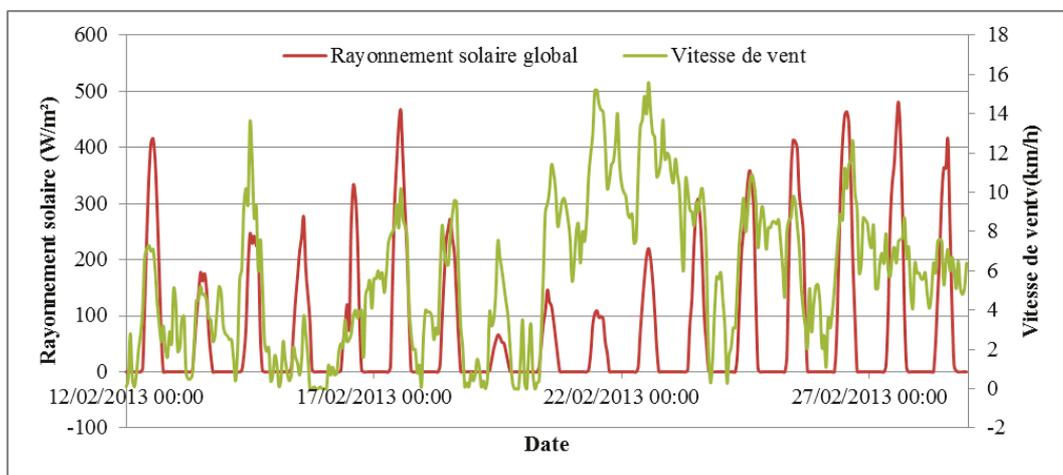


Fig. 4.16 : Rayonnement solaire global horizontal et vitesse de vent mesurés sur le site d'Angers (France, 49)

La température intérieure varie de 14,2°C à 24,2°C avec une moyenne de 18,8°C sur la période de mesure (Fig. 4.17). L'humidité relative intérieure moyenne est de 56% avec une amplitude de variation de 30%.

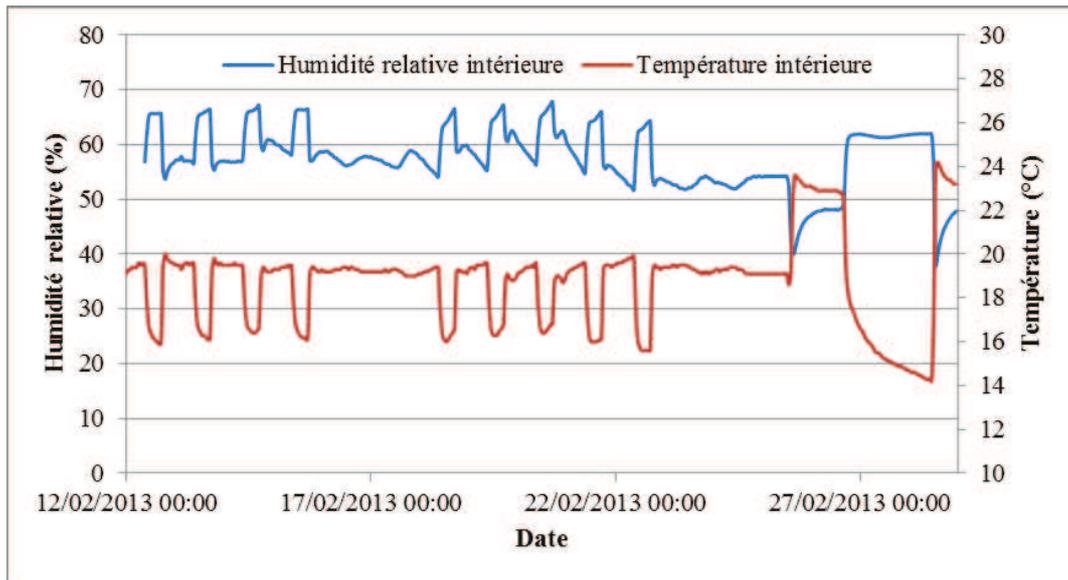


Fig. 4.17 : Température et humidité relative intérieures mesurées dans la cellule expérimentale

Le scénario de chauffage de la cellule est observable sur la Fig. 4.17 : absence durant la journée en semaine et occupation permanente le week-end. La consommation énergétique totale sur la période considérée est 136 kWh.

A partir du 26 février, une phase de test sur la cellule a été mise en place. Le chauffage est forcé à sa puissance maximum pendant une journée, puis il est arrêté pendant plusieurs jours pour étudier la réponse de la cellule en température.

#### 4.4.2.1.2 Analyse préliminaire des résultats du modèle

Une première simulation est étudiée avec les valeurs des paramètres présentées au paragraphe 4.4.1.2. Les deux indicateurs NMBE et CVRMSE sont calculés pour l'humidité spécifique ambiante et la puissance de chauffage (Tableau 4.14).

Tableau 4.14 : Indicateurs de comparaison modèle/mesures pour la simulation initiale

Grandeur	Indicateur	
Humidité spécifique	NMBE	34%
	CVRMSE	35%
Puissance de chauffage	NMBE	-87%
	CVRMSE	117%

Les résultats obtenus par le modèle présentent d'importantes différences avec les mesures (Tableau 4.14).

Le modèle surestime la consommation de chauffage sur l'ensemble de la période (Fig. 4.18) : la consommation mesurée est 136 kWh alors que celle calculée est 254 kWh. Toutefois, la tendance est respectée : les maximums de puissance sont atteints aux mêmes instants dans le modèle et les mesures.

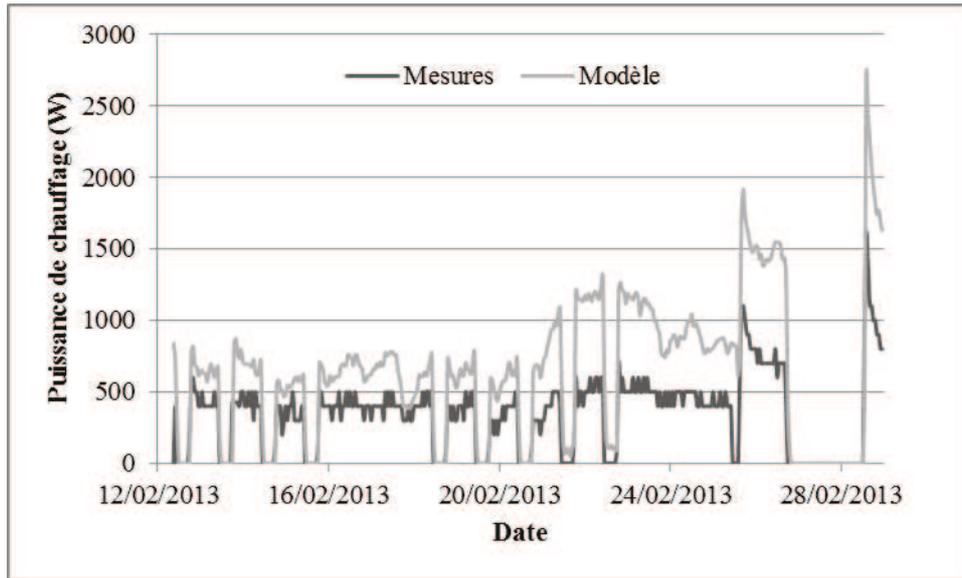


Fig. 4.18 : Évolution de la puissance de chauffage calculée par le modèle et mesurée dans la cellule

La moyenne de l'humidité spécifique calculée par le modèle est plus faible que celle mesurée : 0,0062 kg/kg<sub>airsec</sub> pour le modèle contre 0,0094 kg/kg<sub>airsec</sub> pour les mesures. L'amplitude calculée présente aussi des différences avec celle mesurée : 0,0046 contre 0,0031 kg/kg<sub>airsec</sub> mesurée. La tendance simulée semble cependant cohérente avec celle mesurée malgré un déphasage de trois heures entre l'atteinte des maximums (Fig. 4.19).

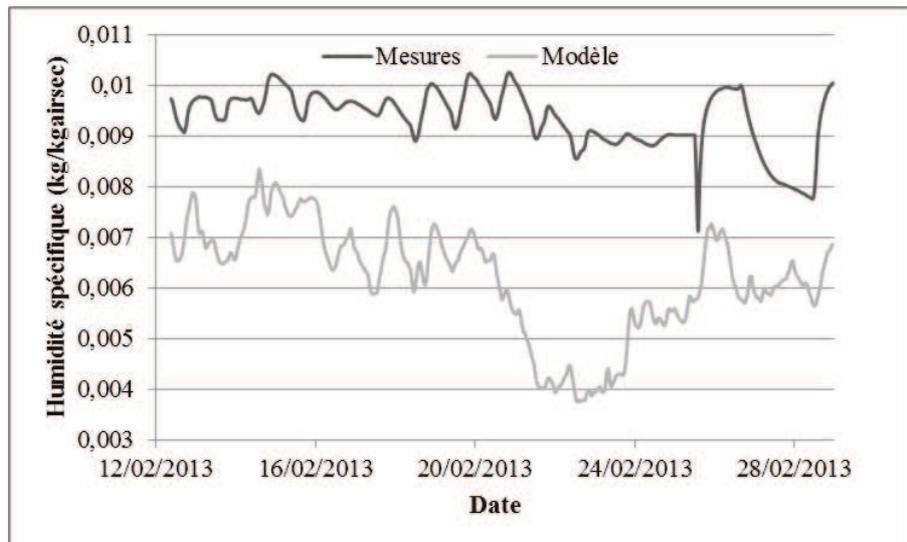


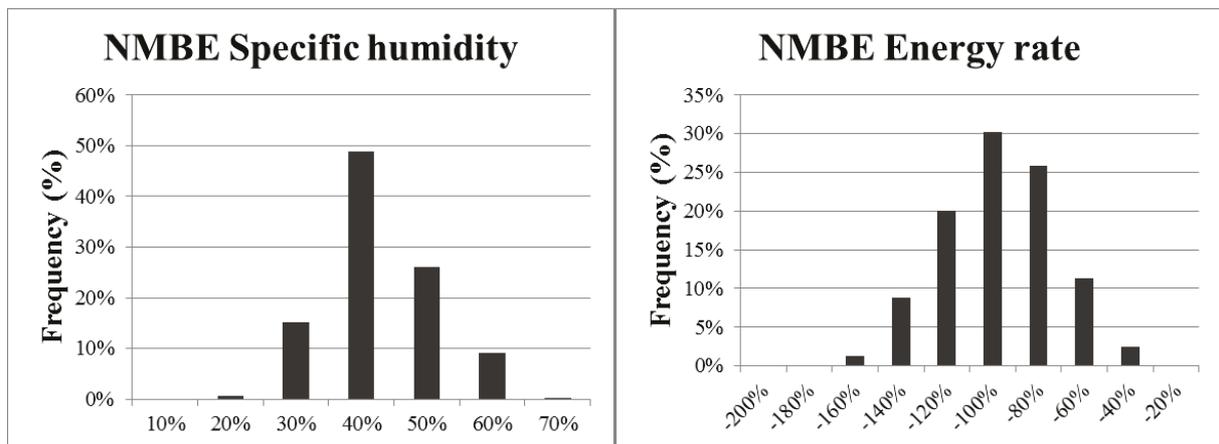
Fig. 4.19 : Évolution de l'humidité spécifique ambiante calculée par le modèle et mesurée dans la cellule

4.4.2.2 Itération 0 : étapes 2, 3 et 4

Le Tableau 4.15 synthétise les résultats obtenus sur les 3000 simulations de l’itération 0.

**Tableau 4.15 : Synthèse des indicateurs de comparaison modèle/mesure pour l'itération 0**

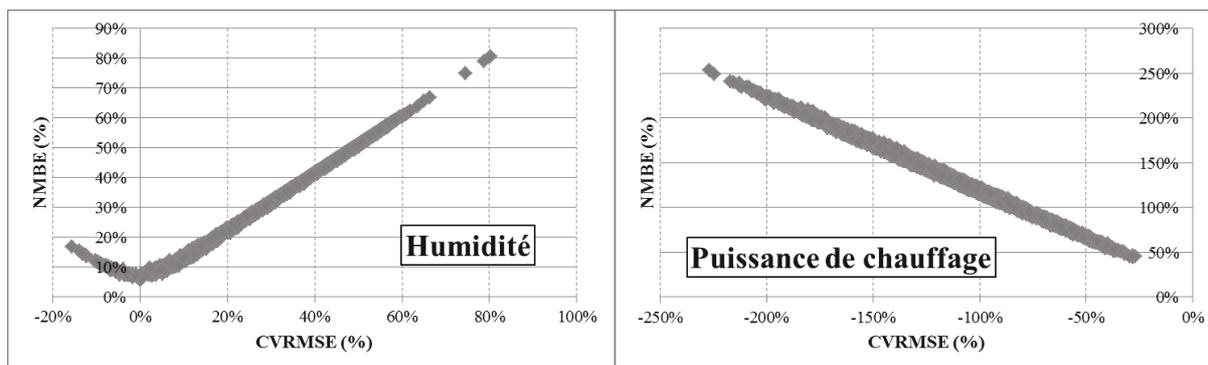
	NMBE pour HS	CVRMSE pour HS	NMBE pour puissance de chauffage	CVRMSE pour puissance de chauffage
Moyenne	38%	39%	-107%	126%
Maximum	62%	63%	-38%	209%
Minimum	12%	15%	-185%	55%
Écart-type	8%	8%	25%	25%



**Fig. 4.20 : Distribution de l'erreur moyenne normalisée. Gauche : humidité spécifique - Droite : Puissance de chauffage**

La distribution de l’indicateur NMBE pour l’humidité (Fig. 4.20) sur les 3000 simulations est centrée sur 40%. Quant à celle de la puissance de chauffage, elle est centrée sur -100%. La puissance de chauffage est la grandeur qui présente la plus mauvaise estimation par le modèle avec une moyenne de l’indicateur NMBE égale à 126% (Tableau 4.15). La modélisation de l’humidité donne de meilleurs résultats avec des minimums pour NMBE et CVRMSE respectivement de 12% et 15%.

Nous observons que les indicateurs NMBE et CVRMSE pour la puissance de chauffage et pour l’humidité sont corrélés l’un à l’autre (Fig. 4.21). La relation obtenue est linéaire avec des coefficients de corrélation élevés :  $R^2=0,9995$  pour l’humidité et  $R^2=0,995$  pour la puissance de chauffage. Ces corrélations signifient que la dynamique d’évolution calculée par le modèle est proche de celle mesurée mais que les grandeurs moyennes sont mal évaluées. Dans la suite de cette étude, nous nous concentrons sur les indicateurs NMBE pour l’humidité spécifique et la puissance de chauffage.



**Fig. 4.21 : Corrélation entre les indicateurs CVRMSE et NMBE. Droite : humidité spécifique - Gauche : puissance de chauffage**

#### 4.4.2.2.1 Relations entre les erreurs sur l'humidité et les valeurs des paramètres

Cinq paramètres présentent une relation de type 1 ou 2 avec l'erreur moyenne en humidité (Tableau 4.16).

**Tableau 4.16 : Caractérisation des relations entre l'erreur du modèle en humidité et les valeurs des paramètres**

Type de relation	Paramètre	Indicateurs de relation	
Type 1	Facteur de résistance à la diffusion du tuffeau	$E_{\min} = 15 \%$ $E_{\max} = 28\%$ $A_{\text{err}} = 30\%$	$P_{\min} = 21$ $P_{\max} = 39$
Type 1	Conductivité thermique du tuffeau	$E_{\min} = 18 \%$ $E_{\max} = 25\%$ $A_{\text{err}} = 30\%$	$P_{\min} = -50\%$ $P_{\max} = +50\%$
Type 1	Surface équivalente de fuite	$E_{\min} = 17 \%$ $E_{\max} = 35\%$ $A_{\text{err}} = 30\%$	$P_{\min} = -50\%$ $P_{\max} = +50\%$
Type 2	Teneur en eau initiale du tuffeau	$E_{\text{selec}} = 20\%$ $E_{\min} = 18\%$	$P = 0,1 \text{ kg/kg}$
Type 2	Coefficient de vapeur intérieur du mur Sud	$E_{\text{selec}} = 20\%$ $E_{\min} = 20\%$	$P = 4,2 \cdot 10^{-9}$

Nous étudions la simulation qui fournit les résultats les plus proches de la réalité du point de vue de l'humidité sur cette itération. Les valeurs des paramètres permettant d'obtenir ces résultats sont données dans le Tableau 4.17.

Tableau 4.17 : Valeur des paramètres de la simulation la plus cohérente en humidité - itération 0

Paramètre	Écart par rapport à la simulation initiale
P1	-2%
P2	-48%
P3	-24%
P4	-29%
P5	-29%
P6	4%
P7	4%
P8	6%
P9	-12%
P10	-6%
P11	20%
P12	-16%
P13	-25%
P14	-18%
P15	-46%
P16	-82%
P17	-78%

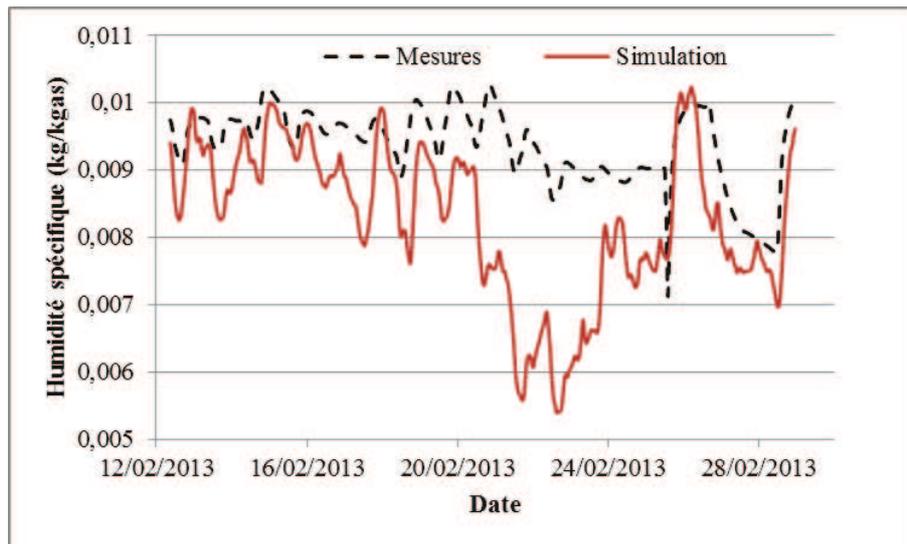


Fig. 4.22 : Évolution de l'humidité spécifique mesurée et simulée - itération 0

Les résultats obtenus montrent une mauvaise corrélation avec les mesures (Fig. 4.22). L'amplitude de l'humidité spécifique calculée par le modèle est plus importante que celle mesurée (amplitude mesurée = 0,003 kg/kg<sub>airsec</sub> et amplitude calculée = 0,005 kg/kg<sub>airsec</sub>). Toutefois, la tendance sur les premiers et derniers jours de simulation apparaît cohérente : les maximums et minimums sont atteints aux mêmes instants sur la simulation et sur les mesures (Fig. 4.22).

L'analyse de sensibilité de l'humidité ambiante d'un bâtiment en tuffeau (paragraphe 4.3) a mis en évidence que le taux de renouvellement d'air est le facteur le plus influent sur l'humidité intérieure. Nous traçons les écarts en humidité entre les mesures et le modèle en fonction du taux de renouvellement d'air calculé par le modèle pour chaque pas de temps horaire (Fig. 4.23).

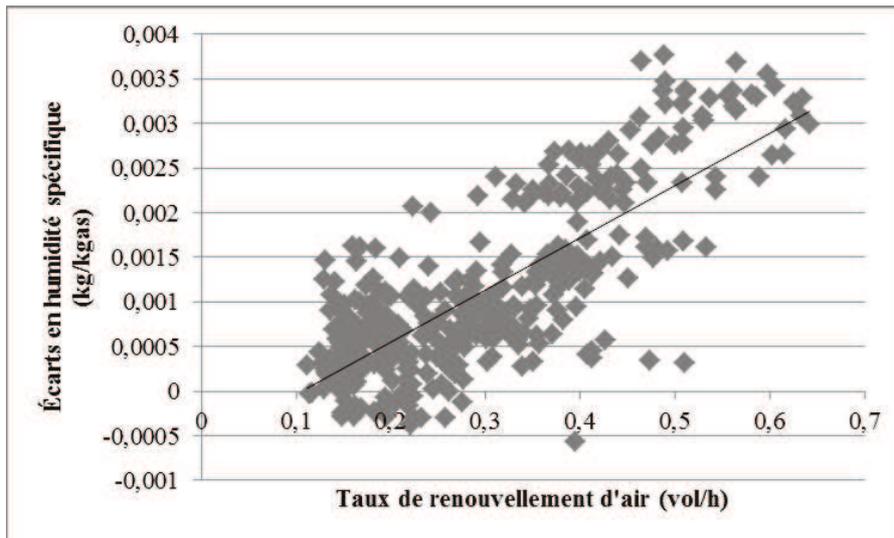


Fig. 4.23 : Corrélation entre les écarts en humidité et le taux de renouvellement d'air de la cellule

Comme le souligne la Fig. 4.23, plus le renouvellement d'air est élevé, plus les écarts entre les mesures et le modèle sont élevés.

#### 4.4.2.2.2 Relations entre les erreurs sur la puissance de chauffage et les valeurs des paramètres

Seules des relations de Type 1 sont observées sur la puissance de chauffage (Tableau 4.18).

Tableau 4.18 : Caractérisation des relations entre l'erreur du modèle en puissance de chauffage et les valeurs des paramètres

Type de relation	Paramètre	Indicateurs de relation	
Type 1	Teneur en eau initiale du tuffeau	$E_{\min} = -40\%$ $E_{\max} = -80\%$ $A_{\text{err}} = 80\%$	$P_{\min} = 0 \text{ kg/kg}$ $P_{\max} = 0,24 \text{ kg/kg}$
Type 1	Conductivité thermique du tuffeau	$E_{\min} = -40\%$ $E_{\max} = -70\%$ $A_{\text{err}} = 120\%$	$P_{\min} = -50\%$ $P_{\max} = +50\%$
Type 1	Coefficient de convection du plancher	$E_{\min} = -40\%$ $E_{\max} = -70\%$ $A_{\text{err}} = 120\%$	$P_{\min} = -20\%$ $P_{\max} = +20\%$
Type 1	Surface équivalente de fuite	$E_{\min} = -42\%$ $E_{\max} = -100\%$ $A_{\text{err}} = 75\%$	$P_{\min} = -50\%$ $P_{\max} = +50\%$

#### 4.4.2.2.3 Révision des plages de variation des paramètres en vue de l'itération 1

D'après les observations menées sur les paramètres influant l'erreur en humidité, il apparaît que les plages de variation des paramètres doivent évoluer pour réduire cette erreur. Il serait nécessaire de :

- Réduire la limite basse de la plage de variation de la résistance à la diffusion du tuffeau. D'après la relation obtenue, le coefficient ne doit pas dépasser 4 si nous voulons obtenir une erreur nulle ;

- Réduire la limite basse de la plage de variation de la conductivité thermique du tuffeau. Une erreur nulle ne peut être atteinte en modifiant uniquement ce paramètre car la relation préconise une valeur négative ;
- Réduire le seuil inférieur de la surface équivalente de fuite. Une erreur nulle pourrait être atteinte pour une valeur négative, ce paramètre doit donc tendre vers 0 cm<sup>2</sup> ;
- Restreindre la plage de variation de la teneur en eau initiale du tuffeau à 0,1 jusqu'à 0,24 kg/kg car en-dessous de 0,1 kg/kg, l'erreur moyenne dépasse les 20%.

En terme de puissance de chauffage, l'ensemble des relations établies entre l'erreur moyenne et la valeur des paramètres met en évidence que les limites inférieures des plages de variation des paramètres du Tableau 4.18 ne sont pas assez basses pour obtenir une erreur acceptable sur le modèle.

Ainsi, trois paramètres affectent de manière directe les deux sorties considérées : la teneur en eau initiale du tuffeau, sa conductivité thermique et la surface équivalente de fuite.

Les relations sont contradictoires vis-à-vis de la teneur en eau initiale du tuffeau : pour réduire l'erreur en humidité, elle doit être comprise entre 0,1 et 0,24 kg/kg alors que pour minimiser celle de la puissance de chauffage, elle doit être proche de 0.

Pour la conductivité thermique et la surface équivalente de fuite, la minimisation des erreurs en humidité et en puissance de chauffage nécessite la réduction du seuil minimum de leur plage d'incertitude.

La révision des plages de variation des paramètres que nous appliquons en vue de l'itération 1 est la suivante :

- Teneur en eau initiale du tuffeau : 0,004 à 0,24 kg/kg (itération 0 : 0 à 0,24 kg/kg) ;
- Conductivité thermique du tuffeau : -70% à +30% (itération 0 : -50% à +50%) ;
- Surface équivalente de fuite : 1 à 90 cm<sup>2</sup> (itération 0 : 45 à 135 cm<sup>2</sup>).

#### 4.4.2.3 Itération 1 : étapes 2, 3 et 4

Le Tableau 4.19 synthétise les résultats obtenus pour l'itération 1.

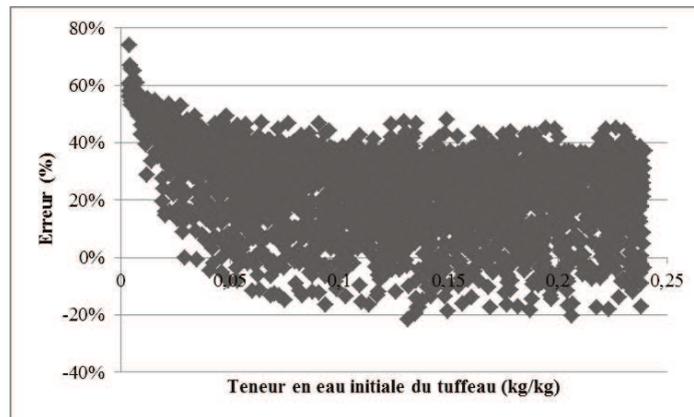
**Tableau 4.19 : Synthèse des indicateurs de comparaison modèle/mesures pour l'itération 1**

	NMBE pour HS	CVRMSE pour HS	NMBE pour puissance de chauffage	CVRMSE pour puissance de chauffage
Moyenne	25%	28%	-74%	92%
Maximum	74%	74%	-9%	173%
Minimum	-22%	6%	-152%	29%
Écart-type	12%	12%	24%	24%

Les erreurs moyennes sur ce nouveau groupe présentent une amélioration par rapport à l'itération précédente (Tableau 4.15 et Tableau 4.19). Par ailleurs, les minimums d'erreur sont nettement meilleurs : l'erreur en humidité est nulle sur certaines simulations et descend en dessous du seuil des 10% en valeur absolue pour la puissance de chauffage.

4.4.2.3.1 *Relation entre l'erreur sur l'humidité et les valeurs des paramètres*

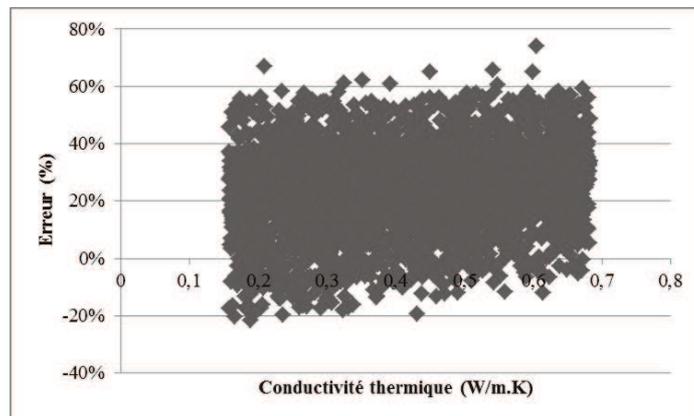
L'analyse se focalise sur les trois paramètres dont les plages d'erreur ont été modifiées.



**Fig. 4.24 : Relation entre l'erreur en humidité et les valeurs de la teneur en eau initiale du tuffeau - itération 1**

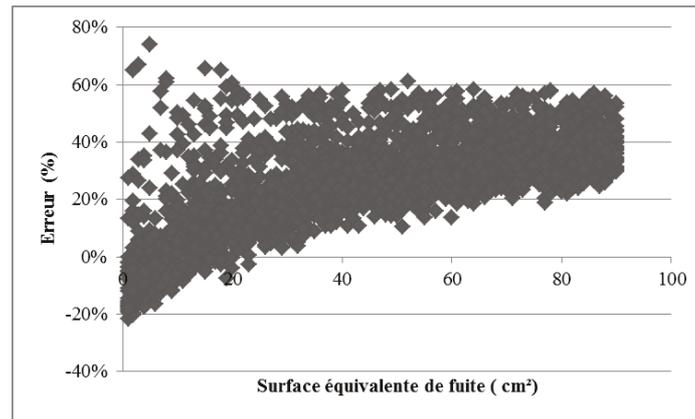
La Fig. 4.24 met en évidence que l'erreur en humidité peut être nulle pour la plage de valeur allant de 0,025 à 0,24 kg/kg.

Une faible relation de Type 1 est observée à présent pour la conductivité thermique (Fig. 4.25). L'ensemble de la plage permet d'obtenir une erreur nulle, toutefois, lorsque la conductivité thermique augmente, l'erreur maximum s'élève aussi.



**Fig. 4.25 : Relation entre l'erreur en humidité et les valeurs de la conductivité thermique du tuffeau - itération 1**

La surface équivalente de fuite conserve un effet sur l'erreur en humidité. D'après la Fig. 4.26, l'indicateur NMBE pour l'humidité peut atteindre une valeur nulle pour la plage allant de 1 à 20 cm<sup>2</sup>. Toutefois, pour ces valeurs de surfaces de fuite, l'erreur varie de manière significative : -20 à +70%. Il y a donc des effets combinés avec d'autres paramètres.

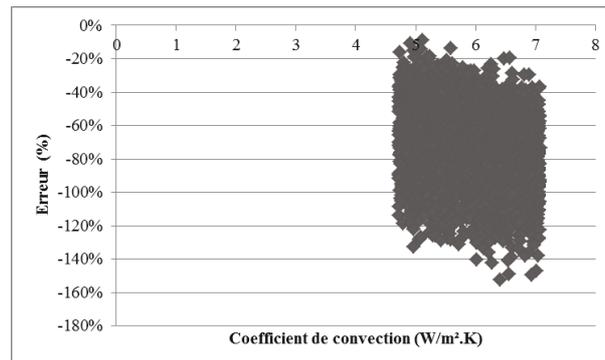


**Fig. 4.26 : Relation entre l'erreur en humidité et les valeurs de la surface équivalente de fuite - itération 1**

Il s'agit des trois seuls paramètres qui affectent directement l'erreur du modèle sur l'humidité ambiante.

#### 4.4.2.3.2 Relation entre les erreurs sur la puissance de chauffage et les valeurs des paramètres

Les paramètres conservent les mêmes relations que pour le premier jeu de simulation. Toutefois, un paramètre s'ajoute : le coefficient de convection intérieur du mur sud présente une relation de Type 1 (Fig. 4.27).



**Fig. 4.27 : Relation entre l'erreur sur la puissance de chauffage et les valeurs du coefficient de convection intérieur du mur sud - itération 1**

Le coefficient de convection du plancher présente une relation similaire.

#### 4.4.2.3.3 Révision des plages de variation des paramètres en vue de l'itération 2

Pour approcher une erreur nulle sur la puissance de chauffage, il est nécessaire de réduire la limite basse du coefficient de convection intérieur du mur sud et celle du coefficient de convection du plancher. Il s'agit des deux surfaces les plus froides de la cellule expérimentale : des échanges importants avec l'air ambiant par convection augmentent donc les besoins de chauffage.

Avec les résultats de cette itération, nous définissons les nouvelles plages de variation de la surface équivalente de fuite et des coefficients de convection du plancher et du mur sud côté intérieur :

- La plage de variation de la surface équivalente de fuite est restreinte à 1 à 20 cm<sup>2</sup>. Il s'agit de la plage commune aux deux grandeurs qui permet de minimiser l'erreur ;

- Les plages de variation des coefficients de convection du plancher et du mur sud intérieur sont élargies à  $\pm 40\%$ .

#### 4.4.2.4 Itération 2 : étapes 2, 3 et 5

Les erreurs apparaissent nettement plus faibles avec ces nouvelles plages de variation (Tableau 4.20). En effet, l'erreur moyenne en humidité atteint une valeur nulle et celle pour la puissance de chauffage s'en approche. Les valeurs obtenues pour le premier jeu de simulation (paragraphe 3.3.1 et 3.3.2) sont données en rouge dans le Tableau 4.20.

Avec les plages de variation de cette itération, le seuil de 5% pour l'erreur moyenne normalisée pour la puissance de chauffage et pour l'humidité est atteint.

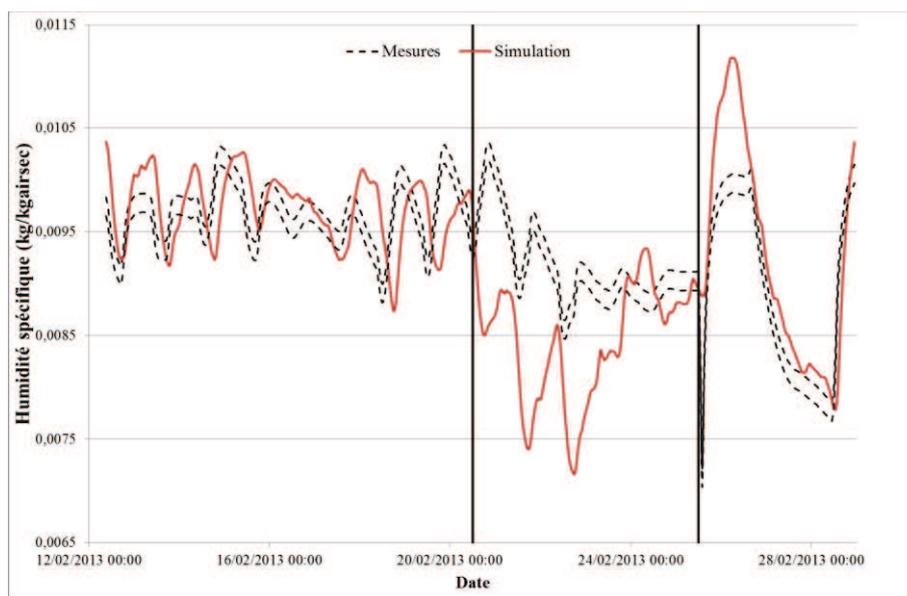
**Tableau 4.20 : Synthèse des indicateurs de comparaison modèle/mesure pour l'itération 2**

	NMBE pour HS	CVRMSE pour HS	NMBE pour puissance de chauffage	CVRMSE pour puissance de chauffage
Moyenne	7% (38)	15% (39)	-54% (-107)	71% (126)
Maximum	68% (62)	69% (63)	6% (-38)	146% (209)
Minimum	-23% (12)	6% (15)	-125% (-185)	26% (55)
Écart-type	15% (8)	10% (8)	21% (25)	22% (25)

Grâce à ces résultats, nous parvenons à l'étape 5 de notre processus de vérification du modèle. Nous étudions donc la simulation qui permet d'obtenir les résultats les plus proches des mesures. Nous nommons cette simulation « simulation finale » dans la suite du chapitre. Les erreurs de la simulation finale sont données dans le Tableau 4.21.

**Tableau 4.21 : Erreurs du modèle par rapport aux mesures sur la simulation finale**

Humidité spécifique		Puissance de chauffage	
NMBE (%)	CVRMSE (%)	NMBE (%)	CVRMSE (%)
1	7	-3	26



**Fig. 4.28 : Évolution de l'humidité spécifique ambiante mesurée et calculée sur la simulation finale**

L'évolution de l'humidité simulée par le modèle est globalement cohérente avec celle mesurée (Fig. 4.28). Toutefois, un déphasage de trois heures est observé entre les maximums mesurés et calculés.

Trois périodes peuvent être distinguées suivant les différences entre mesure et modèle :

1. Du 12/02/13 au 20/02/13 12h00 : pendant cette période, la moyenne calculée par le modèle est proche de celle mesurée. Les tendances sont similaires malgré le déphasage de trois heures ;
2. Du 20/02/13 12h00 au 25/02/13 12h00 : la moyenne calculée par le modèle est sous-estimée (0,0085 kg/kg<sub>airsec</sub> simulée contre 0,0092 kg/kg<sub>airsec</sub> mesurée). L'amplitude calculée est aussi plus importante : 0,0025 pour 0,0017 kg/kg<sub>airsec</sub> mesurée ;
3. Du 25/02/13 12h00 au 28/02/13 : l'évolution est respectée, les baisses et augmentations d'humidité se déroulent aux mêmes instants. La hausse calculée atteint toutefois un maximum supérieur à celui mesuré (0,0111 contre 0,0103 kg/kg<sub>airsec</sub>)

Cependant, sur l'ensemble de la période de mesure, le modèle produit des résultats hors des plages d'incertitude de mesures.

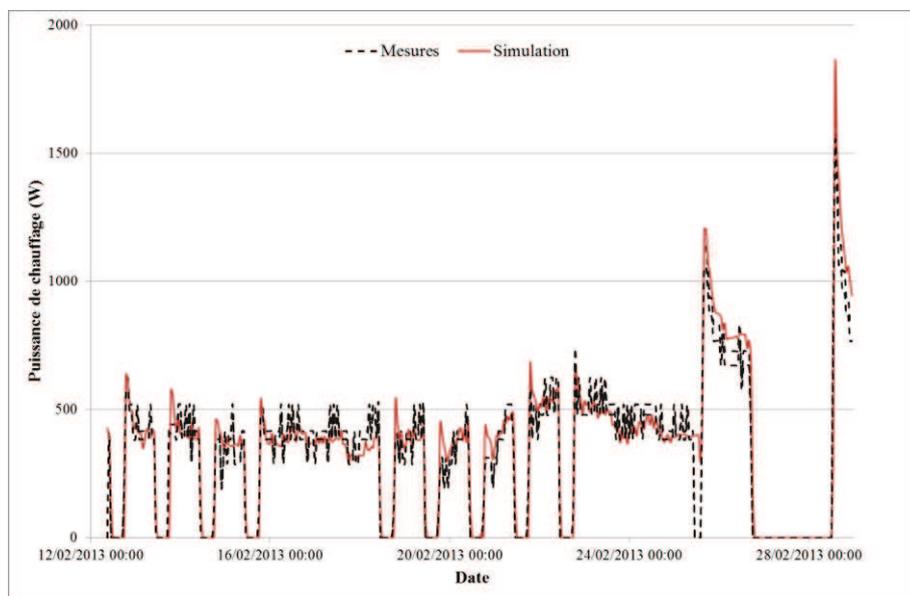


Fig. 4.29 : Évolution de la puissance de chauffage mesurée et calculée sur la simulation finale

Malgré des indicateurs NMBE et CVRMSE plus élevés que pour l'humidité, la puissance de chauffage simulée est proche des données expérimentales (Fig. 4.29). Les différences les plus importantes sont observées sur les trois derniers jours, au moment où le scénario de chauffage a été modifié. Cependant, les maximums sont atteints aux mêmes instants comme les périodes de puissance nulle. Les besoins de chauffage sur l'ensemble de la période sont équivalents : 136 kWh mesurés et 139 kWh calculés.

Le modèle produit une puissance de chauffage comprise globalement dans la plage d'incertitude de la mesure.

Les valeurs des paramètres qui ont permis d'obtenir la simulation finale sont comparées à la valeur initiale et à la plage d'incertitude initiale imposée (Fig. 4.30). Sur la Fig. 4.30, les séries minimum et maximum correspondent aux seuils de la plage d'incertitude des paramètres fixée à l'itération 0 (paragraphe 4.4.1.3).

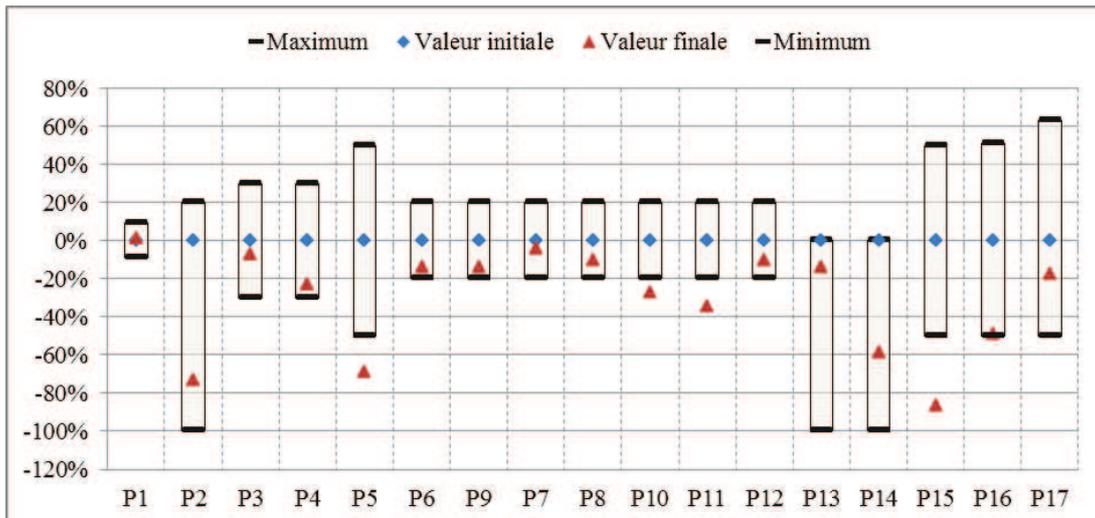


Fig. 4.30 : Position des valeurs finales des paramètres par rapport à la valeur et à la plage d'incertitude initiale

La Fig. 4.30 permet d'identifier deux catégories de paramètres :

1. Ceux dont la valeur pour la simulation finale est comprise dans la plage d'incertitude initiale : P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8, P9, P12, P13, P14, P16 et P17. Parmi ceux-ci, P2, P4, P6 et P16 ont une valeur finale très proche de la limite inférieure de cette plage d'incertitude ;
2. Ceux dont la valeur finale est hors de la plage d'incertitude initiale : P5, P10, P11 et P15. Ces paramètres ont tous une valeur inférieure à la valeur minimum de la plage d'incertitude :
  - Pour la conductivité thermique (P5), la valeur finale est très faible : 0,16 W/m.K pour une pierre sèche. Sa valeur initiale est de 0,41 W/m.K.
  - Pour les coefficients de convection du plancher et du mur sud intérieur (P10 et P11), les valeurs restent proches de la limite inférieure d'incertitude. Ces valeurs sont admissibles puisqu'il n'y a que très peu de mouvement d'air dans la pièce en l'absence de ventilation.
  - La surface équivalente de fuite (P15) est nettement inférieure à la plage minimum considérée : 12 cm<sup>2</sup> au lieu de 90 cm<sup>2</sup>. Cependant, comme précisée plus haut, le test de fumée n'a pas permis d'identifier les sorties d'air à l'extérieur. La surface de fuite en contact avec l'extérieur peut donc être plus faible que celle mesurée par le test d'étanchéité.

#### 4.4.2.5 Vérification de la simulation finale en période estivale

Nous nous attachons à vérifier le même modèle sur un mois d'été. Pour cela, la période considérée s'étend du 11 août 2012 00h00 au 30 septembre 2012 23h00. Le chauffage n'était pas en fonctionnement à cette période, l'évolution de la température intérieure est libre.

A la différence de la période hivernale, nous comparons à présent l'humidité spécifique et la température. Nous étendons les indicateurs NMBE et CVRMSE à la température (Equations (4.9) et (4.10)).

La construction de la cellule est identique : les températures de surface de la pièce sont imposées et les conditions météorologiques mesurées sont intégrées au fichier météo d'EnergyPlus.

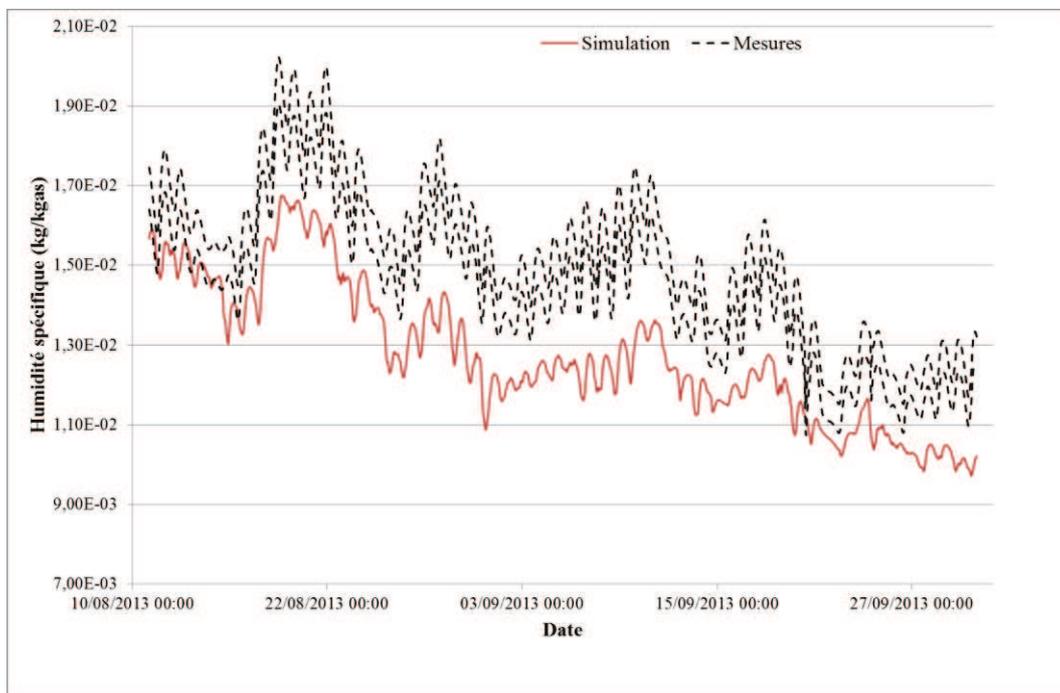
Les résultats obtenus en été montrent une bonne cohérence avec les mesures (Tableau 4.22).

**Tableau 4.22 : Indicateurs d'erreurs sur la simulation finale en période estivale**

Humidité spécifique		Température	
NMBE (%)	CVRMSE (%)	NMBE (%)	CVRMSE (%)
14	15	1	1

En température, les écarts sont très faibles. Par contre en humidité spécifique, même si les erreurs calculées restent basses, elles sont supérieures à celles obtenues en hiver. Pour comprendre ces différences, les tendances du modèle et des mesures sur la période d'été sont analysées (Fig. 4.31).

Les erreurs en température (Tableau 4.22) montrent l'adéquation entre la température calculée par le modèle et celle mesurée. Un faible écart entre les deux températures est observé : 0,4°C en moyenne. Cet écart confirme la surestimation des déperditions thermiques dans le modèle observée en période hivernale. Toutefois, l'écart est proche de l'incertitude de mesure : 0,3 °C.



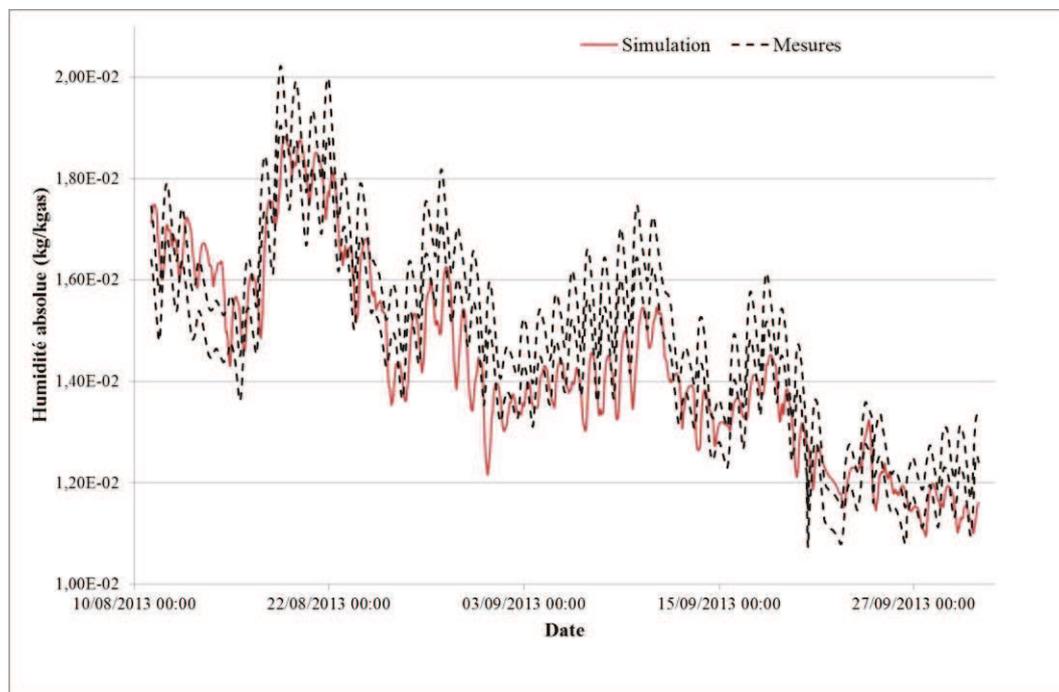
**Fig. 4.31 : Humidité spécifique mesurée et calculée sur la période estivale pour la simulation finale**

La Fig. 4.31 met en évidence que la tendance d'évolution de l'humidité est respectée. Le déphasage de trois heures est aussi présent sur cette simulation.

Toutefois, l'indicateur NMBE pour l'humidité et la Fig. 4.31 soulignent le fait que les principales différences entre le modèle et les mesures sont liées à une moyenne calculée (0,0128 kg/kg<sub>airsec</sub>) faible par rapport à celle mesurée (0,0148 kg/kg<sub>airsec</sub>).

Cet écart peut être lié à la teneur en eau initiale imposée dans la simulation. Elle correspond à la valeur pour la simulation finale de la période hivernale, elle permet donc d'obtenir des résultats cohérents avec les mesures sur l'hiver. Or, les mesures en été ont été réalisées cinq mois (août 2012) avant celle de l'hiver (février 2013). La paroi a pu sécher entre la période estivale et la période hivernale. Les teneurs en eau initiale diffèrent donc entre les deux simulations.

Pour vérifier cette hypothèse, une nouvelle simulation, avec une teneur en eau initiale du tuffeau élevée à 0,1 kg/kg au lieu de 0,05 kg/kg pour simuler le séchage de la paroi entre l'été et l'hiver, est analysée.



**Fig. 4.32 : Humidité spécifique mesurée et calculée sur la période estivale - teneur en eau initiale égale à 0,1 kg/kg**

Avec une teneur en eau plus élevée (Fig. 4.32), la moyenne en humidité spécifique calculée est cohérente avec celle mesurée (NMBE = 3%). L'humidité calculée se situe globalement dans la plage d'incertitude de mesures. La tendance est aussi respectée (CVRMSE = 7%) malgré le déphasage de trois heures.

En température, les résultats obtenus sont toujours très proches des mesures : les indicateurs CVRMSE et NMBE sont égaux à 1%.

#### **4.4.3 Conclusions sur la comparaison d'EnergyPlus aux mesures expérimentales**

La comparaison d'EnergyPlus aux mesures expérimentales et le calage du modèle a permis de vérifier la pertinence du modèle. En hiver, les résultats de la simulation finale sont proches des mesures en puissance de chauffage mais reste toutefois hors des plages d'incertitude de la mesure pour l'humidité spécifique malgré des évolutions cohérentes.

En été, les résultats du modèle sont cohérents avec les mesures une fois que la teneur en eau initiale a été réévaluée pour considérer le séchage de la paroi.

Nous avons ainsi pu constater que le modèle produit un comportement hygrothermique de la cellule expérimentale en tuffeau proche de la réalité. Cependant, certaines limites ont aussi été mises en évidence. Un déphasage de 3 heures a été constaté sur l'évolution de l'humidité. Par ailleurs, certains paramètres ont fait preuve d'une influence significative sur les erreurs du modèle (surface équivalente de fuite, conductivité thermique du tuffeau, teneur en eau initiale du tuffeau, coefficients de convection). Il s'agit donc des paramètres dont la maîtrise et la connaissance est un point critique de la modélisation des bâtiments en tuffeau.

## 4.5 Les points de vigilance sur la modélisation des bâtiments en tuffeau

La modélisation de la cellule expérimentale a montré que le modèle sélectionné est cohérent avec le comportement réel des bâtiments en tuffeau. Toutefois, certains points clés de la modélisation de ce type de bâtiment ont été identifiés et doivent être maîtrisés pour produire des résultats cohérents. Enfin, certaines limites d'EnergyPlus sont signalées.

### 4.5.1 L'incertitude des données d'entrée

#### 4.5.1.1 Caractéristiques des matériaux

L'analyse de sensibilité menée sur l'humidité ambiante et la comparaison du modèle aux mesures a mis en évidence que la connaissance des propriétés des matériaux avait une importance significative sur les résultats du modèle. Trois propriétés sont identifiées pour produire des résultats fiables : l'évolution de la conductivité thermique avec la teneur en eau, la résistance à la diffusion et la teneur en eau initiale.

Cependant, il ne s'agit pas des propriétés mesurées couramment, d'autant plus sur les matériaux anciens qui présentent une variation significative au sein d'un même bâtiment. Au niveau du tuffeau, la difficulté est accrue car il présente une importante diversité de caractéristiques suivant les lieux d'extraction.

Les incertitudes initiales sur ces données se propagent alors aux sorties du modèles qui nous intéressent, à savoir la température et l'humidité ambiantes intérieures, la teneur en eau dans les parois et les besoins de chauffage.

Il est important de noter que la connaissance de la teneur en eau initiale du tuffeau a une importance variable suivant l'objectif de la modélisation. Dans un but de calage du modèle par rapport aux mesures, il s'agit d'une valeur significative comme nous l'avons vu sur la cellule expérimentale. Cependant, dans un objectif de modélisation de bâtiment ancien en vue de sa réhabilitation, la valeur peut avoir une importance moindre car les parois sont alors en équilibre hygrothermique avec son environnement. Une simulation sur du long terme permet d'obtenir une teneur en eau stable dans le tuffeau qui correspondra à l'équilibre.

#### 4.5.1.2 Le renouvellement d'air

L'évaluation du renouvellement d'air dans le modèle est un paramètre clé de la modélisation des bâtiments en tuffeau que ce soit dans un objectif de calage ou de détermination des indicateurs. Les différentes analyses de sensibilité menées sur les données d'entrée de nos critères de décision qu'elles soient l'œuvre d'autres auteurs ou que nous ayons produites ont mis en évidence qu'il s'agit du paramètre le plus influent sur les besoins de chauffage et l'humidité spécifique intérieure.

De la même manière, nous avons observé sur la cellule expérimentale que les différences entre modèle et mesures peuvent être liées à :

- La mesure de perméabilité qui détermine la surface équivalente de fuite du local ;
- Le modèle d'infiltration.

Il n'a pas été possible sur cette cellule expérimentale de déterminer quelle était la source de l'erreur parmi les deux précédentes. Toutefois, l'incertitude de cette donnée doit être considérée car les écarts sur les sorties peuvent être significatifs.

### **4.5.2 Les limites du modèle pour la simulation des bâtiments en tuffeau**

Nous avons vu au chapitre 1 qu'une problématique dans la réhabilitation des bâtiments en tuffeau est la considération des remontées capillaires. Elles peuvent modifier l'efficacité des solutions de réhabilitation mises en place.

La modélisation de cette particularité n'est pas intégrée à EnergyPlus. Aucune prise en compte de source d'humidité n'est prévue. L'effet des remontées capillaires sur les stratégies de réhabilitation devra donc être appréhendé de manière différente.

Par ailleurs, bien que les précipitations soient intégrées au fichier météo d'EnergyPlus, elles ne sont pas utilisées dans le calcul.

## **4.6 Conclusions**

Le modèle que nous avons retenu présente des limites dans la modélisation des bâtiments en tuffeau mais a montré qu'il peut traduire de manière réaliste le comportement hygrothermique de ces bâtiments.

Toutefois, la modélisation de ces logements nécessite, pour être fiable, une connaissance approfondie de la constitution des éléments et des caractéristiques des matériaux qui les composent. La maîtrise de la surface équivalente de fuite est aussi un préalable important à toute modélisation de bâtiment en tuffeau. Dans la mesure du possible, un test d'étanchéité à l'air doit être réalisé sur le bâtiment, complété par un test de fumée pour identifier les points problématiques du bâtiment.

Au vue des incertitudes sur la connaissance des caractéristiques des matériaux et sur le renouvellement d'air dans les bâtiments en tuffeau, les critères de décision des stratégies que nous avons définis présenteront aussi une incertitude.

Il est nécessaire de considérer cette incertitude dans le choix d'une stratégie pour pouvoir répondre à la question : que choisir entre une stratégie avec de bonnes évaluations mais qui sont très incertaines et une stratégie avec des évaluations moins bonnes mais plus fiables ?

## **Chapitre 5 Les méthodes d'analyse multicritère pour l'identification de stratégies de réhabilitation efficaces**

Ce chapitre 5 qui s'intègre au sein de la partie 3 est consacré à l'identification de la méthode d'analyse multicritère qui doit aider à la sélection des stratégies de réhabilitation efficaces.

Plusieurs points de la réhabilitation des bâtiments en tuffeau ont été identifiés dans l'ensemble des chapitres précédents. Ils doivent être pris en compte dans le choix de la méthode pour qu'elle soit le plus adaptée à nos besoins.

Pour cela, le chapitre s'organise d'abord par un aperçu des spécificités de plusieurs méthodes existantes et reconnues. Ensuite, vis-à-vis des particularités de la problématique de décision, nous explicitons le choix de la méthode retenue. Enfin, les différentes étapes de la méthode nécessaires à l'identification de la ou des stratégies de réhabilitation sont décrites.

## 5.1 État de l'art des méthodes d'analyse multicritère

Les méthodes d'analyse multicritères se différencient les unes des autres sur plusieurs aspects : la problématique de décision ou l'objectif visé qu'elles considèrent et le modèle de préférence qu'elles utilisent. Ces deux aspects sont détaillés dans les paragraphes qui suivent.

### 5.1.1 Définitions préalables

La présentation et la compréhension des méthodes d'analyse multicritère nécessitent quelques définitions préalables [Maystre, 1994].

- Acteur (d'un processus de décision) : Individu ou groupe d'individus influençant directement ou indirectement la décision.
- Action : Politique, programme, projet ou candidat faisant l'objet de l'analyse multicritère.
- Critère : Expression qualitative ou quantitative de points de vue, objectifs, aptitudes ou contraintes relatives au contexte réel permettant de juger des actions potentielles. Afin qu'une telle expression puisse devenir un critère elle doit être utile pour le problème considéré et fiable.  
Un critère est doté d'une structure de préférence : à chaque critère est associée une échelle en valeurs ordinales ou cardinales.
- Décision : Options arrêtées lors du processus de décision.  
Choix final du décideur.
- Évaluation : Détermination de la valeur de la performance d'une action sur un critère, pourvue ou non d'une unité de mesure.

### 5.1.2 Les spécificités des MCDA

#### 5.1.2.1 Les problématiques de décision

Une méthode d'aide à la décision peut viser des objectifs différents. Quatre problématiques de décision sont définies pour caractériser les méthodologies de réponse [Breviglieri, 2005] :

- Problématique de choix : identifier la meilleure alternative ou sélectionner un nombre limité d'alternatives considérées comme les plus pertinentes ;
- Problématique de tri ou de sélection : classer les alternatives selon des groupes homogènes préétablis ;
- Problématique de rangement : construire un classement des différentes alternatives des « meilleures » solutions vers les moins « bonnes » ;
- Problématique de description : identifier les caractéristiques principales des alternatives et les décrire selon différents aspects.

#### 5.1.2.2 La modélisation des préférences

Avant d'apporter une aide à la décision, il est nécessaire d'évaluer le système de valeurs et les préférences des différents acteurs qui interviennent dans le processus. Quatre situations fondamentales sont considérées comme représentatives des réactions potentielles lors de la comparaison de deux actions [Roy, 1993] :

Les méthodes d'analyse multicritère pour l'identification de stratégies de réhabilitation efficaces

- a. Indifférence : il existe des raisons claires et positives qui justifient de l'équivalence entre les deux actions.
- b. Préférence stricte : il existe des raisons claires et positives qui justifient une préférence significative en faveur d'une action identifiée par rapport à l'autre.
- c. Préférence faible : il existe des raisons claires et positives qui infirment une préférence stricte en faveur d'une action mais ces raisons sont insuffisantes pour en déduire une préférence stricte en faveur de l'autre ou une indifférence.
- d. Incomparabilité : il n'y a pas de raisons claires et positives qui justifient une des trois situations précédentes.

Ces quatre situations permettent de définir un modèle de préférence qui va déterminer le processus de décision.

Suivant les méthodes, la totalité des situations précédentes est prise en compte ou certaines sont éliminées. Les MCDA se distinguent donc par la manière dont elles comparent les solutions, étape nommée agrégation des performances dans le domaine de l'aide à la décision. Trois démarches d'agrégation sont différenciées [Roy, 1993], [Maystre, 1994], [Moura, 2008] :

1. Agrégation complète : appelée aussi « approche du critère unique de synthèse évacuant toute incomparabilité », cette méthode uniformise l'ensemble des indicateurs et les intègre dans une fonction d'utilité ce qui s'apparente à leur monétarisation. Des pondérations peuvent leur être appliquées.  
L'avantage de cette méthode est qu'elle fournit un classement clair et rapide de l'ensemble des stratégies. Cependant, son inconvénient est l'intégration sous une seule forme de critère de nature différente. Par ailleurs, cette méthode présente le risque de compenser une très mauvaise évaluation sur un critère par une très bonne sur un autre.
2. Agrégation partielle : cette approche se base sur une comparaison par paire des alternatives. Pour chaque paire, il est vérifié si une action surclasse l'autre selon des règles préétablies (relation de surclassement).  
Soient a et b deux alternatives, a surclasse b est équivalent à « a est au moins aussi bonne que b sur une majorité de critères sans être trop nettement mauvaise sur les autres » [Roy, 1985].  
L'avantage de ces méthodes est qu'elles peuvent considérer l'incomparabilité : si les résultats sur les critères sont trop différents entre les deux alternatives, on considère qu'elles ne sont pas comparables. Elles peuvent éviter aussi le phénomène de compensation évoqué dans la méthode précédente. Toutefois, l'obtention et la lecture des résultats sont plus complexes.
3. Agrégation locale : cette approche s'applique sur les problèmes où l'ensemble des alternatives est très grand. La méthode sélectionne dans un premier temps une solution de départ considérée comme « bonne » puis explore localement l'espace des alternatives autour de cette solution pour déterminer s'il y en a des meilleures. L'exploration complète de l'ensemble des alternatives est obtenue par itération du processus. Toutefois, cette technique est peu adaptée aux problématiques de classement des solutions [Roy, 1985].

### 5.1.3 Sélection de la MCDA

Notre problématique de décision est l'identification de stratégies de réhabilitation efficaces sur le patrimoine en tuffeau. Dans ce cadre, les méthodes de description ne peuvent convenir

car elles servent uniquement à caractériser les alternatives et ne fournissent donc pas d'informations sur la pertinence de l'alternative vis-à-vis du bâtiment. De la même manière, les méthodes de tri ne permettent pas de répondre à nos besoins car elles classent les alternatives suivant leurs caractéristiques sans considérer qu'une classe est plus pertinente qu'une autre.

Parmi les deux problématiques restantes, celle de choix restreint la sélection des alternatives à une seule option. Par conséquent, la méthode de rangement est plus ouverte sur notre problème car elle range les alternatives du meilleur compromis au moins bon. Le décideur peut alors opter pour la solution qui lui convient le mieux parmi les mieux classées.

Parmi ces trois approches, la méthode d'agrégation complète apparaît inadaptée aux besoins de ce travail. En effet, les critères sélectionnés au chapitre 3 sont de natures très différentes et ne pourront être uniformisés sous une échelle unique. Enfin, il apparaît primordiale que les critères ne puissent être compensés sous peine de sélectionner une solution qui dégradera les performances du bâti, qu'elles soient structurelles, thermiques ou sociales.

La méthode d'agrégation locale ne convient pas à la problématique de rangement que nous avons retenue comme précisé ci-dessus.

Nous nous concentrons donc sur les méthodes d'agrégation partielle.

Par conséquent, nous orientons donc notre choix vers une méthode traitant la problématique de rangement et qui utilise une agrégation partielle des performances.

Les plus connues sont les méthodes ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REALité) et PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations). Il existe plusieurs versions de ces méthodes. Elles ne traitent toutefois pas toutes de la problématique de rangement : seules les méthodes ELECTRE II, III et IV et PROMETHEE I et II répondent à ces problèmes. Les premières versions ont été développées dans les années 1960 par Bernard Roy.

Les MCDA ont déjà été utilisées dans le processus de sélection d'une réhabilitation. Ainsi, Rey [Rey, 2004] utilise une MCDA pour identifier parmi trois stratégies de réhabilitation la plus efficace pour trois bâtiments différents. Les critères sont définis sur les trois cibles du développement durable : environnement, société et économie.

Silva et al. [Silva, 2012] ont appliqué dans deux études différentes la méthode ELECTRE III à la question de la réhabilitation des bâtiments. Les critères sélectionnés parmi lesquels nous pouvons trouver l'efficacité énergétique, le confort visuel, la qualité de l'air intérieur, la contribution à l'inertie thermique, etc. sont conflictuels et ne peuvent être tous monétarisés. L'application d'ELECTRE III permet d'identifier sur ces critères les stratégies efficaces.

De la même manière, dans le projet ORME (Office building Rating Methodology for Europe), Roulet et al. [Roulet, 2002] utilisent deux méthodes en parallèle pour évaluer et classer les scénarios de réhabilitation. Dans un premier temps l'évaluation est réalisée grâce à une méthode en composantes principales puis la hiérarchisation des alternatives est menée avec ELECTRE III. L'ensemble de la démarche est testé sur six bâtiments.

L'application de notre problématique au patrimoine en tuffeau conduit à dresser un cahier des charges pour sélectionner la méthode la plus adaptée à nos besoins :

- Prise en compte de l'incertitude de l'évaluation des critères : la modélisation du bâti en tuffeau (Chapitre 4) a souligné l'incertitude des données nécessaires au calcul des indicateurs d'évaluation (température et humidité intérieures, besoins de chauffage, teneur en eau) ;
- Possibilité de pondérer l'importance des critères : le décideur doit pouvoir intégrer ses sensibilités à la décision (environnement/économie/confort/etc.) ;

Les méthodes d'analyse multicritère pour l'identification de stratégies de réhabilitation efficaces

- Prise en compte des situations d'incomparabilité : les stratégies montrant des différences trop importantes sont ainsi identifiées.

Parmi les cinq méthodes traitant la problématique de rangement au sein des versions ELECTRE et PROMETHEE, nous synthétisons les aspects du cahier des charges qu'elles prennent en compte (Tableau 5.1).

**Tableau 5.1 : Synthèse de méthodes de rangement**

	Incertitude des critères	Pondérations des critères	Incomparabilité
ELECTRE II		X	
ELECTRE III	X	X	X
ELECTRE IV	X		X
PROMETHEE I	X	X	
PROMETHEE II	X	X	

D'après le Tableau 5.1, ELECTRE III permet de répondre à l'ensemble des besoins identifiés sur notre problème de décision. Par ailleurs, elle a déjà fait ses preuves sur la question de la réhabilitation des bâtiments dans les études de Roulet et al. [Roulet, 2002], Rey [Rey, 2004] et Silva et al. [Silva, 2012].

## 5.2 Présentation d'ELECTRE III

ELECTRE III a été construite en 1978 par Roy [Roy, 1993]. Les alternatives sont comparées puis classées à partir de leurs évaluations sur un panel réduit de critères. Elle se construit autour de la définition d'un surclassement, l'élaboration de deux classements antagonistes et la mise en place d'un rangement final.

### 5.2.1 Préalables

La modélisation des préférences dans ELECTRE III nécessite la définition des « vrais-critères » et des « pseudos-critères » [Maystre, 1994].

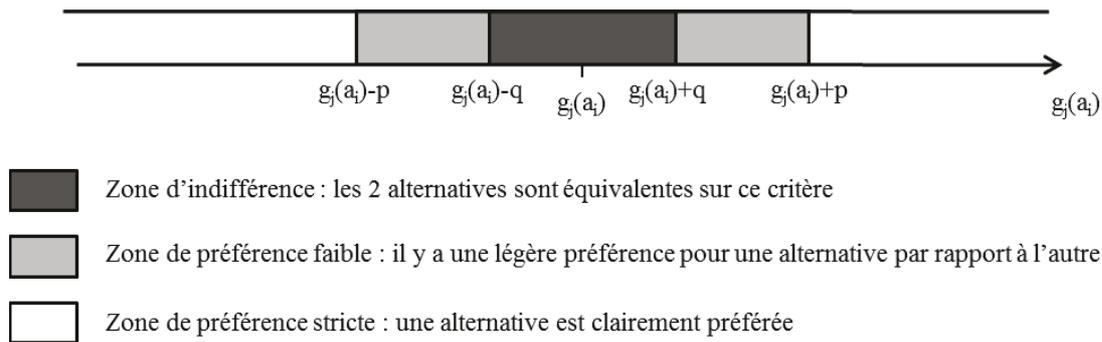
- Les vrais-critères :

La comparaison entre deux alternatives sur un vrai-critère aboutit à une conclusion stricte car seulement deux situations sont possibles :

1. Une action a une évaluation supérieure à l'autre : une action est meilleure que l'autre sur ce critère ;
2. Les deux actions ont des évaluations égales : elles sont indifférentes sur ce critère.

- Les pseudos-critères :

Par rapport au vrai-critère, le pseudo-critère considère une zone dite de « préférence faible » qui marque une indécision entre l'indifférence et la préférence stricte [Catalina, 2009]. Pour définir cette zone, deux seuils sont intégrés : le seuil d'indifférence (q) et le seuil de préférence (p). Ils permettent ainsi de définir trois zones (Fig. 5.1).



**Fig. 5.1 : Définition d'un pseudo-critère**

### 5.2.2 Description de la démarche d'ELECTRE III

La méthode se déroule en sept étapes une fois les critères de décision établis.

1. Construction de la matrice des performances ;
2. Définition des seuils et des poids des critères ;
3. Calcul des indices de concordance ;
4. Calcul des indices de discordance ;
5. Calcul de l'indice de crédibilité ;
6. Mise en place des distillations ascendante et descendante ;
7. Construction de l'ordre général.

Les informations détaillées dans les paragraphes suivants sont issues de [Roy, 1993], [Maystre, 1994], [Moura, 2008] et [Catalina, 2009].

#### 5.2.2.1 Construction de la matrice des performances

La matrice des performances recense les évaluations de l'ensemble des alternatives sur les critères dans une matrice dont la forme est donnée dans le Tableau 5.2. Les fonctions  $g_k$  sont les fonctions d'évaluation du critère  $k$ .

**Tableau 5.2 : Matrice de performances d'un problème d'aide à la décision**

	Critère 1	Critère 2	...	Critère j	...	Critère n
Alternative 1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_j(a_1)$	...	$g_n(a_1)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Alternative i	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	...	$g_j(a_i)$	...	$g_n(a_i)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Alternative p	$g_1(a_p)$	$g_2(a_p)$	...	$g_j(a_p)$	...	$g_n(a_p)$

#### 5.2.2.2 Définition des seuils et des poids

##### 5.2.2.2.1 Les seuils d'indifférence

Rogers et al. [Rogers, 1998] et Catalina [Catalina, 2009] précisent que les seuils d'indifférence des critères correspondent à l'imprécision minimum du critère. Par ailleurs, ils

peuvent être envisagés comme l'écart minimum entre deux alternatives à partir duquel les décideurs ressentent une préférence pour une action [Moura, 2008].

Les seuils d'indifférence peuvent être définis par une valeur constante ou une fonction qui dépend de l'évaluation sur le critère.

Ce seuil sert la définition de la zone d'indifférence, c'est-à-dire si  $|g_j(a_i) - g_j(a_k)| < q_j$ , il n'est alors pas possible de dire si  $a_k$  est meilleure ou plus mauvaise que  $a_i$ .

#### 5.2.2.2.2 *Les seuils de préférence*

Catalina [Catalina, 2009] définit les seuils de préférence comme la marge d'erreur maximum du critère. Au-delà de cette valeur, il n'y a pas de doute sur la préférence d'une action par rapport à une autre.

De la même manière que pour les seuils d'indifférence, les seuils de préférence peuvent être constants ou égaux à une fonction dépendant de l'évaluation sur le critère.

Ce seuil permet de caractériser la confiance de la méthode dans l'affirmation «  $a_k$  est au moins aussi bonne que  $a_i$  sur le critère  $j$  ».

#### 5.2.2.2.3 *Les seuils de veto*

Dans l'aide à la décision, le veto est un concept multicritère. Il est mis en place pour éviter tout phénomène de compensation entre les critères. Si ce seuil est dépassé sur un critère lors de la comparaison de deux actions, elles sont considérées comme incomparables sans étudier les comparaisons des évaluations sur les autres critères (veto) et ce même si elles sont meilleures.

#### 5.2.2.2.4 *Les poids des critères*

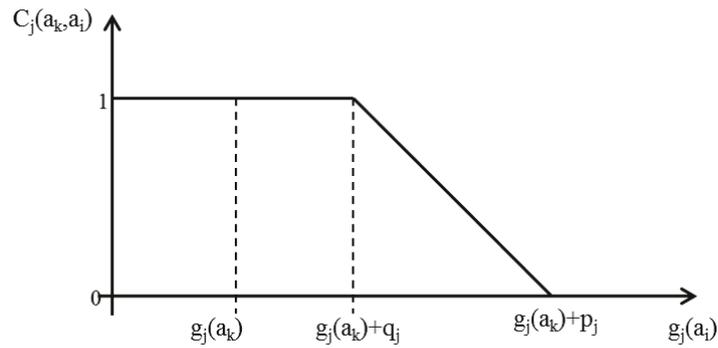
L'objectif de la définition du poids d'un critère est d'identifier l'importance du rôle dévolu à ce critère vis-à-vis des autres. Les valeurs données sont généralement issues des opinions et jugements de valeurs des acteurs du processus de décision.

La notion de poids s'interprète facilement :  $k_j > k_i$  est équivalent à « le critère  $j$  a plus d'importance que le critère  $i$  dans la décision ». Toutefois, le jeu de poids doit correspondre à l'ensemble des acteurs du processus.

### 5.2.2.3 Calcul des indices de concordance, discordance et crédibilité

#### 5.2.2.3.1 *Indices de concordance*

Les indices de concordance caractérisent la force du surclassement d'une action sur une autre. La Fig. 5.2 présente son calcul dans le cas d'un critère croissant (plus l'évaluation est élevée, plus l'alternative est considérée comme bonne).



**Fig. 5.2 : Indice de concordance - Méthode ELECTRE III**

Les équations décrivant la Fig. 5.2 sont les suivantes, pour  $j$  allant de 1 à  $n$  ( $n$  le nombre de critères) :

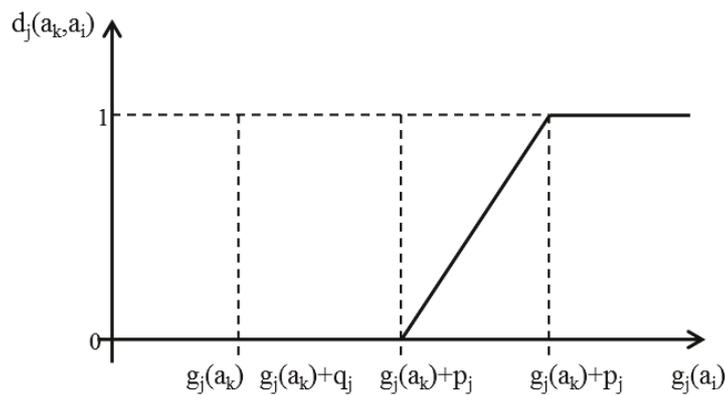
$$c_j(a_k, a_i) = \begin{cases} 1, & \text{si } g_j(a_k) + q_j \geq g_j(a_i) \\ 0, & \text{si } g_j(a_k) + p_j \leq g_j(a_i) \\ \frac{p_j + g_j(a_k) - g_j(a_i)}{p_j - q_j}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.1)$$

Le calcul des indices de concordance de chaque critère permet de calculer l'indice de concordance globale (Equation (5.2)).

$$C(a_k, a_i) = \frac{1}{P} \sum_{j=1}^n P_j \cdot c_j(a_k, a_i) \text{ avec } P = \sum_{j=1}^n P_j \quad (5.2)$$

### 5.2.2.3.2 Indices de discordance

Ces indices mesurent à quel point le critère  $j$  est en désaccord avec la proposition  $a$  surclasse  $b$ .



**Fig. 5.3 : Indices de discordance - Méthode ELECTRE III**

Les équations du calcul des coefficients de discordance (Fig. 5.3) sont données ci-dessous (Equation (5.3)).

$$d_j(a_k, a_i) = \begin{cases} 1, & \text{si } g_j(a_k) + v_j < g_j(a_i) \\ 0, & \text{si } g_j(a_i) \leq p_j + g_j(a_k) \\ \frac{p_j + g_j(a_k) - g_j(a_i)}{p_j - v_j}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.3)$$

### 5.2.2.3.3 Indice de crédibilité

L'indice de crédibilité caractérise la crédibilité de l'affirmation « a est au moins aussi bonne que b sur tous les critères ». Il combine les indices de concordance et de discordance pour estimer la confiance dans la comparaison de deux actions. Il se définit alors de la manière suivante (Equation (5.4)).

$$\sigma_s(a_k, a_i) = C(a_k, a_i) \cdot \prod_{j \in D_c(a_k, a_i)} \frac{1 - d_j(a_k, a_i)}{1 - C(a_k, a_i)} \quad (5.4)$$

Avec  $D_c(a_k, a_i) = \{j \in F : d_j(a_k, a_i) > C(a_k, a_i)\}$

Quelques points sont à noter sur cet indice :

- Quand les indices de discordance sont nuls pour tous les critères, l'indice de crédibilité correspond à l'indice de concordance globale ;
- Quand la discordance est due à un phénomène de veto, il n'y a aucune crédibilité dans l'affirmation ;
- Quand la concordance est supérieure à la discordance, l'indice de crédibilité est égal à la concordance globale affaiblie par les discordances.

## 5.2.2.4 Construction du classement des alternatives

### 5.2.2.4.1 Mise en place des distillations ascendante et descendante

Les distillations correspondent à l'élimination itérative d'alternatives suivant des contraintes pour obtenir un classement. Ainsi, la distillation ascendante dresse le classement de la « meilleure » option à la « moins bonne » et la distillation descendante dresse le classement de la « moins bonne » à la « meilleure ».

De manière théorique, la définition est la suivante. Les deux pré-classements sont nommés  $Z_1$  et  $Z_2$ .  $A$  est l'ensemble des actions potentielles.

$Z_1$  est une partition de  $A$  en  $r$  classes que nous noterons  $\overline{C}_h$  avec  $h = 1 : r$ .

$Z_2$  est une partition de  $A$  en  $p$  classes que nous noterons  $\underline{C}_h$  avec  $h = 1 : p$ .

Dans  $Z_1$ , les actions de  $\overline{C}_h$  sont préférables à celles de  $\overline{C}_{h+1}$  : il s'agit de la distillation descendante.

Dans  $Z_2$ , les actions de  $\underline{C}_{h+1}$  sont préférables à celles de  $\underline{C}_h$  : il s'agit de la distillation ascendante.

Pour réaliser ces deux distillations, il est nécessaire de définir le seuil de discrimination de l'indice de crédibilité :  $s(\lambda)$  avec  $\lambda = \sigma_s(a_k, a_i)$ .

Ce seuil permet d'apprécier les écarts entre les indices de crédibilité et de définir la relation de  $\lambda$ -préférence (Equation (5.5)). Cette relation sert à l'identification du niveau de crédibilité à partir duquel une alternative est considérée meilleure qu'une autre.

$$a \text{ est } \lambda\text{-préférée à } b \text{ est égal à } \begin{cases} \sigma_s(a, b) - s(\sigma_s(a, b)) > \sigma_s(b, a) \\ \sigma_s(a, b) > \lambda \end{cases} \quad (5.5)$$

On note alors :

- $\lambda$ -puissance de a dans D  $p_D^\lambda$  : le nombre d'actions de D auxquelles a est  $\lambda$ -préférée ;
- $\lambda$ -faiblesse de a dans D  $f_D^\lambda$  : le nombre d'actions de D qui sont  $\lambda$ -préférées à a ;
- la  $\lambda$ -qualification de a dans D :  $q_D^\lambda = p_D^\lambda - f_D^\lambda$ .

Dans le préordre  $Z_1$ , à chaque étape (1 à r), les actions ayant le q maximum sont sélectionnées et retirées de l'ensemble des actions.

Dans le préordre  $Z_2$ , à chaque étape (1 à p), les actions ayant le q minimum sont sélectionnées et retirées de l'ensemble des actions.

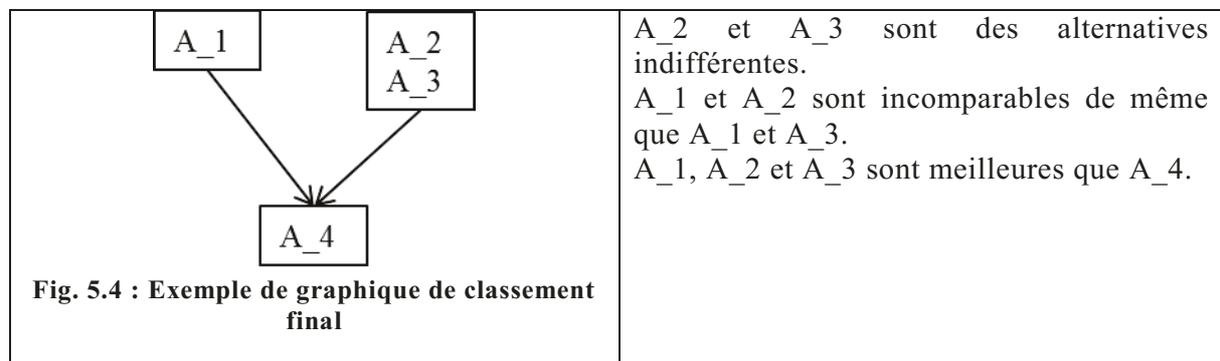
#### 5.2.2.4.2 Construction de l'ordre général

L'ordre partiel final est obtenu grâce à l'intersection des deux pré-ordres  $Z_1$  et  $Z_2$ .

#### 5.2.2.5 Schématisation des résultats

ELECTRE III fournit diverses informations sur les alternatives. Le premier élément est le classement général des alternatives de la « meilleure » à la « moins bonne » qui permet d'identifier les stratégies les plus pertinentes.

Plusieurs alternatives peuvent être classées au même rang. Le graphique distingue alors les stratégies incomparables de celles qui sont indifférentes (Fig. 5.4) :



A la différence du classement général, le préordre final ne fournit pas d'informations sur les situations d'indifférence et d'incomparabilité. Il précise uniquement le rang des alternatives.

Le graphique de SIMOS [Maystre, 1994] est une autre schématisation possible des résultats. Il indique le rang des alternatives calculé par la distillation descendante en fonction de celui obtenu par la distillation ascendante (Fig. 5.5).

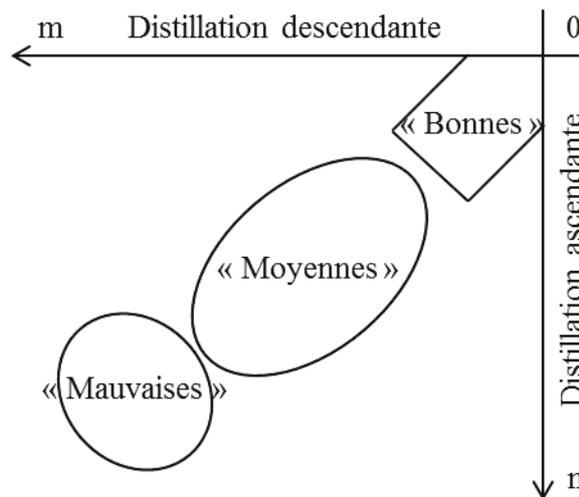


Fig. 5.5 : Exemple de graphique de SIMOS

Les alternatives qui se situent hors de la diagonale sont incomparables vis-à-vis des autres. Elles sont bien situées sur une distillation et mal sur l'autre. Ce graphique permet de repérer rapidement les alternatives les mieux classées et celles sur lesquelles il est impossible de conclure et pour lesquelles une étude spécifique pourra être menée.

### 5.2.3 Analyse de robustesse du classement final

Le classement final des alternatives est issu de deux modèles distincts [Ben Mena, 2001] : celui des actions qui fournit les évaluations et celui des préférences (ici ELECTRE III). Pour que ces deux modèles fonctionnent, des paramètres d'entrée doivent être définis.

Au niveau du modèle de préférence, de par leur lien avec les systèmes de valeurs des décideurs, les définitions de ces paramètres sont incertaines et subjectives. La fiabilité du classement doit donc être vérifiée vis-à-vis de ces imprécisions.

Dans ELECTRE III, les paramètres d'entrée sont nombreux : seuils de préférence, d'indifférence, de veto et poids des critères. L'étude des plages de variation de ces seuils dans lesquelles le classement est stable permet de fournir des conclusions fiables sur le domaine de variation.

La procédure retenue pour l'analyse de robustesse est l'exploration en étoiles des plages de variation des seuils (Fig. 5.6) [Ben Mena, 2001], [Maystre, 1994].

Chaque catégorie de seuils est traitée indépendamment.

Roy et al. [Roy, 1993] précisent toutefois qu'il ne faut pas s'inquiéter des modifications du classement si celles-ci sont mineures. Les points critiques à étudier sont les variations des actions incomparables (voir graphique de SIMOS) et s'il y a un bouleversement du classement.

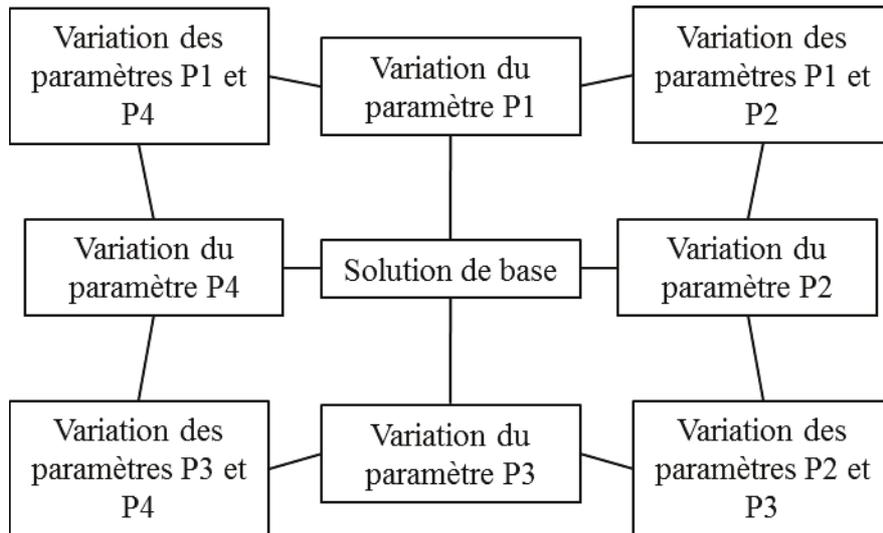


Fig. 5.6 : Exploration en étoile des paramètres d'entrée

#### 5.2.4 Outil informatique pour ELECTRE III

Le calcul des indices et des algorithmes de distillation est fastidieux s'il est réalisé manuellement. Plusieurs outils informatiques ont été développés dont un par le LAMSADE en 1992 disponible gratuitement.

L'ensemble des classements établis dans les chapitres suivants a été réalisé grâce à cet outil. Il permet de définir l'ensemble des données nécessaires au classement des alternatives :

- Définition des critères (sens d'évaluation) ;
- Matrice de performances ;
- Seuils des critères ;
- Poids des critères ;
- Seuil de discrimination.

Avec ces données, ELECTRE III fournit le graphique du classement final, le préordre final et le rang des alternatives sur les deux distillations.

## 5.3 Conclusions

L'identification des stratégies de réhabilitation efficaces des bâtiments en tuffeau repose en partie sur la méthode d'analyse multicritère. ELECTRE III, la méthode retenue, dresse un classement des stratégies de celles qui correspondent le moins aux besoins du ou des décideur(s) à celles qui y répondent le mieux.

L'intérêt de cette démarche réside dans la prise en compte de l'incertitude des critères de décision. En effet, la conclusion du chapitre 4 était que la modélisation du bâtiment engendrait une incertitude dans l'évaluation des stratégies. Pour que les conclusions du classement soient fiables, il était nécessaire de considérer cet effet indésirable sur les critères de décision.

ELECTRE III a donc vocation à fournir un classement fiable des stratégies de réhabilitation. Toutefois, la mise en place de cette méthode au sein du processus de sélection nécessite une phase de vérification. En effet, la fiabilité du classement et sa robustesse vis-à-vis d'un certain nombre de paramètres incertains doivent être vérifiées sur des cas concrets.

## **PARTIE 3 : APPLICATION DE LA DÉMARCHE D'AIDE A LA DÉCISION D'UNE STRATÉGIE DE RÉHABILITATION**

L'ensemble de la démarche est construit et les outils sont définis. Cette dernière partie est celle de la vérification du fonctionnement de ce processus de décision. Pour cela, une première étape, sans être un chapitre à proprement parler et n'en porte donc pas l'intitulé synthétise l'ensemble de la démarche.

Ensuite, le chapitre 6 s'attache à vérifier sur un cas simplifié les résultats obtenus grâce à cette méthode et les compare à une étude sans ce processus. Il permet de conclure quant aux résultats et à la faisabilité de la démarche développée.

Enfin, le chapitre 7 est une application concrète à un cas réaliste de bâtiment en tuffeau pour juger de l'applicabilité de la démarche sur un cas plus complexe.



## **Démarche de sélection d'une stratégie de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau**

Dans cette très courte partie introductive à l'étape d'application, nous présentons l'ensemble des étapes de la démarche de sélection d'une stratégie de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau. Les différents éléments liés à ce patrimoine et présentés dans les chapitres précédents sont synthétisés ici.

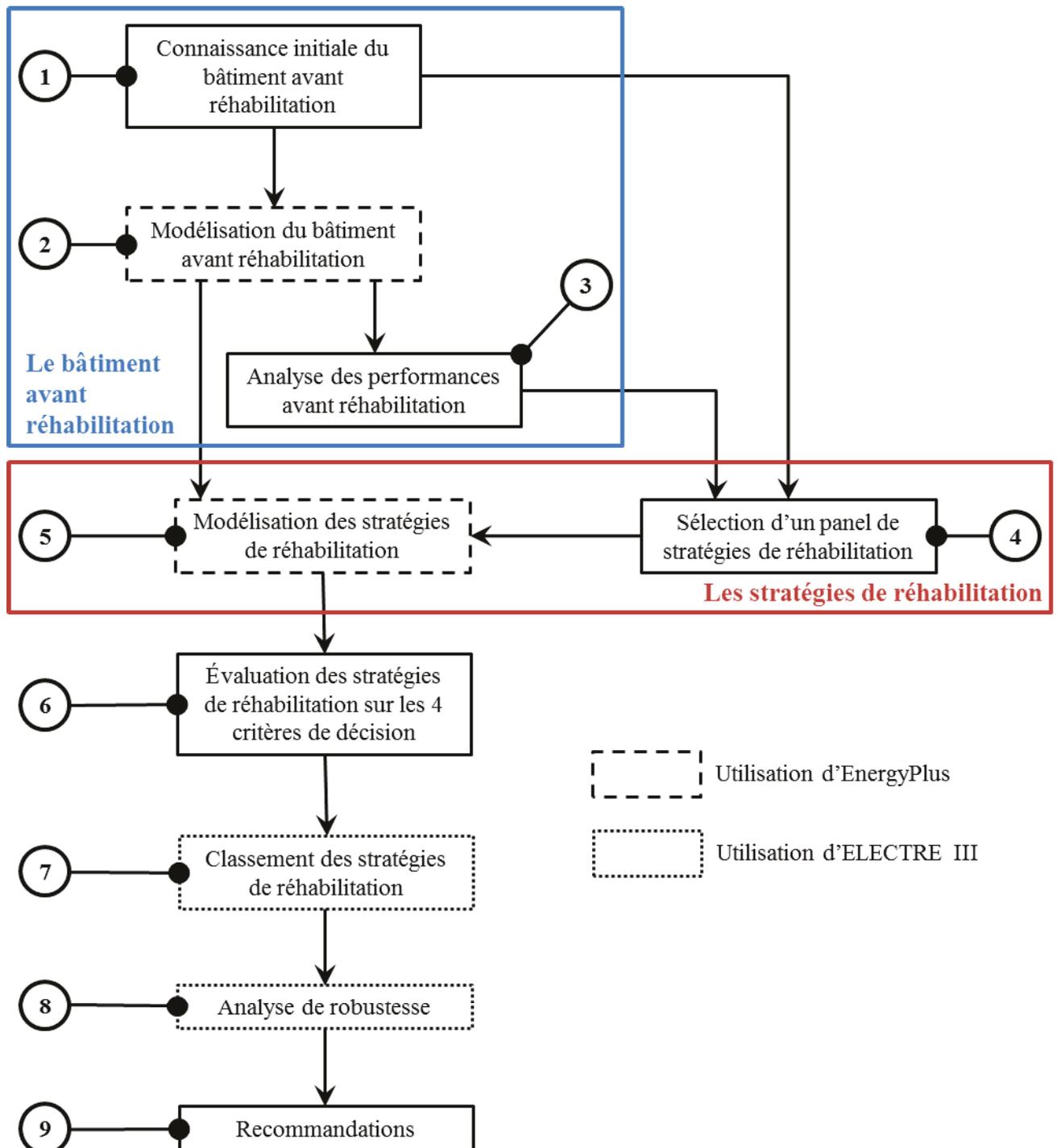


Figure 1 : Processus de sélection d'une stratégie de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau

En considérant un bâtiment en tuffeau déjà identifié, le processus de sélection d'une stratégie de réhabilitation suit le schéma de la Figure 1.

Avant de décrire le contenu de chaque étape, nous précisons ici que quatre critères de décision ont été identifiés. Ils ont pour objectif de juger de la réponse des stratégies de réhabilitation aux enjeux :

- d'amélioration des performances énergétiques : les besoins de chauffage annuels en kWh/m<sup>2</sup>.an ;
- d'amélioration du confort hygrothermique : le taux d'inconfort hygrothermique de l'ambiance en % ;

## Démarche de sélection d'une stratégie de réhabilitation d'un bâtiment en tuffeau

- de prévention des risques de dégradation : la teneur en eau moyenne sur une année cinq ans après la réhabilitation en kg/kg ;
- de minimisation du coût des travaux : l'investissement initial en €/m<sup>2</sup>.

### Étape 1 : « Connaissance initiale du bâtiment avant réhabilitation »

L'objectif de cette étape est de connaître le bâtiment le mieux possible à différents niveaux :

- Celui des composants : identification des matériaux constitutifs et leurs différentes caractéristiques (épaisseur, propriétés thermiques et hygriques, etc.) ;
- Celui des altérations de l'enveloppe : observation d'altérations sur le bâti et de leurs sources potentielles ;
- Celui de l'usage du bâtiment : détermination du nombre d'occupant, du scénario de présence et du scénario de chauffage ;
- Celui de la perméabilité à l'air : mesure de la perméabilité à l'air du bâtiment ;
- Celui des contraintes du bâti vis-à-vis d'un projet de réhabilitation : mise en évidence des contraintes architecturales, structurelles, etc. et des volontés du décideur en terme de réhabilitation.

Pour cela, un audit du bâtiment peut être mené et complété par un questionnaire pour l'occupant sur les besoins ressentis vis-à-vis de la réhabilitation de leur logement.

### Étape 2 : « Modélisation du bâtiment avant réhabilitation »

Cette étape utilise les données recueillies à l'étape 1 sur le bâtiment et dresse une série d'hypothèses pour modéliser le plus fidèlement possible le bâtiment grâce à l'outil EnergyPlus. Rappelons que les points critiques de cette étape sont la précision des caractéristiques des matériaux et la connaissance de la surface équivalente de fuite du bâtiment.

### Étape 3 : « Analyse des performances du bâtiment avant réhabilitation »

L'objectif de cette étape est d'appréhender les points problématiques du bâtiment vis-à-vis des objectifs de la réhabilitation. Grâce à la modélisation, les besoins de chauffage du logement avant réhabilitation sont caractérisés ainsi que son taux d'inconfort. Cette analyse préliminaire permet d'identifier des cibles prioritaires pour la réhabilitation.

### Étape 4 : « Sélection d'un panel de stratégies de réhabilitation »

Lors de cette étape, les stratégies de réhabilitation potentiellement applicables au bâtiment initial sont déterminées. La conception d'une stratégie de réhabilitation provient de la combinaison d'actions élémentaires visant les cibles suivantes :

- Isolation de la toiture ;
- Isolation du plancher bas ;
- Isolation des parois ;
- Changement des fenêtres.

Toutefois, à l'étape 1, les contraintes du bâti vis-à-vis de ces actions ont été identifiées et s'appliquent ici en filtrant les actions élémentaires. L'exemple le plus fréquent sur le bâti ancien est l'isolation thermique par l'extérieur impossible sur les bâtiments protégés.

Après élimination des actions élémentaires qui ne respectent pas les contraintes, les stratégies de réhabilitation sont déterminées en combinant les actions élémentaires restantes.

### Étape 5 : « Modélisation des stratégies de réhabilitation »

A partir de la modélisation du bâtiment avant réhabilitation (étape 2), les stratégies de réhabilitation sont ajoutées. Cette étape nécessite la définition des hypothèses concernant les caractéristiques thermiques et hygriques des matériaux isolants ajoutés, la surface équivalente de fuite et sa possible évolution avec les actions de réhabilitation.

Si à l'étape 1, des remontées capillaires ont été identifiées, les hypothèses de modélisation de ce phénomène doivent être énoncées à cette étape.

Étape 6 : « Évaluation des stratégies de réhabilitation sur les 4 critères de décision »

Dans ce processus de sélection de stratégies de réhabilitation, quatre critères de décision ont été définis : les besoins de chauffage annuels, le taux d'inconfort hygrothermique sur une année, la teneur en eau moyenne dans le tuffeau cinq ans après la réhabilitation et l'investissement initial pour les travaux de réhabilitation.

Cette étape consiste en le calcul de ces quatre critères pour l'ensemble des stratégies de réhabilitation sélectionnées. Les données nécessaires au calcul des besoins de chauffage, du taux d'inconfort hygrothermique et de la teneur en eau sont obtenues par la modélisation réalisée à l'étape 5. Le coût est déterminé à partir des sources tarifaires concernant les travaux de réhabilitation.

La matrice des performances, présentée au 5.2.2.1, peut alors être construite.

Étape 7 : « Classement des stratégies de réhabilitation »

Cette étape consiste en l'application de la méthode ELECTRE III à la matrice des performances établie à l'étape 6. Pour cela, dans un premier temps les seuils de la méthode sont définis. Nous rappelons ici les principes de détermination de ces seuils :

- Seuils d'indifférence : écart minimum entre deux alternatives à partir duquel les décideurs notent une préférence pour une action ;
- Seuils de préférence : incertitude maximum de la comparaison de deux alternatives ;
- Seuils de veto : écart maximum à partir duquel aucune comparaison des actions n'est possible sur les autres critères.

Une fois les seuils et les poids définis, l'ensemble des données est intégré au logiciel informatique ELECTRE III qui fournit le rangement des alternatives du meilleur compromis au moins bon.

Les stratégies incomparables (bien classées sur une distillation et mal sur l'autre (5.2.2.5)) sont aussi identifiées.

Étape 8 : « Analyse de robustesse du classement des stratégies de réhabilitation »

L'objectif de cette étape est de vérifier la fiabilité du classement obtenu à l'étape 7. L'analyse de robustesse consiste en l'étude de l'effet de variation des seuils sur le classement des stratégies. Ainsi, une exploration en étoile des seuils est menée (Figure 2), c'est-à-dire que pour chaque jeu de seuils le classement est calculé et comparé à celui initial. Chaque catégorie de seuils est explorée individuellement.

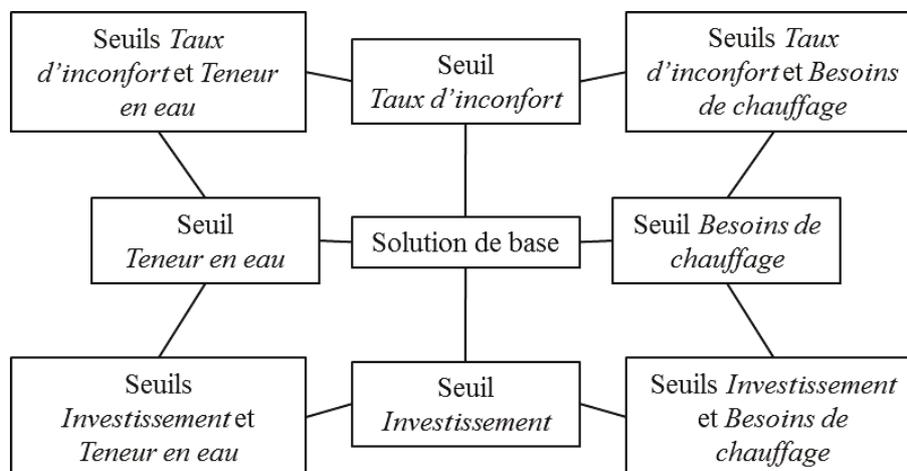


Figure 2 : Analyse de robustesse par exploration en étoile

Les plages de variation des différents seuils au sein desquelles le classement reste stable sont déterminées. Par ailleurs, l'évolution des stratégies incomparables en fonction des seuils est analysée : si le nombre de stratégies incomparables augmentent, le classement n'est pas fiable.

Étape 9 : « Recommandations »

Cette étape dresse le bilan des étapes précédentes en proposant le classement des stratégies obtenu. Toutefois, les limites de ce classement sont précisées : les plages de variation des seuils dans lesquelles le classement est stable et les stratégies incomparables



## **Chapitre 6      Application et validation du processus de décision à un cas simplifié**

Ce chapitre synthétise les enseignements des cinq premiers chapitres au sein de l'application du processus de sélection de réhabilitation à une étude de cas. Le choix de ce cas s'est porté sur un bâtiment simplifié pour permettre d'appliquer l'ensemble du processus en un temps raisonnable et permettre ainsi la vérification de son fonctionnement et de sa pertinence.

Sur ce cas simplifié, l'objectif est de vérifier si les différentes étapes du processus fonctionnent et plus particulièrement l'étape de définition des seuils de la méthode ELECTRE III traduisant l'incertitude de nos critères. Par ailleurs, nous pouvons aussi juger de la pertinence d'une présélection des stratégies potentielles en fonction des contraintes identifiées sur le bâtiment.

Bien qu'il s'agisse d'une étape de validation du processus de décision, nous en profitons pour identifier un panel de stratégies de réhabilitation pertinentes sur ce cas d'étude et les conclusions qui pourraient potentiellement être élargies au bâti en tuffeau.

## 6.1 Étapes 1 à 3 : le bâtiment avant réhabilitation

Le cas d'étude que nous étudions ici est un bâtiment fictif qui présente des caractéristiques observées sur les bâtiments en tuffeau que nous avons pu étudier dans les chapitres précédents et au cours de nos visites. Des hypothèses sur le bâtiment sont construites pour réaliser l'ensemble des étapes du processus de décision.

### 6.1.1 Connaissance du bâtiment avant réhabilitation

Notre cas d'étude se situe à Angers dans le Maine-et-Loire. Nous considérons qu'il s'agit d'un édifice isolé sans masque à proximité.

Il se compose d'une seule zone d'une surface au sol de  $5 \times 5 \text{ m}^2$  et de hauteur de pignon 5 m (Fig. 6.1). Les quatre parois sont orientées suivant les directions cardinales Nord, Sud, Est et Ouest. La toiture est à deux pans Nord et Sud. Une fenêtre et une porte sont disposées sur la façade Sud du bâtiment. Le plancher bas est en contact direct avec le sol.

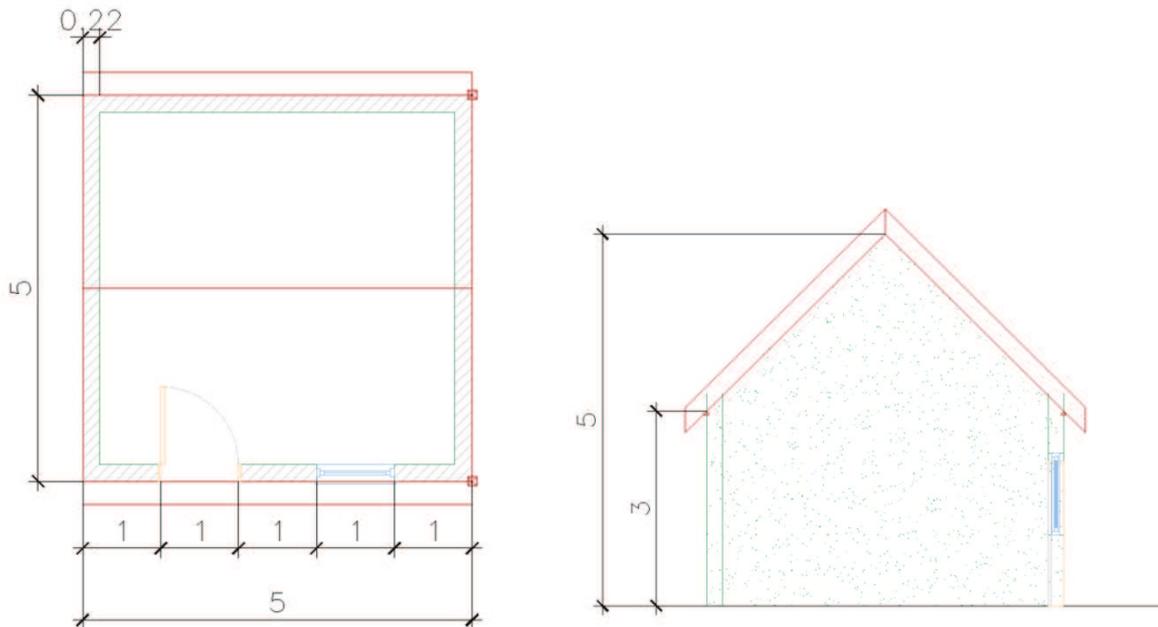


Fig. 6.1 : Plan du cas simplifié

Ce cas d'étude reprend les caractéristiques d'un bâtiment en tuffeau n'ayant subi aucune réhabilitation au cours de sa vie : les parois et la toiture ne sont pas isolées et la fenêtre est en simple vitrage.

Les compositions des parois sont données dans le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Composition des parois du cas d'étude

Éléments	Matériaux	Épaisseur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Toiture (Sud)	Ardoise	0,05	32
Toiture (Nord)	Ardoise	0,05	32
Plancher bas	Dalle chaux	0,10	25
	Carrelage	0,03	
Mur (Nord)	Tuffeau	0,22	15
Mur (Sud)	Tuffeau	0,22	15
Mur (Est)	Tuffeau	0,22	20
Mur (Ouest)	Tuffeau	0,22	20
Porte	Chêne	0,08	2
Fenêtre	Simple vitrage	0,004	1

La ventilation est naturelle. Le renouvellement d'air s'effectue uniquement par les défauts d'étanchéité des parois. Pour être le plus proche du bâti en tuffeau existant, la valeur d'étanchéité à l'air correspond à la médiane mesurée sur le patrimoine en pierre (1.1.2.4) soit  $Q_{4Pa} = 3,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Ceci équivaut à une surface de fuite de  $570 \text{ cm}^2$ .

Le scénario d'occupation du bâtiment est celui de la RT2005 [RT2005] : occupation de 18h à 10h en semaine et occupation permanente le week-end.

Des remontées capillaires sont observées sur les quatre parois du bâtiment.

### 6.1.2 Modélisation du bâtiment avant réhabilitation

La modélisation de notre cas d'étude reprend les hypothèses de celle de la cellule expérimentale présentée au Chapitre 4. Le cas d'étude est donc modélisé avec l'outil EnergyPlus et l'algorithme HaMT. Le pas de temps de calcul est de 1 minute.

Les conditions météorologiques sont issues du fichier Météornorm de la ville d'Angers (47°25'00''N – 0°31'23''W, France).

Les propriétés hygrothermiques du tuffeau nécessaires au calcul sont issues des mesures de K. Beck [Beck, 2006], la conductivité thermique est calculée par le modèle de Béziat (Chapitre 1). Les caractéristiques des autres matériaux constitutifs (Tableau 6.1) proviennent de la base de données de Wufi [WUFI].

Le modèle d'infiltration par ventilation naturelle est identique à celui utilisé lors de la modélisation de la cellule expérimentale (Chapitre 4 Equation (4.11)). Les coefficients d'infiltrations liées au vent ( $C_w$ ) et liées au tirage thermique ( $C_s$ ) correspondent aux valeurs préconisées par EnergyPlus pour un bâtiment en environnement isolé à deux étages (hauteur de pignon = 5 m) [EERE, 2012]. La surface équivalente de fuite a été calculée, elle est égale à  $570 \text{ cm}^2$ .

L'occupation de la zone est simulée par des gains internes de  $5 \text{ W/m}^2$  [RT2005] pendant les périodes d'occupation définies par le scénario du paragraphe précédent.

Le chauffage fonctionne du 31 octobre au 1<sup>er</sup> mai. Les températures de consigne sont égales à  $19^\circ\text{C}$  lorsque le bâtiment est occupé et à  $16^\circ\text{C}$  sinon.

Les sorties du modèle sont la température intérieure, l'humidité spécifique intérieure, les besoins de chauffage, la teneur en eau dans les parois en tuffeau au pas de temps horaire.

La simulation est lancée sur cinq ans pour permettre le calcul de l'indicateur de risque de dégradation (Chapitre 3).

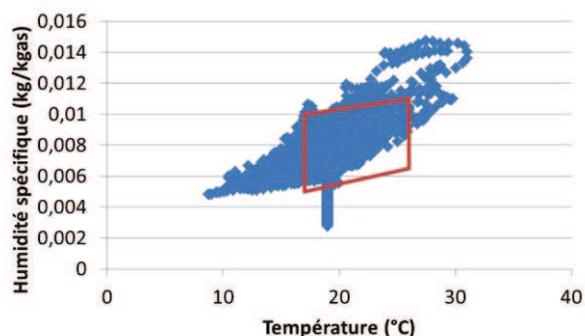
### 6.1.3 Analyse des performances du bâtiment avant réhabilitation

Le bâtiment avant réhabilitation est évalué sur les critères de décision qui nous intéressent : besoins de chauffage annuels, taux d'inconfort et teneur en eau dans le tuffeau. Le coût n'a pas de sens à ce niveau de l'étude.

Le Tableau 6.2 synthétise les résultats du modèle de bâtiment avant réhabilitation.

**Tableau 6.2 : Performances du bâtiment avant réhabilitation**

Indicateurs	Taux d'inconfort (%)	Besoins de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Teneur en eau (kg/kg)
Avant réhabilitation	56	686	0,0675



**Fig. 6.2 : Conditions hygrothermiques avant réhabilitation**

Les performances du bâtiment avant réhabilitation apparaissent plutôt mauvaises en termes de confort et de besoins énergétiques. En effet, la zone considérée est inconfortable pendant plus de la moitié des périodes d'occupation. D'après les conditions hygrothermiques de la pièce avant réhabilitation (Fig. 6.2), une part importante de l'inconfort est liée à une température trop froide. La saison de chauffe considérée ici s'étend de novembre à mai ce qui explique ces résultats. De plus, les besoins de chauffages sont très élevés. Rappelons que les consommations mesurées sur des bâtiments anciens sont inférieures à 275 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Les deux points problématiques de ce bâtiment apparaissent donc être le confort hygrothermique et les besoins de chauffage.

## 6.2 Étapes 4 et 5 : les stratégies de réhabilitation

### 6.2.1 Sélection d'un panel de stratégies de réhabilitation potentielles

Nous déterminons ici les actions élémentaires possibles sur les items suivant : toiture, plancher, parois et fenêtre. Dans cette étude, nous considérons trois cas de figures pour

vérifier si la mise en place d'une présélection des actions liées aux contraintes identifiées sur le bâtiment est pertinente.

#### 6.2.1.1 Cas n°1 : absence de contraintes réglementaires et de la part du décideur

Le choix des actions élémentaires s'oriente vers un panel assez large parmi les techniques existantes et couramment mises en œuvre.

##### 6.2.1.1.1 *Isolation de la toiture*

Deux techniques courantes mais très différentes existent : l'isolation de la toiture en combles perdus et celles en combles aménageables. En l'absence de contrainte identifiée par le décideur sur cet aspect, nous choisissons de tester ces deux techniques. L'isolant considéré est le même et couramment utilisé sur cet élément du bâtiment [Gallauziaux, 2010] : la laine de verre.

##### 6.2.1.1.2 *Isolation du plancher*

Les techniques varient suivant la nature du plancher qui dans notre cas est sur terre-plein. La solution possible vers laquelle nous nous orientons est la démolition de la dalle existante pour la remplacer par une dalle isolée. L'isolant considéré est le polystyrène expansé.

##### 6.2.1.1.3 *Isolation des parois*

Les deux techniques d'isolation des parois sont l'isolation thermique par l'intérieur (ITI) et l'isolation thermique par l'extérieur (ITE). L'objectif de ce chapitre étant de vérifier le processus, nous choisissons de mettre en œuvre des solutions d'isolation qui d'après les études menées sur les bâtiments anciens ne fonctionnent pas (présentées au 2.2.2.2). Ainsi, nous testons un complexe isolant imperméable et une isolation thermique extérieure réputée plus performante dans ces mêmes études.

Les techniques testées sont données dans le Tableau 6.3 et leurs descriptions complètes sont données en annexe D.

Tableau 6.3 : Actions élémentaires d'isolation des parois

Technique d'isolation	Matériaux	Épaisseurs
Intérieure	Laine de verre	120
Intérieure	Ouate de cellulose	120
Intérieure	Fibre de bois	120
Extérieure	Fibre de bois	160

##### 6.2.1.1.4 *Changement des fenêtres*

Nous choisissons de conserver les menuiseries en bois dont les tailles sur le bâti tuffeau ne sont généralement pas standards. Seul le vitrage est modifié par un matériau plus performant. Le poids du vitrage est un critère à considérer car les menuiseries existantes doivent le supporter. Ainsi, le triple vitrage est éliminé des possibilités. Notre choix se porte donc sur les techniques de double vitrage existantes : 4/16/4 (air) peu émissif et 4/16/4 (argon) peu émissif.

##### 6.2.1.1.5 *Synthèse des actions élémentaires*

Les quatre classes d'actions élémentaires sont combinées ce qui fait un total de 89 stratégies possibles. Le Tableau 6.4 synthétise l'ensemble de ces alternatives.



**Tableau 6.4 : Synthèse des stratégies de réhabilitation présélectionnées**

N° de stratégie \ Actions élémentaires	0	1	2	3	4
Isolation des combles	Sans	Combles perdus avec laine de verre	Combles aménageables avec laine de verre		
Isolation du plancher bas	Sans	Démolition et reconstruction d'une dalle sur polystyrène expansé			
Isolation des parois verticales	Sans	Par l'intérieur en laine de verre	Par l'intérieur en ouate de cellulose	Par l'intérieur en fibre de bois	Par l'extérieur en fibre de bois
Changement des fenêtres	Sans	Double vitrage air peu émissif	Double vitrage argon peu émissif		

La nomenclature des stratégies est construite à partir des niveaux de chaque action élémentaire. Ainsi, la simulation S\_abcd subit les :

- niveau a pour l'isolation des combles (a variant de 0 à 2) ;
- niveau b pour l'isolation du plancher bas (b variant de 0 à 1) ;
- niveau c pour l'isolation des parois verticales (c variant de 0 à 4) ;
- niveau d pour le changement des fenêtres (d variant de 0 à 2).

La stratégie S\_0000 correspond au cas initial où aucune action n'est réalisée.

#### 6.2.1.2 Cas n°2 : le décideur souhaite aménager les combles du bâtiment

Dans ce cas n°2, nous considérons une contrainte liée aux besoins du décideur : il souhaite aménager ses combles pour avoir un gain d'espace habitable. De ce fait, l'ensemble des alternatives avec l'action élémentaire : isolation de la toiture en combles perdus sont éliminées. Le nombre d'alternatives est alors de 60 possibilités.

Nous conservons la même nomenclature que pour le cas n°1.

#### 6.2.1.3 Cas n°3 : le décideur souhaite conserver les façades apparentes

Dans ce cas n°3, nous considérons une contrainte liée à la volonté du décideur de conserver sa façade extérieure en l'état. Nous éliminons donc l'action élémentaire isolation thermique par l'extérieur des parois. Le nombre d'alternatives possibles est réduit à 72.

Nous conservons la même nomenclature que pour le cas n°1.

### 6.2.2 Modélisation des stratégies de réhabilitation

Deux aspects de la modélisation du bâtiment avant réhabilitation évoluent avec les actions élémentaires : la perméabilité à l'air du bâtiment et le système de ventilation que nous détaillons dans les paragraphes qui suivent.

#### 6.2.2.1 Évolution de la perméabilité à l'air suivant les actions de réhabilitation

La perméabilité à l'air élevée dans les bâtiments anciens en pierre avant rénovation peut être affectée par les actions élémentaires de réhabilitation.

Toutefois, l'effet des actions élémentaires sur la perméabilité à l'air est difficilement quantifiable car il dépend de l'état initial du bâti et de la mise en œuvre des travaux. Nous considérons que l'isolation de la toiture, l'isolation des parois verticales et le changement des fenêtres sont les trois actions pouvant affecter la perméabilité du bâtiment.

Pour évaluer les effets de ces trois actions élémentaires, nous nous basons sur les mesures recensées par le Cerema – DTerCE.

Les bâtiments en pierre sur lesquels la perméabilité à l'air a été mesurée sont répartis en trois catégories : non isolés, isolés mais non labellisés, isolés et labellisés. Ces classes servent de référence pour calculer l'effet des actions de réhabilitation.

La fréquence cumulée de la perméabilité à l'air des bâtiments labellisés (Fig. 6.3) est notre référence pour les bâtiments subissant les trois actions de réhabilitation précédentes.

Lorsqu'une seule action parmi les trois est réalisée, la courbe des bâtiments isolés mais non labellisés sert de base. Enfin, un ratio entre les valeurs pour une action et pour trois est calculé pour obtenir la perméabilité à l'air après deux actions (Fig. 6.3).

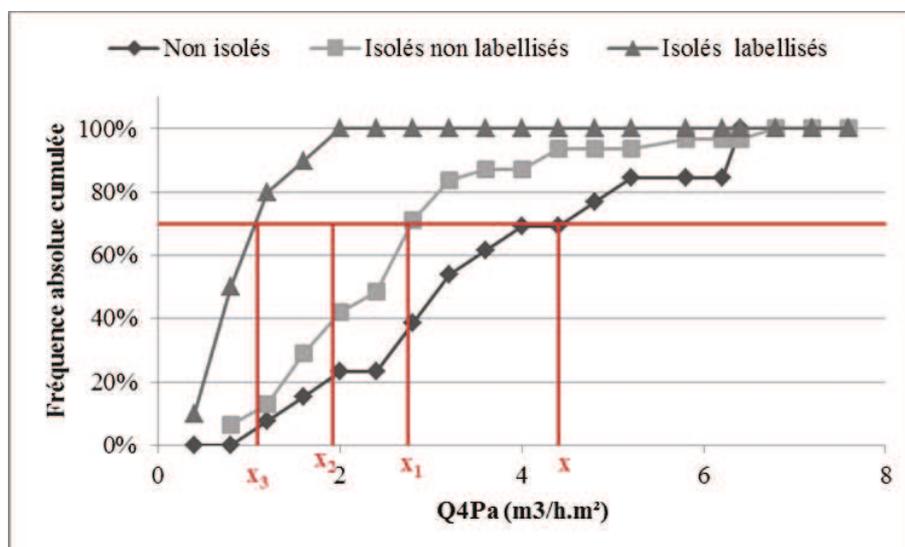


Fig. 6.3 : Distribution de la perméabilité à l'air ( $Q_{4Pa}$ ) en fonction des catégories de bâtiments en pierre

Le calcul des valeurs de perméabilité à l'air se déroule alors de la manière suivante :

- x la perméabilité mesurée sur le bâtiment non réhabilité
- $x_1$  la perméabilité obtenue après la réalisation d'une action
- $x_2 = x_3 + (x_1 + x_3)/2$  la perméabilité obtenue après la réalisation de deux actions
- $x_3$  la perméabilité obtenue après la réalisation de trois actions.

Ce qui correspond pour notre cas d'étude aux résultats suivants :

**Tableau 6.5 : Perméabilité à l'air du bâtiment en fonction des actions de réhabilitation réalisées**

Nombre d'actions	Q4Pa ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Surface de fuite ( $\text{cm}^2$ )
0	3,1	570
1	2,4	440
2	1,6	290
3	0,8	150

### 6.2.2.2 Installation d'un système de ventilation mécanique

La réduction de la perméabilité à l'air peut être la source d'une mauvaise qualité de l'air intérieur car le renouvellement d'air peut ne plus être suffisant pour évacuer les polluants. Ainsi, Gens et al. [Gens, 2014] précise que la mise en place d'une isolation et l'amélioration de l'étanchéité à l'air des bâtiments entraînent un risque d'exposition aux polluants plus élevés dans les bâtiments européens. L'intégration d'un système de ventilation mécanique est alors nécessaire pour pallier ce défaut.

D'après Bailly et al. [Bailly, 2013], 90% des bâtiments ayant une ventilation mécanique (double ou simple flux) ont une perméabilité à l'air inférieure à  $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Par ailleurs, la RT 2005 considère que la référence de perméabilité à l'air pour les maisons individuelles est  $1,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Au contraire, pour les bâtiments ventilés naturellement, 90% ont une perméabilité inférieure à  $3,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Nous considérons donc que  $1,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  est le seuil à partir duquel est installée une ventilation mécanique.

D'après le Tableau 6.5, le système de ventilation mécanique est donc intégré au modèle pour les stratégies subissant au minimum les trois actions : isolation de la toiture, isolation des murs extérieurs, changement des fenêtres.

L'arrêté de mars 1982 définit les débits de renouvellement d'air minimum en fonction du nombre de pièces principales du logement. Le débit de ventilation imposé dans notre cas d'étude est celui défini par la réglementation (Tableau 6.6). Le système en lui-même n'est pas modélisé.

**Tableau 6.6 : Débits de ventilation des différentes pièces d'un logement en fonction du nombre de pièces principales [Arrêté 1982]**

Nombre de pièces principales	Cuisine	Salle de bain	Autre salle d'eau	WC unique	WC multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	30	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

### 6.2.2.3 Hypothèses de modélisation des stratégies de réhabilitation

Les stratégies de réhabilitation sont intégrées au modèle du cas d'étude présenté au paragraphe 2. Les hypothèses précédentes sont conservées.

Les caractéristiques des matériaux d'isolation sont issues de la base de données de Wufi.

Le renouvellement d'air évolue en fonction des surfaces équivalentes de fuite présentées au paragraphe précédent. L'équation d'infiltration conserve les mêmes coefficients de vent et de tirage thermique que le cas initial.

Un débit de ventilation fixé à 0,75 vol/h est intégré lorsque la combinaison d'actions : Isolation de la toiture, isolation des parois et changement des fenêtres est réalisée.

La définition des indicateurs Besoins de chauffage et Taux d'inconfort considère un usage normal du bâtiment. Dans le cadre de ce bâtiment, l'usage est défini par l'occupation (gains internes) et le scénario de chauffage. Ils restent identiques après réhabilitation.

La modélisation des remontées capillaires au sein des parois est une limite d'EnergyPlus. Pour vérifier si une stratégie de réhabilitation peut fonctionner en présence de ce phénomène, nous imposons une teneur en eau initiale dans le tuffeau élevée (0,2 kg/kg). L'objectif est alors de vérifier si la solution permet à la paroi en tuffeau de sécher. Dans le cas contraire, elle ne fonctionnerait pas avec des remontées capillaires et pourrait provoquer des altérations.

## 6.3 Étape 6 : l'évaluation des stratégies de réhabilitation sur les quatre critères de décision

### 6.3.1 Hypothèses sur les critères de décision

Dans le processus de décision classique, cette étape consiste en le calcul des quatre critères de décision que nous considérons. Les hypothèses des calculs sont précisées ici.

Les données d'entrée de ces critères ont été obtenues à l'étape précédente pour les besoins de chauffage, le taux d'inconfort et la teneur en eau dans le tuffeau. Comme précisé dans la démarche, l'investissement est calculé à partir de sources tarifaires sur les travaux de réhabilitation. Dans notre cas, il s'agit de BâtiPrix 2008 et Aldès actualisés pour 2014 avec la hausse de 1,9% constatée par le MEDDE sur les travaux d'amélioration – rénovation des logements entre 2009 et 2013 [INSEE, 2013].

Les besoins de chauffage et l'investissement financier sont calculés par rapport à la surface habitable du logement (Chapitre 3). Sur ce cas d'étude, deux types d'isolation des combles sont testés ce qui affecte la surface habitable possible du logement. En effet, elle est plus importante dans le cadre de combles aménageables que de combles perdus. Pour comparer sur des bases égales l'ensemble des stratégies, les deux indicateurs précédents sont rapportés à la surface potentiellement habitable du logement.

Les solutions avec isolation en combles perdus ont ainsi une surface habitable potentielle de 25 m<sup>2</sup>. Celles où les combles sont aménageables disposent de 29,4 m<sup>2</sup> habitables en considérant un plancher intermédiaire avec une hauteur sous plafond de 1,80 m.

### 6.3.2 Analyse des évaluations des stratégies sur les quatre critères

Dans ce chapitre, en parallèle de la démarche de sélection d'une stratégie, nous réalisons la vérification du processus et menons donc des études complémentaires sur les résultats obtenus. Ainsi, nous analysons les évaluations de l'ensemble des alternatives sur les quatre critères. Pour cela, les effets des actions élémentaires sur les critères de décision sont étudiés

individuellement puis nous analysons les relations entre les critères sur le panel de stratégies considéré.

### 6.3.2.1 Méthodologie

Pour chaque item d'intervention en réhabilitation (toiture, plancher, parois, fenêtre), plusieurs niveaux sont définis qui correspondent donc aux actions élémentaires retenues. Le Tableau 6.7 synthétise les items, les actions élémentaires et les niveaux correspondant.

**Tableau 6.7 : Actions élémentaires retenues et nomenclature**

Item d'intervention	Niveaux	Action élémentaire
Toiture	Niveau 0	Absence d'isolation
	Niveau 1	Isolation en combles perdus
	Niveau 2	Isolation en combles aménageables
Plancher	Niveau 0	Absence de modification
	Niveau 1	Démolition et insertion d'un isolant
Parois	Niveau 0	Absence d'isolation
	Niveau 1	ITI par laine de verre
	Niveau 2	ITI par ouate de cellulose
	Niveau 3	ITI par fibre de bois
	Niveau 4	ITE par fibre de bois
Ouvrant	Niveau 0	Absence de modification
	Niveau 1	Double vitrage air peu émissif
	Niveau 2	Double vitrage argon peu émissif

Dans la suite des figures, les actions élémentaires sont décrites par le nom de l'élément modifié et le niveau. Par exemple, l'action démolition de la dalle de plancher et insertion d'un isolant sera identifiée par Niveau 1 – Plancher.

Les effets de chaque action élémentaires sur les critères de décision sont calculés [Gillon, 1997] selon l'équation (6.1).

$$EA_i = \frac{\bar{C}_{A_i} - \bar{C}}{\bar{C}} \quad (6.1)$$

Avec  $EA_i$  l'effet du niveau  $i$  de l'action élémentaire  $A$

$\bar{C}$  la moyenne de l'indicateur  $C$  sur les 89 stratégies de réhabilitation

$\bar{C}_{A_i}$  la moyenne de l'indicateur  $C$  sur les stratégies où l'action élémentaire  $A_i$  est réalisée.

Les quatre critères que nous avons retenus sont des critères décroissants : plus ils sont faibles, plus la stratégie est considérée comme pertinente. Ainsi, un effet avec une valeur négative correspond à un effet bénéfique de l'action sur l'indicateur.

Après une synthèse générale des évaluations des 89 stratégies de réhabilitation sur les quatre critères, nous nous concentrons sur chaque item d'intervention individuellement.

6.3.2.2 Résultats

Tableau 6.8 : Critères de décision des 89 stratégies de réhabilitation

Indicateurs	Taux d'inconfort (%)	Besoins de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Teneur en eau (kg/kg)	Investissement (€/m <sup>2</sup> )
<b>Moyenne</b>	56	310	0,0935	306
<b>Maximum</b>	63	660	0,1223	510
<b>Minimum</b>	31	100	0,0607	28
<b>Cas initial</b>	56	686	0,0675	-

Le Tableau 6.8 synthétise les évaluations des 89 stratégies sur les quatre critères de décision qui nous intéressent. Le comparatif au cas initial est aussi réalisé.

Nous pouvons donc constater que le maximum des besoins de chauffage après réhabilitation est inférieur à celui du cas initial. Au contraire, les maximums du taux d'inconfort et de la teneur en eau observés sur les stratégies sont supérieurs à ceux du cas initial.

Nous présentons à présent les effets de chaque action élémentaire, séparée par item d'intervention, sur les critères de décision.

6.3.2.2.1 Isolation de la toiture

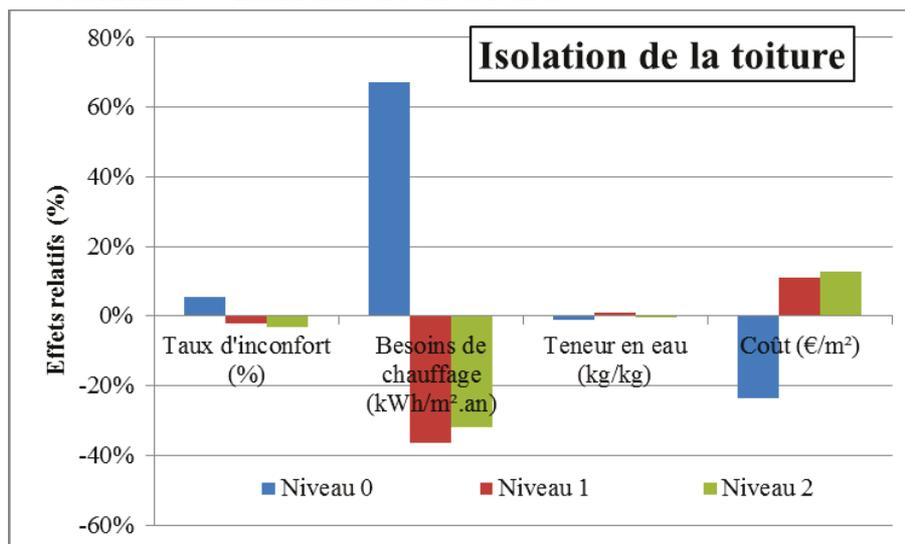


Fig. 6.4 : Effet des actions élémentaires d'isolation de la toiture sur les critères de décision

Les actions élémentaires ayant trait à l'isolation de la toiture affectent en moyenne faiblement le taux d'inconfort (de -3% à 5% d'effet) et la teneur en eau dans le tuffeau (de -1% à 1% d'effet au maximum) (Fig. 6.4).

Le coût subit des effets plus notables : de -24% à 13%. En termes de coût, le niveau 1 de l'isolation de la toiture est légèrement plus performant que le niveau 2 : 11% contre 13%.

Cependant, ce sont les besoins de chauffage qui sont le plus affectés par ces actions élémentaires : de -36% à 67%. L'effet du niveau 1 est d'ailleurs meilleur (-36%) que celui du niveau 2 (-32%).

### 6.3.2.2.2 Isolation du plancher

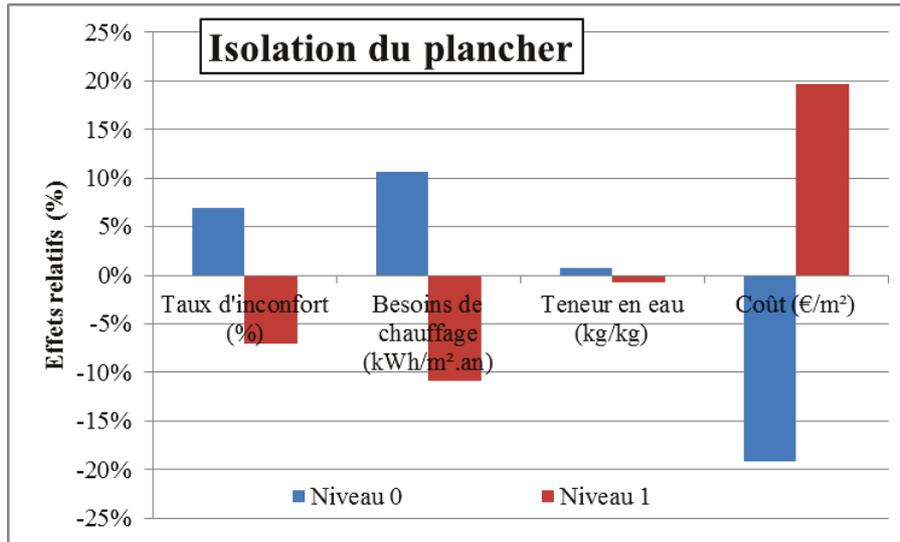


Fig. 6.5 : Effets des actions d'isolation du plancher sur les critères de décision

Les actions ayant trait à l'isolation du plancher n'affectent pas de manière significative la teneur en eau dans le tuffeau (-1 et 1%). Le taux d'inconfort et les besoins de chauffage sont moyennement affectés par ces actions élémentaires : de -11 à 11%. Le coût est le critère le plus impacté par les actions d'isolation du plancher : -19% à 20%.

Les valeurs des effets sont négatives pour les critères taux d'inconfort, besoins de chauffage et teneur en eau alors qu'elles sont positives pour le coût.

### 6.3.2.2.3 Isolation des parois

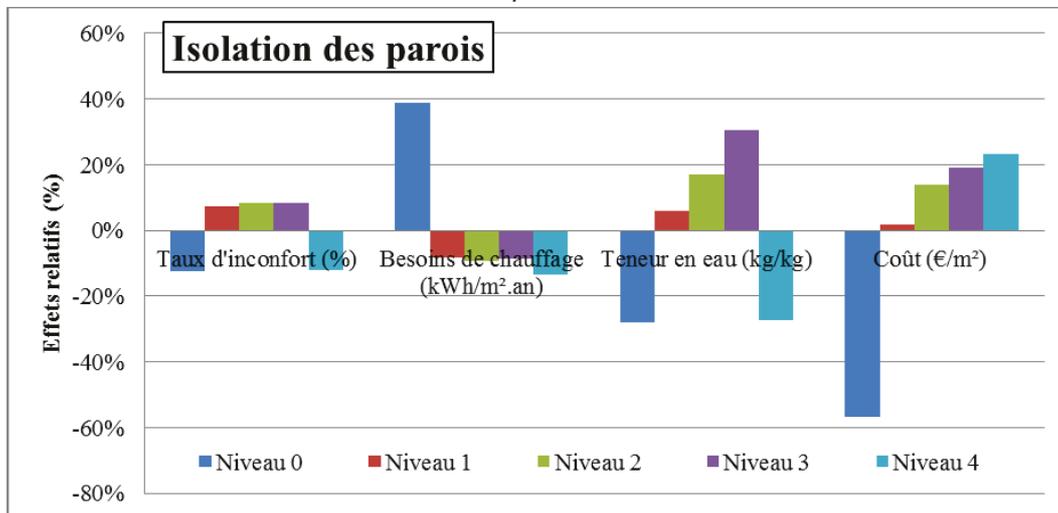


Fig. 6.6 : Effets des actions d'isolation des parois sur les critères de décision

L'ensemble des critères de décision est affecté par ces actions d'isolation des parois (Fig. 6.6). Suivant le type d'isolation des parois (niveaux), les effets présentent de nettes différences. En effet, pour le taux d'inconfort et la teneur en eau, les niveaux 0 et 4 donnent des effets négatifs alors que les autres niveaux fournissent des effets positifs. Pour les besoins de chauffage, les niveaux de 1 à 4 ont des effets proches (-13% à -8%). Pour le coût, les écarts sont importants pour les niveaux 1 à 4 : de 2 à 23%.

6.3.2.2.4 *Changement des fenêtres*

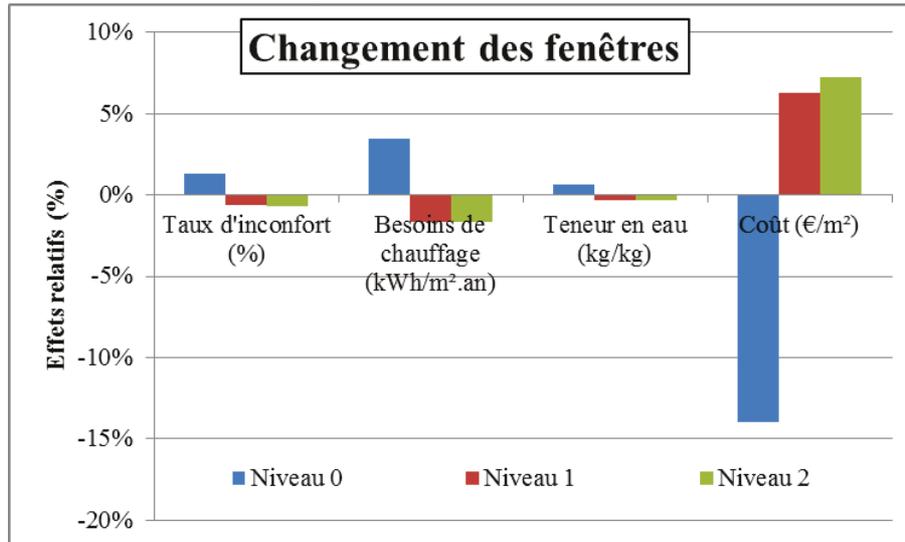


Fig. 6.7 : Effets du changement des fenêtres sur les critères de décision

Les actions élémentaires visant les modifications des fenêtres ont des effets relativement faibles sur les critères de décision (Fig. 6.7). Seuls les effets sur le coût sont supérieurs à 5% en valeur absolue.

6.3.2.3 *Analyse et discussions*

Le calcul des effets des actions élémentaires sur les critères de décision a mis en évidence que les actions d'isolation de la toiture permettent en moyenne une nette réduction des besoins de chauffage. Les effets sont toutefois légèrement meilleurs avec l'isolation de la toiture en combles perdus. Par ailleurs, cette action est moins pénalisante en termes d'investissement que l'action élémentaire d'isolation de la toiture en combles aménageables.

De ce point de vue, il apparaît plus pertinent de mettre en place une isolation de la toiture en combles perdus qu'en combles aménageables. Nous vérifierons si ce résultat est confirmé par l'application d'ELECTRE III dans les étapes suivantes.

L'action élémentaire de démolition et isolation du plancher permet quant à elle de réduire les besoins de chauffage (-11%) et d'améliorer légèrement le confort (-7%). Toutefois, elle présente un coût élevé pénalisant sur les critères de décision (20%).

Au niveau de l'isolation des parois, nous pouvons distinguer deux catégories d'actions :

- a. Niveaux 0 et 4 : absence d'isolation et ITE en fibre de bois.
- b. Niveaux 1, 2 et 3 : ITI en laine de verre, ouate de cellulose et fibre de bois.

La catégorie a a des effets bénéfiques sur le confort (-12%) et sur la teneur en eau (-28%) alors que la catégorie b dégrade en moyenne le confort (8%) et la teneur en eau (de 6% à 31%).

Cependant, l'ITE dégrade significativement le critère de coût : 23%.

Les actions élémentaires de changement des fenêtres ont peu d'effets sur les critères de décision par rapport aux autres actions élémentaires.

Par ailleurs, nous avons pu observer que le critère de teneur en eau dans le tuffeau n'est pas affecté de manière notable par les actions élémentaires qui concerne la toiture, le plancher et

les fenêtres (effet maximum de 1% en valeur absolue sur ces actions). Seules les actions d'isolation des parois ont des effets significatifs sur ce critère.

Au final, nous avons constaté qu'une action élémentaire peut avoir des effets contradictoires sur les critères. De ce fait, aucune action élémentaire ne se distingue comme la plus mauvaise ou la meilleure sur l'ensemble des critères.

### **6.3.3 Relations entre les indicateurs d'évaluation**

Nous venons de mettre en évidence qu'aucune action ne permet d'atteindre les résultats optimaux sur l'ensemble des indicateurs. La mise en place de compromis est donc nécessaire. Nous étudions les relations entre les indicateurs pour identifier celles qui sont conflictuelles de celles qui évoluent dans le même sens (Fig. 6.8).

La Fig. 6.8 met en relation les indicateurs d'évaluation par paires. Ainsi, il est possible de déceler des tendances par rapport à l'ensemble des stratégies de réhabilitation étudiées. Elle met en évidence que les conflits proviennent du critère investissement. Les relations observées avec le taux d'inconfort et les besoins de chauffage mettent en avant qu'aucune stratégie ne s'entend sur la minimisation des critères. Une stratégie optimale peut être obtenue sur les trois autres critères (Fig. 6.8).

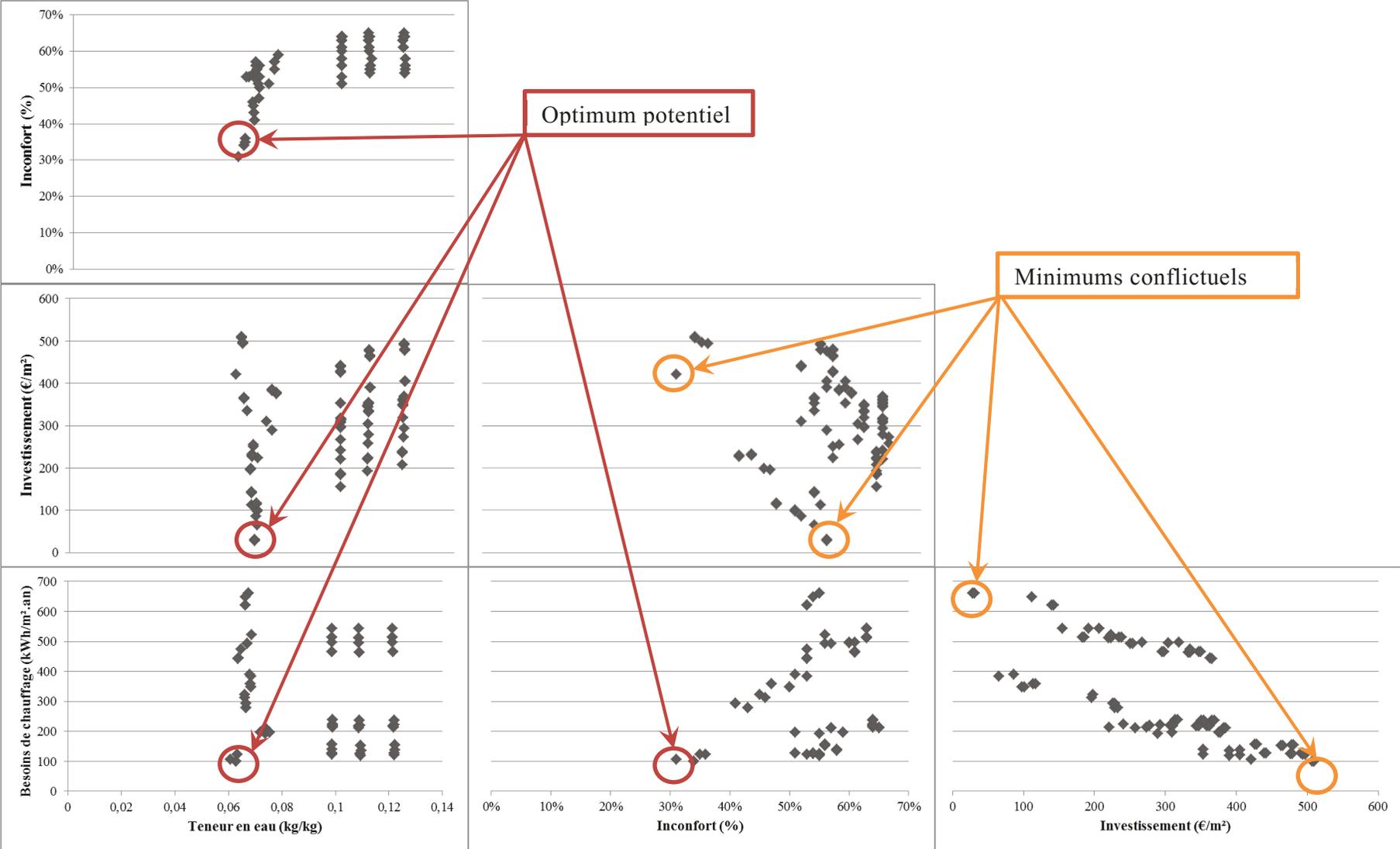


Fig. 6.8 : Relations entre critères de décision

### **6.3.4 Discussion**

Cette analyse des évaluations des stratégies, effectuée hors de la démarche de sélection d'une réhabilitation, a confirmé la nécessité d'utiliser une méthode d'analyse multicritère pour déterminer le meilleur compromis. En effet, même si certaines actions sont apparues globalement pénalisantes pour la majorité des indicateurs, leurs évaluations étaient bonnes sur les autres. Il n'est donc pas possible de les éliminer a priori. Par ailleurs, nous avons étudié ici chaque action élémentaire individuellement et nous avons négligé les interactions entre elles. Il est nécessaire de vérifier si la combinaison des actions élémentaires la plus pertinente correspond à l'addition des niveaux les plus efficaces pour chaque action.

## **6.4 Étape 7 : le classement des stratégies de réhabilitation**

Le classement des stratégies consiste en l'application d'ELECTRE III. Pour cela, nous commençons par déterminer les seuils de la méthode grâce à une analyse d'incertitude de nos critères puis nous appliquons ELECTRE III aux résultats obtenus pour l'ensemble des stratégies et détaillons les résultats suivant les présélections appliquées.

### **6.4.1 Détermination des seuils d'ELECTRE III**

#### **6.4.1.1 Méthodologie**

Les seuils de préférence d'ELECTRE III correspondent à l'incertitude maximum rencontrée lors de la comparaison de deux stratégies. Ils sont définis pour les trois critères de décision. L'incertitude maximum lors du calcul de la différence de deux stratégies sur un critère est donc l'objet de notre étude. Pour cela, nous appliquons une analyse d'incertitude par plan d'expérience ([Flory-Celini, 2008], [Macdonald, 2001]) sur une sélection de paramètres. Les interactions entre les paramètres ne sont pas considérées.

La démarche est la suivante :

1. Les paramètres sont sélectionnés à partir des résultats des analyses de sensibilité sur les sorties nécessaires au calcul des critères de décision (cf. Chapitre 4).
2. Les plages d'incertitude des paramètres retenus sont définies : le niveau 0 correspond à la valeur initiale, le niveau +1 est égal à la valeur maximale de la plage d'incertitude du paramètre.
3. Un plan d'expérience avec les paramètres sélectionnés est mené sur chaque stratégie de réhabilitation. Seuls les effets principaux sont étudiés (les interactions entre les paramètres ne sont pas considérées).
4. Les seuils sont calculés pour chaque critère en appliquant la démarche décrite dans la Fig. 6.9.

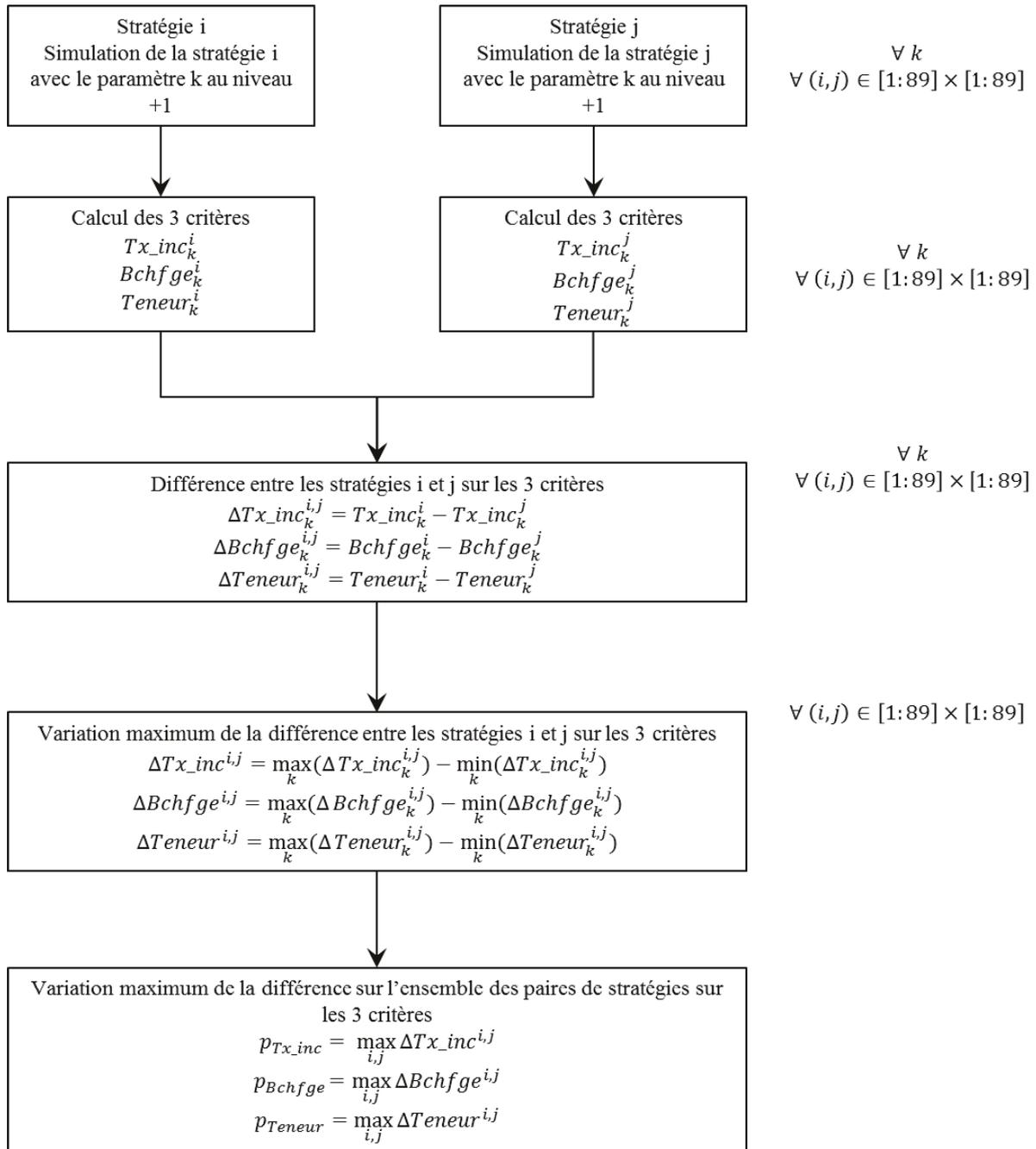


Fig. 6.9 : Démarche de détermination des seuils de préférence

Au Chapitre 4, nous avons dressé une liste des paramètres affectant les sorties du modèle nécessaires au calcul des critères de décision c'est-à-dire les besoins de chauffage sur une année, la température ambiante intérieure, l'humidité spécifique intérieure et la teneur en eau dans le tuffeau.

Dans cette partie, nous choisissons de nous concentrer uniquement sur les paramètres liés à l'enveloppe du bâtiment et à sa réhabilitation. Nous n'étudions pas ceux liés au modèle (coefficients de convection, coefficients d'infiltration, etc.) ni ceux liés à l'usage du bâtiment (gains internes, température de consigne, etc.).

Ainsi, d'après le Tableau 4.8 et les résultats obtenus sur l'analyse de sensibilité de l'humidité intérieure menée au 4.3.3, les paramètres retenus sont :

- Les caractéristiques des matériaux :
  - o Épaisseur ;
  - o Conductivité thermique ;
  - o Isotherme de sorption ;
  - o Coefficient de résistance à la diffusion ;
  - o Teneur en eau initiale.
- Les paramètres du renouvellement d'air :
  - o Surface équivalente de fuite ;
  - o Débit de ventilation.

Les plages d'incertitude sont déterminées à partir de la connaissance expérimentale que nous avons des paramètres [Spitz, 2013], [Künzel, 1998] et sont données pour chaque catégorie de paramètres dans le Tableau 6.9.

**Tableau 6.9 : Incertitude des paramètres du modèle**

<b>Paramètres</b>	<b>Incertainces</b>
<b>Épaisseur des matériaux</b>	+ 15%
<b>Teneur en eau initiale des matériaux</b>	+ 30%
<b>Courbe de sorption des matériaux</b>	+ 10%
<b>Résistance à la diffusion des matériaux</b>	+ 10%
<b>Conductivité thermique des matériaux (sauf tuffeau)</b>	+ 10%
<b>Conductivité thermique du tuffeau</b>	+ 20%
<b>Surface équivalente de fuite</b>	+ 50%
<b>Débit de ventilation</b>	+ 30%

#### 6.4.1.2 Résultats et discussion

Toutes les paires de stratégies de réhabilitation (S\_0000 avec les 89 autres stratégies et ainsi de suite) soit 3872 combinaisons ont été étudiées et ont permis le calcul des seuils de préférence des trois critères : Besoins de chauffage, Taux d'inconfort et Teneur en eau (Tableau 6.10).

**Tableau 6.10 : Variation maximum de la comparaison entre deux stratégies - Seuils de préférence**

	<b>Maximum de variation</b>
<b>Inconfort (%)</b>	7
<b>Besoins de chauffage (kWh/m<sup>2</sup>.an)</b>	75
<b>Teneur en eau (kg/kg)</b>	0,02

Nous définissons les seuils d'indifférence comme la valeur à partir de laquelle le décideur considère une différence notable entre les solutions (5.2.2.2).

Pour l'inconfort, le seuil d'indifférence est fixé à 3%. Dans le cas du scénario d'occupation choisi, le bâtiment est occupé pendant 6672 heures. Un seuil de 3% équivaut à 200 heures soit environ 8 jours. En deçà, nous considérons que l'occupant ne ressentira pas la différence. Il est difficile de déterminer en dessous de quel seuil le décideur ne détectera pas de différence sur les besoins de chauffage. Les unités de calcul des besoins en énergie ne parlent pas au plus grand nombre. Ainsi, pour évaluer ce seuil, nous avons monétarisé cet indicateur. Si nous considérons l'électricité comme énergie, 1 kWh = 0.1372 € (EDF-Suez) en moyenne. Pour un bâtiment de 100 m<sup>2</sup>, une réduction de 150 € de la facture énergétique paraît être un minimum

acceptable à partir duquel une alternative sera considérée comme plus avantageuse qu'une autre. Pour un tel bâtiment, cela équivaut à environ 10 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Le choix du seuil d'indifférence de la teneur en eau du tuffeau est arbitrairement arrêté à 0,005 kg/kg.

#### 6.4.1.3 Synthèse des seuils pour l'application d'ELECTRE III

L'analyse d'incertitude que nous avons menée dans les paragraphes précédents nous a permis de définir les seuils de préférence de la méthode. Les seuils d'indifférence et de veto ont été construits suivant notre ressenti vis-à-vis de chaque critère. Nous avons vu ici que la définition des seuils comprend une part de subjectivité dont l'étude est nécessaire pour fiabiliser les résultats a posteriori.

Le Tableau 6.11 synthétise les seuils utilisés pour l'application d'ELECTRE III à notre cas d'étude.

**Tableau 6.11 : Seuils de la méthode ELECTRE III**

Indicateur	Inconfort	Besoins de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Teneur en eau (kg/m <sup>3</sup> )	Investissement (€/m <sup>2</sup> )
<b>Seuils</b>				
<b>Indifférence</b>	0,03	10	0,005	10
<b>Préférence</b>	0,07	70	0,02	50
<b>Veto</b>	0,4	200	0,1	200

#### 6.4.2 Application d'ELECTRE III

L'objectif de ce chapitre est de vérifier la pertinence du processus de décision. Cette étape se concentre sur l'obtention du classement des stratégies. Dans notre démarche de validation du processus, nous nous attachons ici à vérifier la pertinence d'une présélection des stratégies de réhabilitation. Dans un premier temps, le classement sans présélection est analysé de manière complète puis il est comparé aux cas avec présélection définis au paragraphe 6.2.1.

Les seuils définis au paragraphe précédent sont conservés pour l'ensemble de l'analyse.

##### 6.4.2.1 Résultats et discussion du classement des stratégies en l'absence de présélection

Le classement des 89 stratégies a été obtenu grâce à l'outil informatique d'ELECTRE III. Il s'étend sur 26 rangs dont les cinq premiers sont donnés dans le Tableau 6.12. Le classement complet est donné en Annexe E. Par ailleurs, la Fig. 6.10 représente le graphique de Simos de ce classement.

**Tableau 6.12 : Classement des stratégies de réhabilitation - sans présélection (5 premiers rangs)**

Rang	Stratégies
1	S_1040 S_1110 S_2001 S_2002 S_2040
2	S_1000 S_1001 S_1002 S_1010 S_1101 S_1102
3	S_1100 S_2000 S_2010 S_2100
4	S_2101 S_2110
5	S_1020 S_2140

D'après le Tableau 6.12 les stratégies les mieux classées comprennent une action élémentaire affectant l'isolation de la toiture (en combles aménageables ou perdus). En effet, sur les cinq premiers rangs, seules des stratégies avec ces actions élémentaires sont positionnées. Par ailleurs, nous pouvons aussi constater l'absence de stratégies avec l'action élémentaire « ITI par fibre de bois » et l'action « ITI par ouate de cellulose » apparaît uniquement au rang 5. Enfin, aucune stratégie comprenant une ventilation mécanique n'apparaît bien classée.

La Fig. 6.10 permet d'identifier les stratégies les moins bien classées. Elles comprennent toutes l'action élémentaire « ITI par fibre de bois ».

Par ailleurs, nous constatons que cinq stratégies sont incomparables : S\_0001, S\_0002, S\_0100, S\_0101 et S\_0102. Elles sont difficilement classables vis-à-vis des autres. Toutefois, elles ne modifient pas de manière significative le bâtiment car elles comprennent uniquement le changement des fenêtres et/ou l'isolation du plancher bas. Ainsi, même si ces stratégies sont incomparables, elles ont un intérêt limité dans un projet de réhabilitation complet et peuvent donc ne pas être prises en compte.

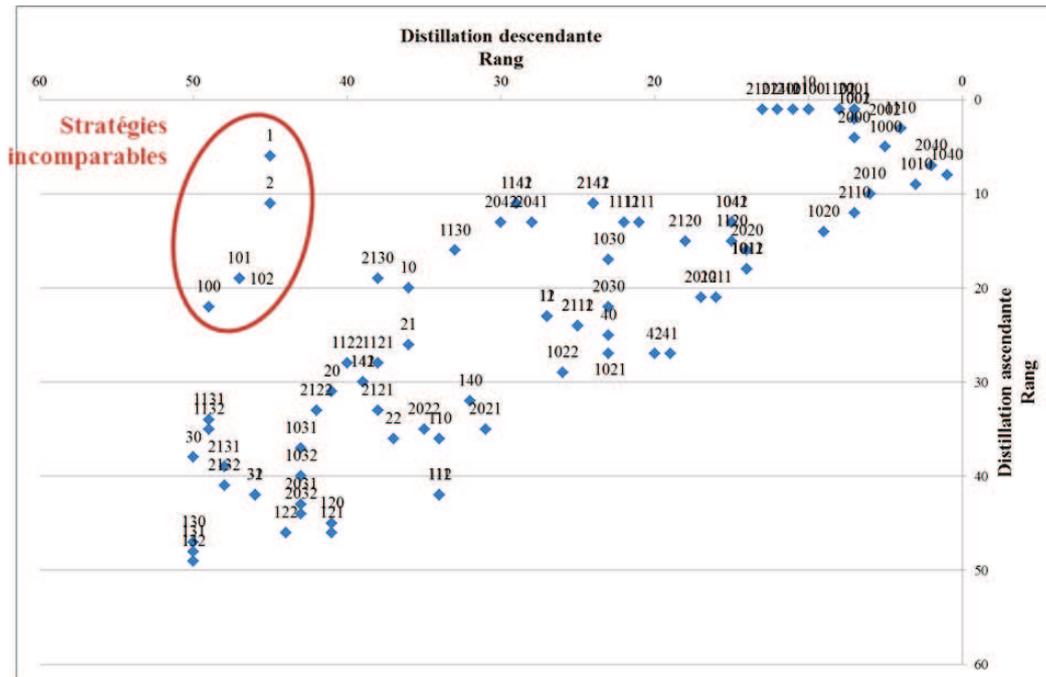


Fig. 6.10 : Graphique de Simos du cas simplifié

Cinq stratégies sont positionnées au premier rang dans le classement (Tableau 6.13). Leurs évaluations sont variables suivant les critères ce qui souligne les compromis nécessaires.

Tableau 6.13 : Évaluations des stratégies classées au rang 1 - Cas sans présélection des stratégies

	Taux d'inconfort (%)	Besoins de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Teneur en eau (kg/kg)	Investissement (€/m <sup>2</sup> )
S_1110	53	122	0,0987	353
S_1040	55	192	0,0739	289
S_2040	51	197	0,0719	382
S_2001	47	359	0,0682	114
S_2002	47	359	0,0682	117

Trois catégories de stratégies peuvent être distinguées :

- Celles mauvaises sur un indicateur et bonnes sur les autres (S\_2001 et S\_2002) ;
- Celles moyennes sur trois indicateurs et mauvaises sur le dernier (S\_2040 et S\_1040) ;
- Celle mauvaise sur trois indicateurs et très bonne sur le dernier (S\_1110).

Concernant le positionnement de l'ITI en fibre de bois, lors de l'étude des effets des niveaux d'action élémentaire (paragraphe 6.3.2.2), nous avons pu noter que cette technique provoque une nette dégradation de l'indicateur teneur en eau dans le tuffeau (+31%). D'après l'évolution de la teneur en eau calculée par le modèle, la fibre de bois ne permet pas au tuffeau de sécher aussi rapidement que les autres alternatives. Par ailleurs, il s'agit d'une technique au coût élevé. Les évaluations des stratégies comportant cette action sont donc dégradées sur les indicateurs teneur en eau dans le tuffeau et investissement.

Ces deux critères peuvent expliquer le mauvais classement de ces stratégies. Toutefois, ces résultats ne sont pas cohérents avec ce qui est constaté sur le terrain où nous avons pu observer une importante utilisation de ce matériau sans retours d'expérience négatifs.

#### 6.4.2.2 Résultats et discussion du classement des stratégies avec présélection

##### 6.4.2.2.1 Cas n°1 : aménagement des combles

Avec cette contrainte, le nombre de stratégies simulées et classées diminue de 89 à 60. Le classement des cinq premiers rangs est donné dans le Tableau 6.14 :

**Tableau 6.14 : Cinq premiers rangs du classement avec présélection**

Rang	Stratégie
1	S_2001, S_2002
2	S_2000, S_2100
3	S_2040, S_2101
4	S_2010, S_2102
5	S_2110, S_2140

Parmi ces stratégies, les conclusions sont similaires au cas sans présélection : toutes les alternatives les mieux classées comprennent l'action « isolation des combles » et aucune ne met en œuvre les trois actions affectant la perméabilité à l'air. Le classement des stratégies est peu affecté par la présélection malgré quelques variations de rangs.

##### 6.4.2.2.2 Cas n°2 : préservation de la façade apparente

Le nombre de stratégies considérées si l'ITE est éliminée est de 72. Le Tableau 6.15 donne les cinq premiers rangs avec ces contraintes.

**Tableau 6.15 : Cinq premiers rangs avec présélection (cas n°2)**

Rang	Stratégies
1	S_1010 S_1110 S_2001 S_2002
2	S_1000 S_1001 S_1002 S_1101 S_1102 S_2010
3	S_1100 S_2000 S_2100 S_2110
4	S_1020 S_2101
5	S_1120 S_2020 S_2102

Le classement des stratégies est très peu modifié par rapport à l'absence de présélection. Les deux premiers rangs présentent les mêmes stratégies avec quelques inversions de rangs.

### 6.4.2.2.3 Discussions sur la présélection

Les deux cas avec présélection présentent des contraintes différentes. Dans le cas n°1 (aménagement des combles), il n'y a aucune possibilité d'aller à l'encontre de la contrainte. Dans le cas n°2 (volonté du décideur de préserver sa façade apparente sans obligation réglementaire), il est possible de proposer des stratégies qui ne respectent pas cette contrainte car le décideur peut changer d'avis.

Pour les deux cas de présélection, les avantages sont une réduction du nombre de stratégies à simuler et à étudier. Dans le cas n°1, nous assistons par ailleurs à une simplification du classement avec deux stratégies au rang 1 au lieu de 5. Cependant, le classement évolue avec cette présélection.

Dans le cas n°2, l'inconvénient est que des stratégies pertinentes ont été éliminées du classement (deux stratégies avec ITE sont classées au rang 1).

Ainsi, pour que l'aide à la décision remplisse correctement son rôle de recommandation, la présélection d'un panel de stratégies en fonction des contraintes du bâti doit être réalisée avec précaution. Certes, elle permet de réaliser un gain de temps significatif en termes de modélisation et d'évaluation. Il est donc pertinent d'établir ce tri si les besoins et/ou contraintes ne sont pas négociables. Cependant, nous rappelons que l'objectif de notre démarche est de proposer une aide à la décision et donc d'informer le décideur sur l'ensemble des possibilités pertinentes qui s'offre à lui y compris celles qui ne lui apparaissent pas convenables.

Il faut donc être vigilant sur cette étape de présélection.

## 6.5 Étape 8 : l'analyse de robustesse

Avant d'établir des recommandations vis-à-vis des stratégies les plus pertinentes mises en évidence au paragraphe précédent, la stabilité du classement par rapport à la définition des seuils est vérifiée. Comme précisée dans la démarche opérationnelle, cette étape est réalisée séparément sur chaque catégorie de seuils.

### 6.5.1 Seuils d'indifférence

Nous étudions si le rang de chaque stratégie varie avec les jeux de seuils d'indifférence. Pour cela, le rang moyen et l'écart-type des rangs obtenus sont calculés sur l'ensemble des jeux de seuils testés décrits dans la démarche (Partie 3).

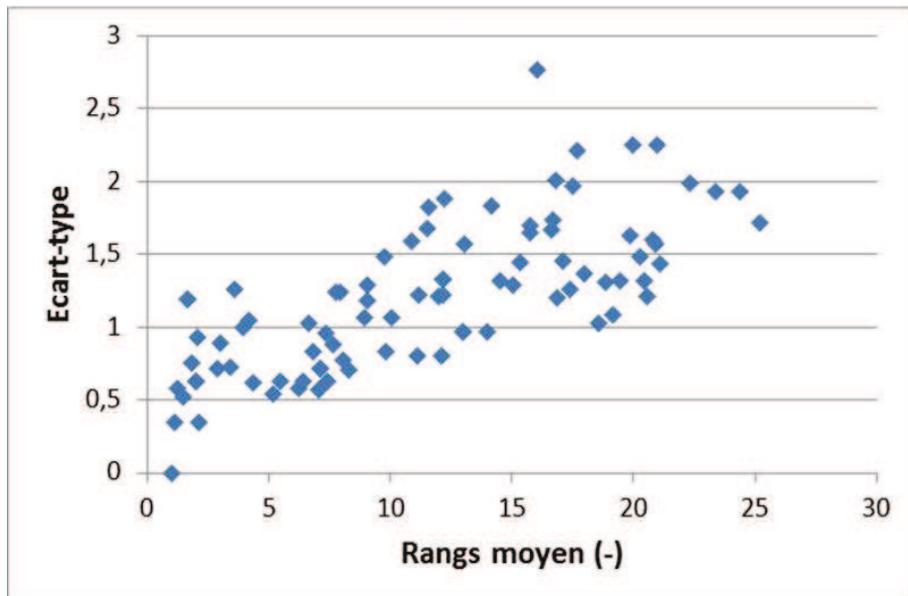


Fig. 6.11 : Écart-type des rangs en fonction du rang initial – Robustesse aux seuils d'indifférence

L'écart-type de variation du rang augmente avec le rang moyen (Fig. 6.11) : les premiers rangs du classement sont donc stables.

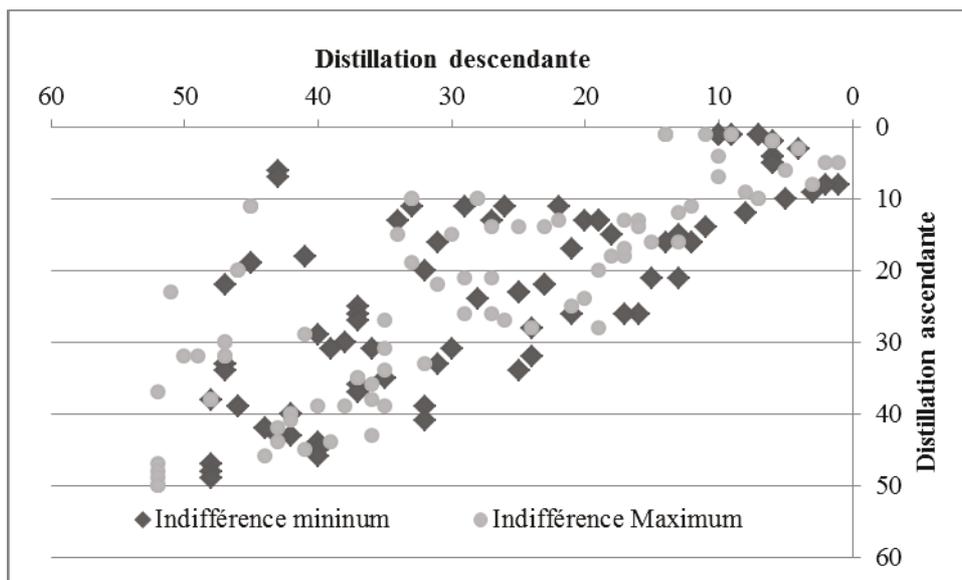


Fig. 6.12 : Graphique de Simos pour les jeux extrêmes de seuils d'indifférence

Nous comparons maintenant le cas où l'ensemble des seuils est positionné à la valeur minimum à celui où ils sont tous à la valeur maximum. Le graphique de Simos (Fig. 6.12) met en évidence qu'il y a peu d'écart entre les deux niveaux. Les actions incomparables sont identiques sur les deux niveaux.

Il y a une légère variation dans le classement mais celle-ci est faible sur les stratégies qui sont les mieux classées. Les conclusions de l'aide à la décision sont donc robustes aux variations des seuils d'indifférence.

### 6.5.2 Seuils de préférence

La même étude est menée avec les seuils de préférence. Les stratégies les mieux classées ont un rang plus stable aux variations des seuils de préférence que celles en bas de classement (Fig. 6.13).

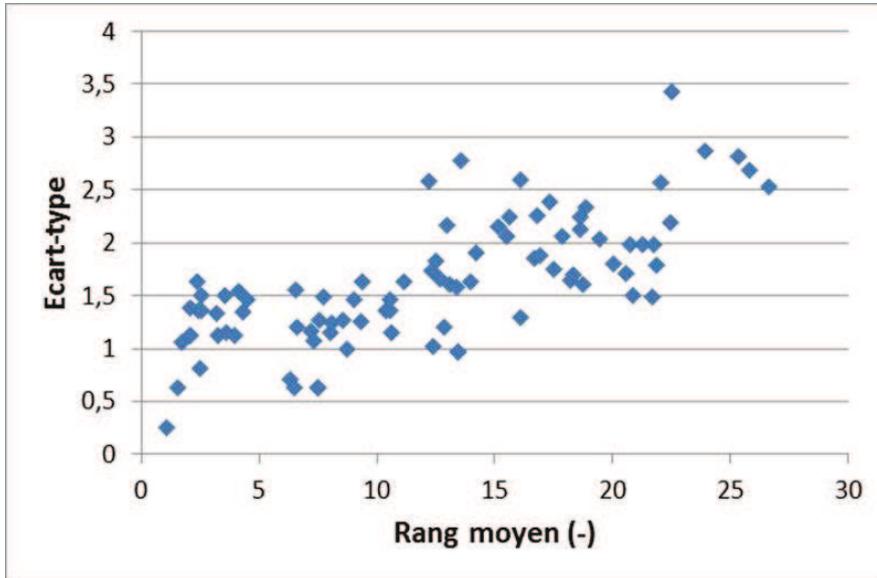


Fig. 6.13 : Écart-type des rangs en fonction du rang initial – Robustesse aux seuils de préférence

L'écart dans les distillations entre l'ensemble des seuils de préférence à leur valeur minimum et celles où ils sont égaux aux maximums est plus significatif que pour les seuils d'indifférence (Fig. 6.14).

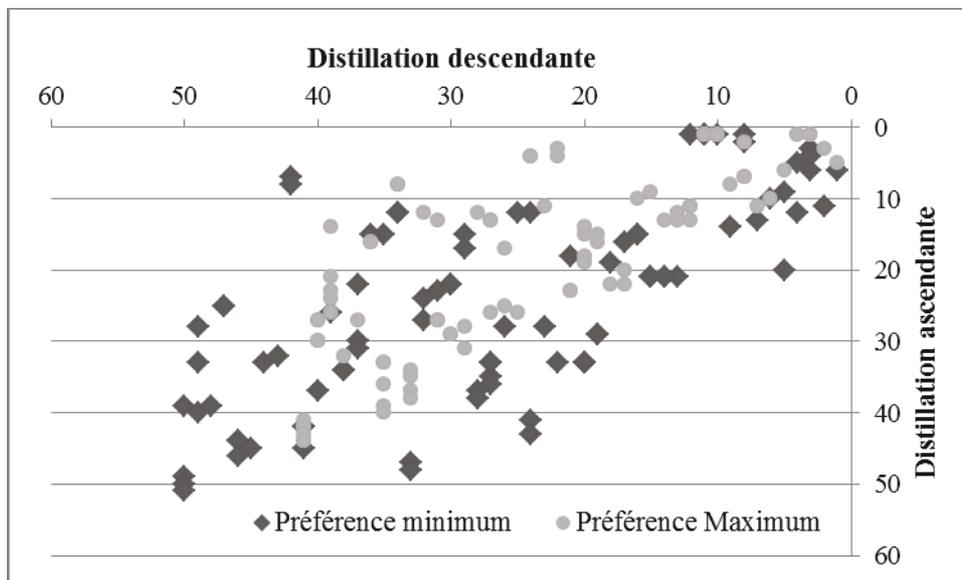


Fig. 6.14 : Graphique de Simos pour les jeux extrêmes des seuils de préférence

Les seuils de préférence présentent un effet plus important sur le classement que les seuils d'indifférence. Pour les valeurs que nous avons considérées, les alternatives les mieux classées sont robustes au contraire des dernières dont les rangs peuvent varier significativement.

Les seuils de préférence sont assimilés à l'incertitude maximum étudiée sur les indicateurs. Ainsi, la réduction de l'incertitude de calcul des indicateurs permet d'obtenir un classement

plus étalé ce qui souligne une comparaison des alternatives plus évidente : il y a moins de paires de stratégies indifférentes.

### 6.5.3 Seuils de veto

Les variations que nous avons imposées aux seuils de veto entraînent une très faible variation du classement. L'écart-type de variation des rangs ne dépasse pas 1,6 (Fig. 6.15). Le classement apparaît donc robuste vis-à-vis des seuils de veto.

Contrairement, aux deux seuils précédents, il n'y a pas d'évolution de l'écart-type avec le rang moyen. Il s'agit donc de l'ensemble du classement qui est robuste.

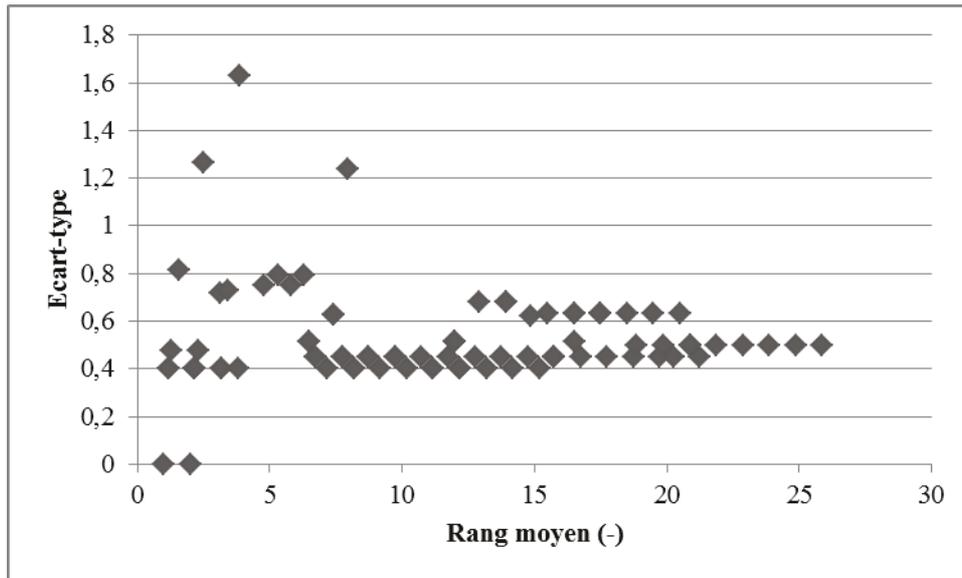


Fig. 6.15 : Écart-type des rangs en fonction du rang moyen - Robustesse aux seuils de veto

### 6.5.4 Conclusions

L'analyse de robustesse que nous avons menée sur les différents seuils a mis en évidence que le classement des stratégies est stable. Toutefois, les seuils de préférence et d'indifférence entraîne quelques variations principalement sur la fin du classement mais sans bouleversement de celui-ci.

Par ailleurs, la réduction de l'incertitude des critères de décision, soit des seuils de préférence, permet d'étaler le classement en éliminant des situations d'indifférence.

Les recommandations qui vont être données dans la suite seront donc fiables sur les variations des seuils que nous avons choisies.

## 6.6 Étape 9 : les recommandations

La mise en place de la démarche de sélection des stratégies de réhabilitation sur le cas simplifié permet d'établir des recommandations concernant les stratégies de réhabilitation à mettre en place :

- L'ITI en fibre de bois semble à proscrire sur ce bâtiment à cause de ses mauvaises performances sur la teneur en eau du tuffeau et de son coût élevé ;
- L'isolation de la toiture est une action élémentaire prioritaire car elle semble avoir de bonnes performances sur les besoins de chauffage ;
- La mise en place des trois actions affectant la perméabilité à l'air du bâtiment n'est pas pertinente.

Cinq stratégies sont identifiées comme les plus pertinentes et présentent des évaluations très variables sur les critères. Toutefois, la stratégie S\_1040 (isolation de la toiture en combles perdus et ITE en fibre de bois) est la plus stable du classement.

### 6.7 Conclusions

Un des objectifs de ce chapitre était de valider le processus de décision qui a été établi dans les parties précédentes. Les préconisations obtenues par ELECTRE III sur les stratégies de réhabilitation ont été comparées aux résultats d'une analyse simplifiée des critères de décision. Les stratégies considérées comme pertinentes par le processus de décision sont clairement identifiées ce qui n'est pas le cas avec l'analyse simplifiée qui fournit des tendances. Par ailleurs, le classement distingue des solutions qui seraient considérées comme équivalentes par l'analyse simplifiée. Les recommandations sont toutefois cohérentes entre les deux méthodes. Cependant, une hypothèse de modélisation a nettement impacté le classement : l'évolution de la perméabilité à l'air et l'installation d'une ventilation mécanique. Le choix que nous avons fait pénalise l'installation de la ventilation ce qui va à l'encontre des préconisations sanitaires. Il y a donc ici une limite au processus liée à la modélisation des bâtiments et des stratégies à moins d'ajouter un nouveau critère d'analyse de la qualité de l'air intérieur.

Cependant, une étape de ce processus est apparue problématique. Il s'agit de la définition des seuils d'ELECTRE III. En effet, cette étape nécessite des ressources importantes en modélisation pour être obtenue de manière fiable en un temps raisonnable. L'analyse d'incertitude qui a été menée ici pour construire ces seuils est simplifiée. L'obtention de résultats plus précis nécessiterait des moyens plus importants. Par ailleurs, les autres seuils de cette méthode présentent une forte subjectivité qui pose question sur les recommandations. L'analyse de robustesse est alors l'étape indispensable car sans elle, aucune recommandation sur les stratégies ne pourrait être établie.

Une autre étape du processus se devait d'être vérifiée : la présélection des stratégies de réhabilitation. Nous avons pu identifier des avantages et des inconvénients à ces filtres. Certes, ils permettent de simplifier le classement et de gagner du temps. Cependant, ils peuvent pénaliser le travail de recommandation dans lequel nous nous inscrivons. En effet, ils peuvent éliminer des stratégies pertinentes sur la base de potentiels a priori. Il s'agit donc d'une étape utile mais à réaliser avec vigilance pour assurer le rôle de ce processus de décision.

En termes de réhabilitation du bâti en tuffeau à proprement parler, les résultats d'ELECTRE ont mis en évidence plusieurs points. Tout d'abord, sur ce cas simplifié, l'isolation thermique intérieure en fibre de bois est à proscrire. L'isolation de la toiture est l'action prioritaire identifiée sur ces cas. Au contraire de l'ITI, l'ITE est à favoriser. Cependant, il s'agit là d'un cas simplifié, les résultats seraient-ils identiques sur un bâtiment réel avec la complexité qui l'accompagne est la question à laquelle nous cherchons à répondre dans le chapitre suivant.

## **Chapitre 7      Application du processus de décision à un cas réaliste**

La vérification du processus sur le cas simplifié au chapitre précédent a mis en évidence que la démarche fonctionne avec toutefois quelques limites. La définition des seuils est fastidieuse et la présélection peut pénaliser au final le décideur. Par ailleurs, les recommandations ont été établies sur un cas simplifié éloigné de la complexité d'un bâtiment réel surtout lorsqu'il est ancien.

Ce chapitre a donc vocation à compléter l'application au cas simplifié en s'attendant cette fois-ci à un bâtiment à configuration réelle.

De la même manière que pour le chapitre précédent et en suivant les étapes définies dans la synthèse qui introduit la partie 3, la démarche de décision est appliquée à ce cas d'étude. Nous en profitons pour vérifier si l'extrapolation des seuils obtenus sur le cas simplifié permet d'assurer des recommandations fiables. Par ailleurs, nous comparons les recommandations obtenues in fine aux précédentes et aux retours d'expérience que nous avons pu avoir lors de nos visites.

## 7.1 Étapes 1 à 3 : le bâtiment avant réhabilitation

Le logement étudié dans ce chapitre est issu d'un bâtiment réel que nous avons visité (Cas E au chapitre 2). La géométrie de cet édifice est simplifiée pour pouvoir être modélisé en un temps raisonnable.

Un audit virtuel est réalisé pour décrire le bâtiment et ses contraintes. Le document reprend les observations réalisées in situ sur le cas E des visites.

### 7.1.1 Connaissance du bâtiment avant réhabilitation

Le bâtiment sélectionné est une maison individuelle construite en deux temps. La première, édifiée au 16<sup>ème</sup> siècle, est de type rural. Les murs sont en moellons montés au mortier terre/chaux/sable et eau d'une épaisseur de 70 cm. La seconde partie date du 19<sup>ème</sup> siècle, elle répond aux standards des maisons de maître. Elle est en pierre de taille de 22 cm d'épaisseur (Fig. 7.1).

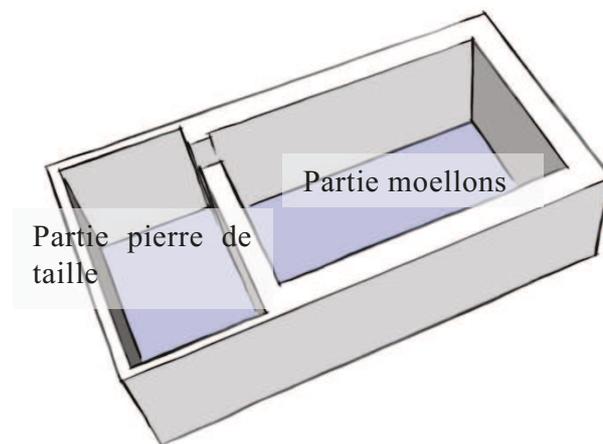


Fig. 7.1 : Coupe au niveau du plancher intermédiaire du cas d'étude

Le bâtiment est orienté Nord/Sud. Il dispose aussi de fenêtres sur la façade Ouest.

La maison se situe sur deux niveaux avec au rez-de-chaussée : le séjour et la cuisine et à l'étage : trois chambres, une salle de bain, des WC et une buanderie (Fig. 7.2). Des combles perdus se situent au-dessus de ces dernières pièces.

La toiture est en bon état et aucune intervention n'est prévue. Elle est isolée par environ 10 cm de laine de verre. L'épaisseur est toutefois approximative car elle n'a pu être vérifiée visuellement. Les fenêtres du premier étage et du séjour ont été changées : elles sont en double vitrage air. Celles du séjour ont été réalisées sur mesure. Au contraire, celles de la cuisine sont en simple vitrage et sont en très mauvais état. De nombreux défauts d'étanchéité y sont observés.

Le plancher bas est sur terre-plein. Il n'est pas isolé et se compose de carreaux de terre cuite sur une dalle de chaux.

Des remontées capillaires sont observées sur les parois Nord du logement au niveau de la cuisine (mur en pierre de taille) et du séjour (mur en moellons).

Les plans des deux niveaux du bâtiment réel sont donnés sur la Fig. 7.2

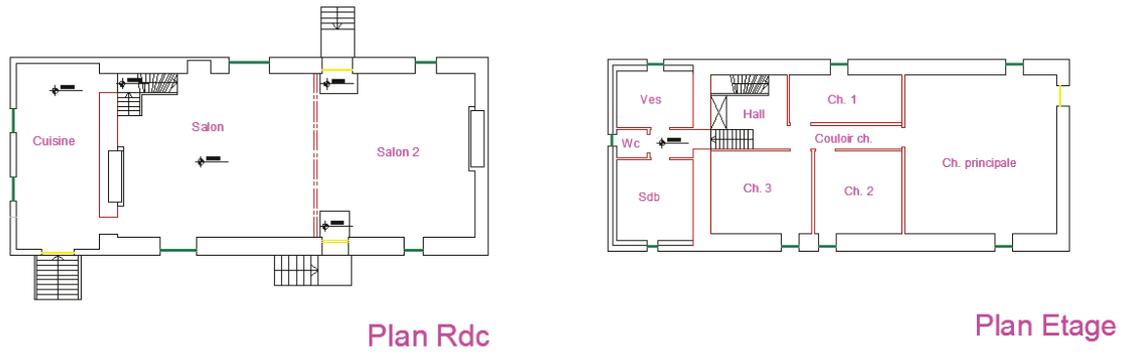


Fig. 7.2 : Plans des étages du cas réaliste

### 7.1.2 Modélisation du bâtiment avant réhabilitation

#### 7.1.2.1 Généralités sur le modèle

Le comportement du bâtiment est simulé sur cinq ans avec les conditions climatiques d'Angers (47°25'00''N – 0°31'23''W, France). Le pas de temps de calcul est de 3 minutes. Cette valeur permet de réduire le temps de calcul de la simulation tout en produisant des résultats aussi précis que pour un pas d'une minute.

Le cas d'étude est décomposé en six zones thermiques (Fig. 7.3) dont quatre sont occupées (cuisine, séjour, chambres et salle de bain).



Fig. 7.3 : Répartition des zones

La température de sol en contact avec le plancher est constante sur un mois et suit l'évolution de la Fig. 7.4.

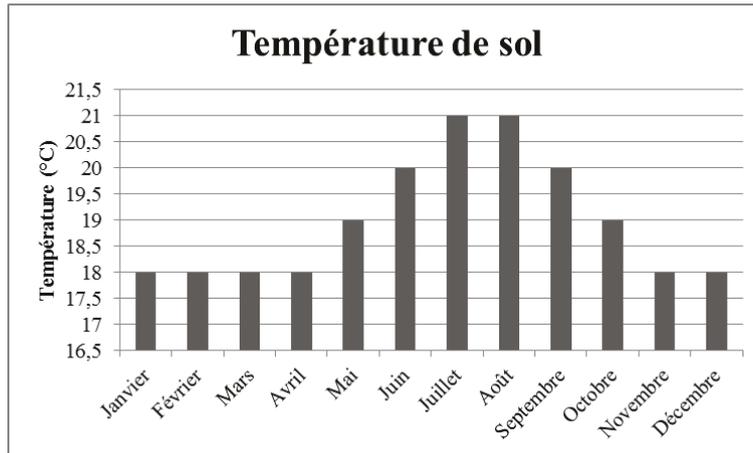


Fig. 7.4 : Température de sol suivant les mois de l'année

Un des objectif de la réhabilitation est la réduction des besoins de chauffage totaux du bâtiment ce qui correspond aux besoins de chauffage des quatre pièces occupées. Par ailleurs, le modèle génère au pas de temps horaire la température et l'humidité spécifique de ces quatre pièces pour calculer le taux d'inconfort. Enfin, la teneur en eau dans la partie tuffeau du mur nord de la cuisine (en pierre de taille) et celle de la partie tuffeau du mur nord du séjour (en moellons) sont calculées.

#### 7.1.2.2 Géométrie du bâtiment

Les caractéristiques des matériaux sont issues des bases de données de Wufi et d'EnergyPlus. De la même manière que pour les précédentes modélisations, les données concernant le tuffeau proviennent des mesures de K. Beck [Beck, 2006] et Dessandier [Dessandier, 2000] et du modèle de Beziat pour la conductivité thermique.

La complexité du mur en moellons a été traduite en juxtaposant des couches de tuffeau et de mortier. La Fig. 7.5 présente la distribution des différents matériaux pour obtenir une épaisseur de 70 cm. Bien que non représentative de la complexité en trois dimensions de cette paroi, cette géométrie permet de considérer les liaisons entre les différents matériaux. Le découpage en un nombre plus élevé de matériaux pour améliorer la traduction de cette complexité n'est pas possible car le maillage des différentes couches atteint ses limites. Le nombre de cellules concernant le tuffeau est trop important pour que les différentes grandeurs y soient calculées.

Cette définition géométrique est donc un compromis entre représentation de la réalité, temps de calcul et limites du modèle.

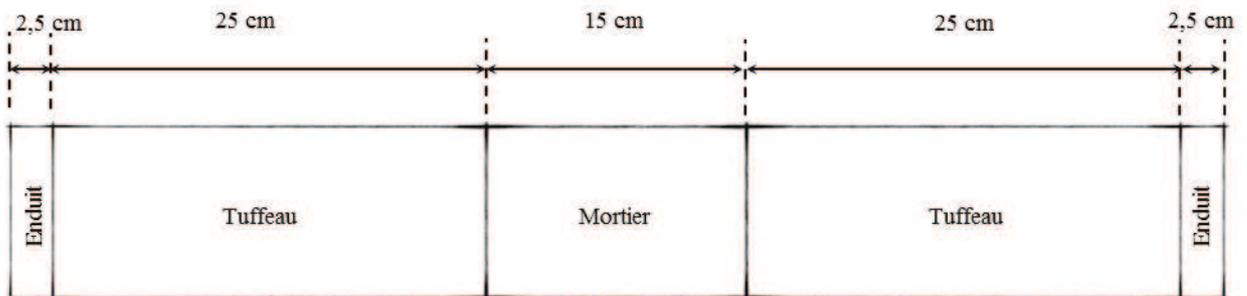


Fig. 7.5 : Distribution des matériaux composant le mur en moellons de tuffeau

Les fenêtres du séjour et de l'étage sont modélisées par du double vitrage air (4/16/4) et celles de la cuisine par du simple vitrage 4 mm.

La teneur en eau initiale dans le tuffeau est fixée à 0,2 kg/kg. Cette valeur élevée non mesurée a pour objectif de correspondre à un tuffeau en présence de remontées capillaires à l'instant initial.

Les coefficients de convection sont issus de la RT2005 et les coefficients de vapeur des parois proviennent de la documentation d'EnergyPlus comme pour le cas simplifié (Chapitre 6).

### 7.1.2.3 Occupation et renouvellement d'air

#### 7.1.2.3.1 Occupation

Les scénarios d'occupation des différentes pièces sont basés sur les scénarios SIREN [CSTB] car ils sont plus proches de l'occupation observée sur les bâtiments visités. Ces scénarios diffèrent selon les pièces. Ils sont donnés en annexe F.

La présence des occupants est modélisée grâce à des gains en termes de chaleur et d'humidité :

- Les gains de chaleur sont estimés à 5 W/m<sup>2</sup> en période d'occupation [RT2005] ;
- La production d'humidité est fixée à 40 g/h pour les pièces sèches (séjour et chambres) et à 60 g/h pour les pièces humides (cuisine et salle de bain). Ces sources équivalent à des gains latents respectivement de 28 W et 40 W [CSTB, 2009].

Les températures de consigne sont identiques dans l'ensemble des pièces et suivent le même scénario (Fig. 7.6). Le chauffage est considéré en fonctionnement sur l'année complète.

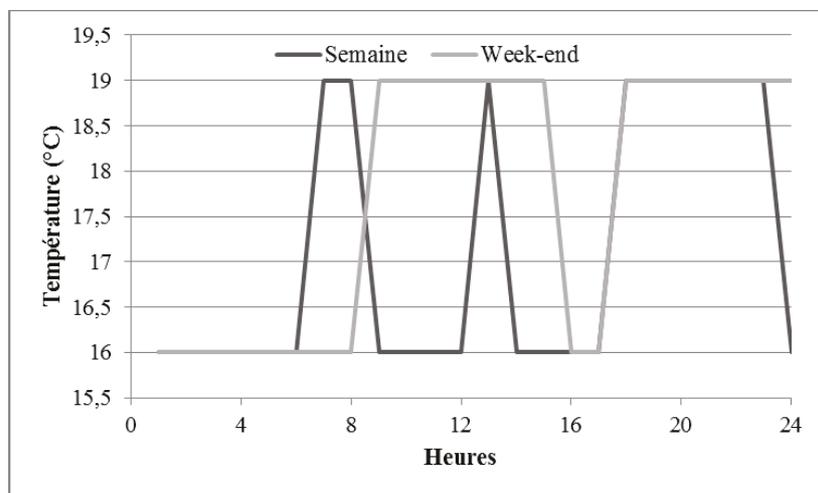


Fig. 7.6 : Scénario de chauffage

#### 7.1.2.3.2 Renouvellement d'air

Le modèle d'infiltration utilisé est identique à celui présenté au Chapitre 4. Avant travaux, la perméabilité à l'air a été mesurée sur le bâtiment réel :  $Q_{4Pa} = 4,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  pour une surface d'enveloppe de 269 m<sup>2</sup> soit une surface équivalente de fuite de 2076 cm<sup>2</sup>. Le choix a été fait de répartir cette surface de fuite dans les différentes pièces au prorata de leur surface déperditive (Tableau 7.1). En effet, même si l'audit a mis en évidence un très mauvais état des fenêtres de la cuisine, il n'est pas possible de déterminer les proportions réelles à attribuer aux différentes zones.

**Tableau 7.1 : Surface équivalente de fuite des pièces occupées**

Zones	Surface équivalente de fuite cm <sup>2</sup>
<b>Chambre</b>	805
<b>Salle de bain</b>	291
<b>Cuisine</b>	269
<b>Séjour</b>	713

Un taux d'infiltration constant de 1 vol/h est imposé dans les combles. Les ambiances du séjour et de la cuisine sont mélangées avec un débit de 0,1 vol/h de 10h à 17h. Les mêmes échanges sont considérés entre les chambres et la salle de bain. Ce phénomène correspond à l'ouverture des portes entre ces zones dans la journée.

### 7.1.3 Analyse des performances du bâtiment

Une analyse préliminaire du bâtiment avant réhabilitation est menée sur les indicateurs Besoins de chauffage, Taux d'inconfort et Teneur en eau pour identifier les points critiques et les avantages de ce bâtiment.

#### 7.1.3.1 Besoins de chauffage du bâtiment non réhabilité

Les besoins de chauffage du bâtiment sur la dernière année de simulation sont de 107 kWh/m<sup>2</sup>.an. Ce logement présente donc un besoin énergétique de chauffage compris dans les plages de consommations mesurées des bâtiments anciens (Chapitre 1).

Les besoins de chauffage pièces par pièces permettent d'identifier les plus déperditives (Tableau 7.2). Cette première analyse met en évidence que la cuisine et la salle de bain sont les deux pièces les plus consommatrices du logement. Il s'agit des deux zones avec des parois en tuffeau de 22 cm alors que le séjour et les chambres bénéficient des murs en moellons de 70 cm d'épaisseur. Ainsi, un des points critiques des besoins de chauffage est la paroi en pierre de taille de tuffeau.

**Tableau 7.2 : Besoins de chauffage du bâtiment non réhabilité par pièce**

Pièces	Besoins de chauffage en kWh/m <sup>2</sup> .an
<b>Cuisine</b>	160
<b>Séjour</b>	77
<b>Chambres</b>	108
<b>Salle de bain</b>	196

#### 7.1.3.2 Taux d'inconfort du bâtiment non réhabilité

Les taux d'inconfort en période d'occupation des différentes pièces sont calculés. Les périodes d'occupation de la chambre ne coïncident pas avec le scénario de chauffage. Elle est chauffée à 16°C la nuit alors qu'elle est occupée. Ces périodes ne sont toutefois pas considérées comme inconfortables au vu de l'activité pratiquée (sommeil).

Pour éliminer ces périodes du calcul du taux d'inconfort, l'inconfort thermique lié à une température trop faible n'est pas intégré au calcul. Il s'avère par ailleurs redondant avec les besoins de chauffage.

Le taux d'inconfort des différentes pièces occupées est calculé (Tableau 7.3). Par ailleurs, nous nous intéressons aux sources d'inconfort des différentes pièces (Tableau 7.3).

Tableau 7.3 : Confort hygrothermique annuel et du confort thermique estivale par pièce

	Taux d'inconfort	Inconfort thermique	Inconfort hygrique	Inconfort hygrothermique
Cuisine	19%	0%	19%	0%
Séjour	20%	0%	20%	0%
Chambre	29%	3%	23%	3%
Salle de bain	30%	0%	28%	1%

Les pièces au rez-de-chaussée ont un taux d'inconfort raisonnable : 20% alors que celles à l'étage sont plus inconfortables avec un taux proche des 30%.

Enfin, l'observation expérimentale du chapitre 1 sur le confort d'été se retrouve sur ce cas d'étude : la chambre, sous toiture, est la pièce qui présente le plus d'inconfort thermique. Les autres pièces dépassent très ponctuellement le seuil de 26°C.

Globalement ce bâtiment est donc confortable en été, un avantage qu'il est utile de conserver.

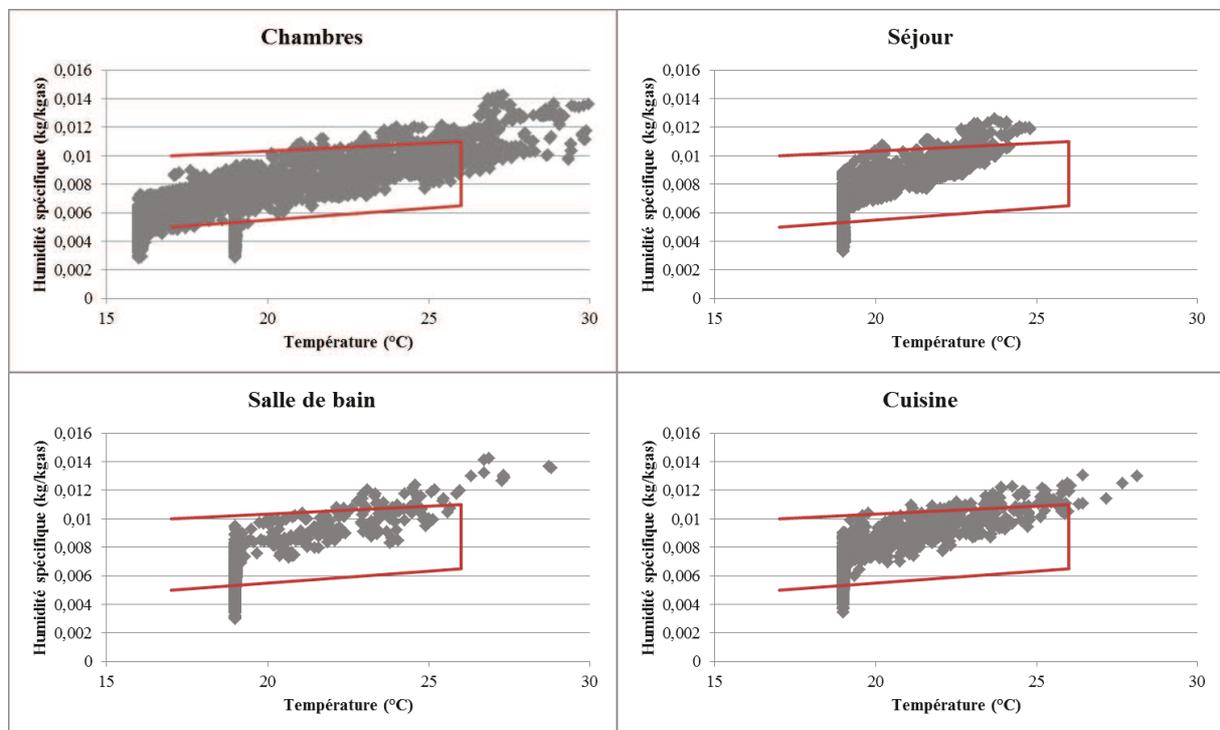


Fig. 7.7 : Diagrammes de confort hygrothermique des pièces occupées

Les diagrammes de confort hygrothermique (Fig. 7.7) mettent en évidence les sources d'inconfort principales qui ont pu aussi être soulevées par le Tableau 7.3 :

- Chambres : humidité trop élevée et humidité et températures trop élevées ;
- Séjour : humidité trop élevée ;
- Salle de bain : humidité trop élevée ;
- Cuisine : humidité trop élevée et humidité et températures trop élevées ponctuellement.

Comme pour les bâtiments instrumentés (Chapitre 3), la source principale d'inconfort est d'origine hygrique.

### 7.1.3.3 Évolution des teneurs en eau dans les parois non isolées

A la différence du cas simplifié étudié au Chapitre 6, le bâtiment réel est composé de deux types constructifs principaux : mur en pierre de taille et mur en moellons. La teneur en eau est analysée sur ces deux parois sur les cinq ans de simulation (Fig. 7.8). Nous rappelons que les remontées capillaires ne sont pas modélisées. Cette simulation permet l'étude de la capacité de séchage des parois.

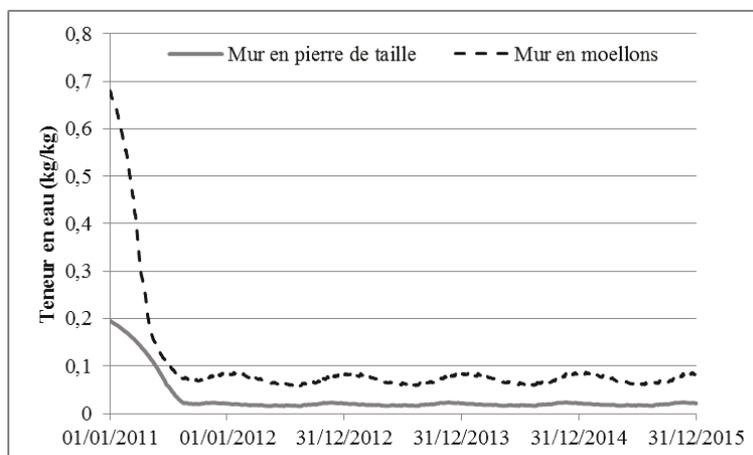


Fig. 7.8 : Évolution des teneurs en eau dans les parois en tuffeau

Les deux parois sont soumises à une teneur en eau initiale différente liées à la présence de mortier dans la paroi en moellons (teneur en eau élevée). Toutefois, leur évolution est similaire avec une nette baisse au cours de la première année pour se stabiliser dès la seconde. Le Tableau 7.4 synthétise les moyennes de teneur en eau et les fluctuations sur la dernière année de simulation.

Tableau 7.4 : Synthèse des teneurs en eau dans le tuffeau après 5 ans

	Pierre de taille	Moellons
<b>Moyenne (kg/kg)</b>	0,019	0,072
<b>Amplitude (kg/kg)</b>	0,007	0,028

La paroi en moellons atteint sa moyenne finale courant septembre de la première année alors que le mur en pierre de taille se stabilise en octobre. Ainsi, malgré une teneur en eau initiale élevée, le mur en moellons se stabilise légèrement plus rapidement que celui en pierre de taille.

Les fluctuations de la teneur en eau au cours d'une année présentent quelques différences entre les deux parois (Fig. 7.9) :

- Le maximum de teneur en eau est atteint courant décembre/janvier pour le mur en moellons et le minimum en juillet ;
- Le maximum de teneur en eau pour la paroi en pierre de taille se situe en novembre et le minimum est étalé de mai à août.

Il y a donc un déphasage entre les deux évolutions : le mur en pierre de taille atteint ses extremums environ un mois avant la paroi en moellons.

Par ailleurs, la variation de la teneur en eau est nettement plus élevée dans la paroi en moellons que dans celles en pierre de taille (Tableau 7.4).

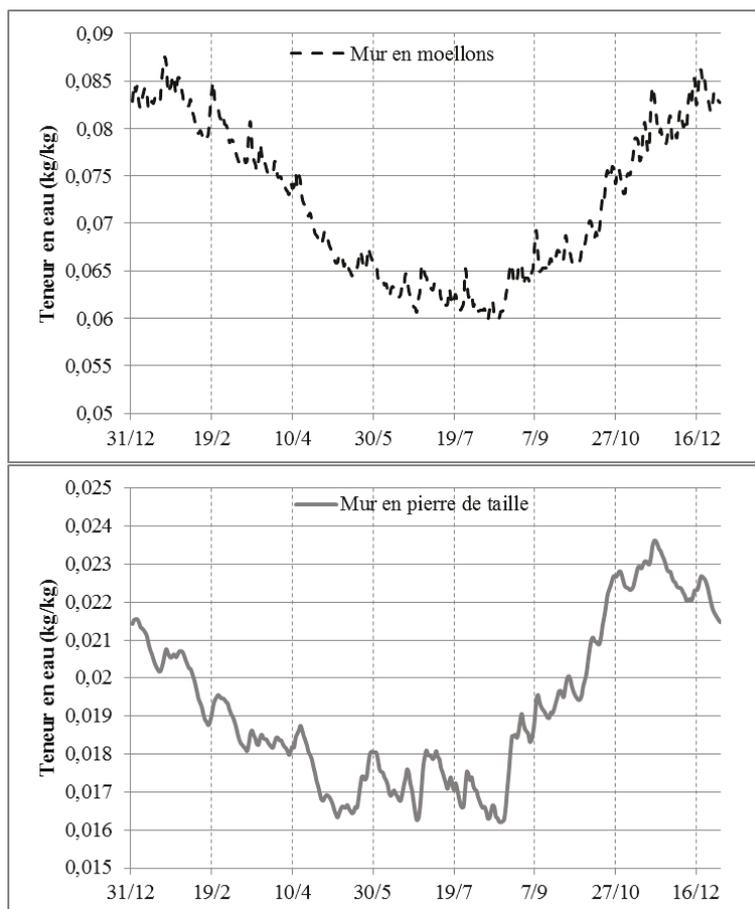


Fig. 7.9 : Évolutions des teneurs en eau sur la 5<sup>ème</sup> année

Il apparaît ainsi que les deux parois se stabilisent rapidement mais que la paroi en moellons peut contenir une importante quantité d'eau.

## 7.2 Étapes 4 et 5 : les stratégies de réhabilitation

### 7.2.1 Sélection d'un panel de stratégies de réhabilitation

Suivant les contraintes identifiées grâce à l'audit et les points critiques soulevés par l'analyse du comportement du bâtiment initial, certaines actions élémentaires sont éliminées et d'autres restreintes par rapport au cas simplifié.

En effet, l'audit a révélé que le plancher bas est en contact direct avec le sol et que la réhabilitation doit être réalisée en site occupé. La démolition du plancher et sa remise en place avec isolant sont donc éliminées.

Les menuiseries de la cuisine sont apparues en très mauvais état et en simple vitrage alors que celles de l'étage et du séjour ont été remplacées par du double vitrage. De ce fait, l'action « remplacement des fenêtres » se limite à celles de la cuisine.

Par ailleurs, l'analyse des besoins de chauffage avant réhabilitation préconise une action prioritaire sur les deux pièces en pierre de taille car elles présentent les déperditions les plus importantes. Le choix se porte donc sur la mise en place de trois configurations d'isolation possibles (Fig. 7.10). Ces configurations sont appliquées avec trois techniques différentes : deux par l'intérieur (laine de verre et fibre de bois) et une par l'extérieur (fibre de bois).

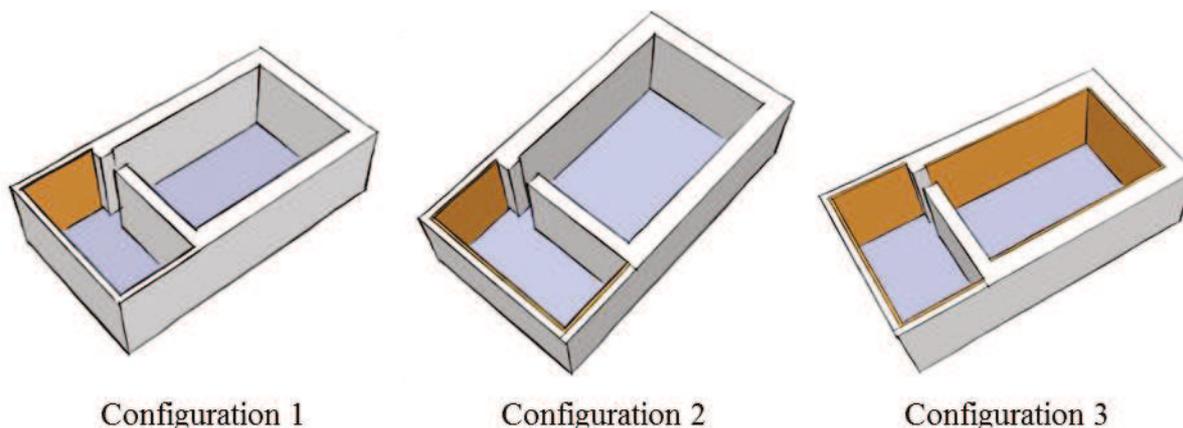


Fig. 7.10 : Configurations d'isolation (exemple d'une ITI)

La toiture est, a priori, déjà isolée. Toutefois, l'épaisseur de la laine de verre n'est pas certaine et nous avons vu au chapitre 6 qu'il s'agissait d'une action prioritaire sur le cas simplifié. Ainsi, sur ce cas d'étude, le remplacement de la laine de verre par un matériau avec une conductivité thermique plus faible (car plus récente) est étudié. L'épaisseur sur les rampants reste identique pour des questions de volume habitable. Pour les combles perdus, elle est augmentée de 10 à 20 cm.

L'ensemble des actions élémentaires sont combinées ce qui fait un total de 39 stratégies de réhabilitation possibles (Tableau 7.5).

Tableau 7.5 : Synthèse des actions élémentaires retenues

Action élémentaire	Niveau	Description
Isolation de la toiture	0	Pas de modification
	1	Remplacement de la laine de verre par de la laine de verre plus performante 10 cm en rampants (=) 20 cm en combles perdus (au lieu de 10 cm)
Remplacement des fenêtres	0	Pas de modification
	1	Double vitrage argon peu émissif dans la cuisine
Isolation des parois	0	Pas d'isolation
	1	ITI_LV (identique Chapitre 6)
	2	ITI_FB (identique Chapitre 6)
	3	ITE_FB (identique Chapitre 6)
Configuration d'isolation	0	Sans objet
	1	Murs Nord en pierre de taille (cuisine et salle de bain)
	2	Murs en pierre de taille (cuisine et salle de bain)
	3	Ensemble du bâtiment

La nomenclature adoptée correspond à celle du Chapitre 6 : la stratégie S\_abcd correspond à la réhabilitation comprenant :

- Le niveau a d'isolation de la toiture (entre 0 et 1) ;
- Le niveau b de remplacement des fenêtres (entre 0 et 1) ;
- Le niveau c d'isolation des parois (entre 0 et 3) ;
- Le niveau d de configuration d'isolation des parois (entre 0 et 3 et si c = 0 ; d = 0).

### 7.2.2 Modélisation des stratégies de réhabilitation

La modélisation des stratégies de réhabilitation reprend les mêmes hypothèses que pour le cas simplifié (Chapitre 6).

L'évolution de la perméabilité à l'air se base sur la même référence, ainsi quatre configurations de surface équivalente de fuite sont définies (Tableau 7.6).

**Tableau 7.6 : Configurations de surfaces de fuite**

Configurations		A	B	C	D
Surface de fuite (cm <sup>2</sup> )	Cuisine	269	175	118	69
	Séjour	713	464	315	182
	Chambres	805	524	356	206
	Salle de bain	291	189	128	74
Perméabilité à l'air (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )		4,3	2,8	1,9	1,1

Plusieurs hypothèses sont faites quant à l'impact des actions élémentaires sur l'étanchéité à l'air du bâtiment :

- La configuration 1 d'isolation des parois n'a pas d'impact ;
- Les configurations 2 et 3 d'isolation des parois ont le même effet ;
- L'isolation de la toiture a un effet sur l'étanchéité à l'air ;
- Le remplacement des fenêtres affecte la perméabilité.

Ces hypothèses permettent de déterminer la configuration de perméabilité à l'air en fonction des actions élémentaires réalisées (Tableau 7.7).

**Tableau 7.7 : Configurations de perméabilité à l'air suivant les actions élémentaires**

Toiture	Fenêtre	Parois configuration 1	Parois configuration 2	Parois configurations 3	Configuration (Tableau 7.6)
					A
X					B
X	X				C
X	X	X			C
X	X		X		D
X	X			X	D
X		X			B
X			X		C
X				X	C
	X				B
	X	X			B
	X		X		C
	X			X	C
		X			A
			X		B
				X	B

Une ventilation mécanique est intégrée au bâti dès lors que la perméabilité à l'air est inférieure à 1,4 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>, seuil de la RT2005, soit uniquement pour la configuration D. Les débits imposés sont ceux de l'arrêté de mars 1982 [Arrêté 1982].

## 7.3 Étape 6 : l'évaluation des stratégies de réhabilitation

La description de cette étape est succincte : les 39 stratégies de réhabilitation sont simulées et les critères de décision sont calculés :

- Le taux d'inconfort est calculé pour chacune des pièces occupées (paragraphe 7.1.3.2) ;
- Les coûts sont issus des mêmes bases tarifaires que le cas simplifié ;
- La teneur en eau moyenne sur la cinquième année est calculée séparément pour la paroi en pierre de taille et en moellons.

## 7.4 Étape 7 : le classement des stratégies de réhabilitation

ELECTRE III est appliquée aux évaluations précédentes. Les seuils considérés dans ce paragraphe sont issus du Chapitre 6 (Tableau 7.8). Les seuils du taux d'inconfort sont identiques pour chaque pièce. Les deux parois (pierre de taille et moellons) sont considérées de la même manière.

Tableau 7.8 : Seuils de la méthode ELECTRE - Cas réaliste

Indicateur \ Seuils	Inconfort	Besoins de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Teneur en eau (kg/kg)	Investissement (€/m <sup>2</sup> )
<b>Indifférence</b>	0,03	10	0,005	10
<b>Préférence</b>	0,07	70	0,02	50
<b>Veto</b>	0,4	200	0,1	200
<b>Poids</b>	1	1	1	1

Nous ne présentons ici que les 10 premiers rangs.

Tableau 7.9 : 10 premiers rangs du classement - Cas réaliste

Rang	Stratégies
1	S0132
2	S1100
3	S1131
4	S1032
5	S0100
6	S0111 S1111 S1121
7	S0121 S1000
8	S0112 S0131
9	S1031
10	S1011



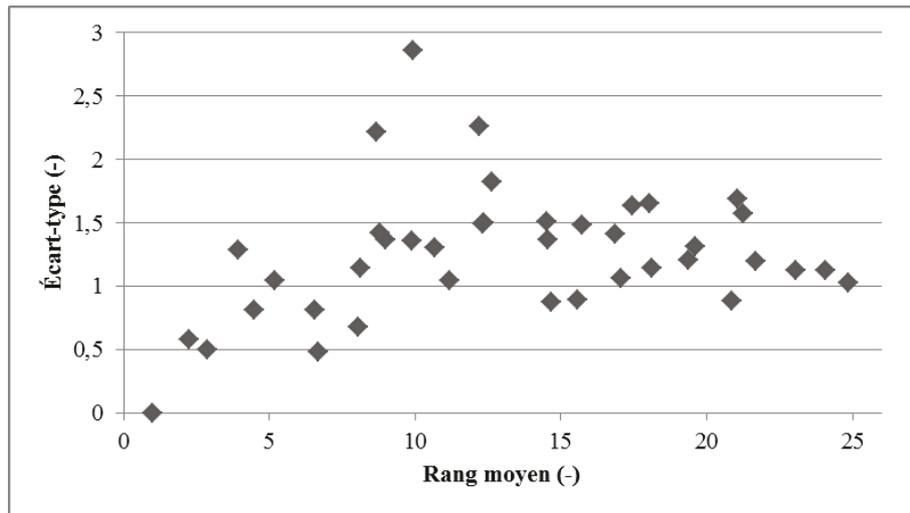


Fig. 7.12 : Écart-type des rangs en fonction du rang moyen – Robustesse aux seuils d'indifférence

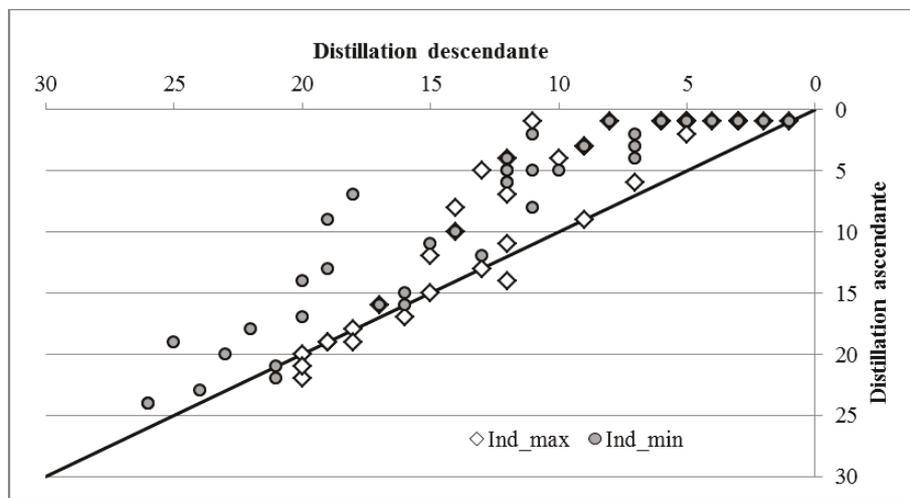


Fig. 7.13 : Graphique de Simos pour les jeux extrêmes de seuils d'indifférence

Les différences entre le jeu avec l'ensemble des seuils d'indifférence au minimum et celui où ils sont au maximum sont étudiées sur la Fig. 7.13. Les écarts sont faibles sur les premiers rangs du classement. La diminution des seuils provoquent l'incomparabilité de certaines stratégies.

Les premiers rangs du classement sont toutefois robustes aux seuils d'indifférence.

### 7.5.2 Seuils de préférence

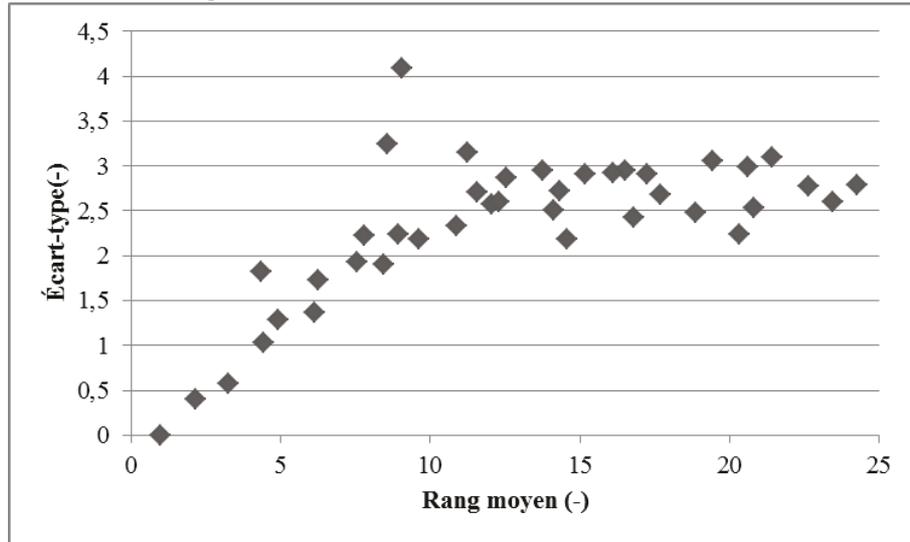


Fig. 7.14 : Écart-type des rangs en fonction du rang moyen – Robustesse aux seuils de préférence

La Fig. 7.14 met en évidence que les seuils de préférence influencent de manière significative les rangs des stratégies. En effet, les premiers rangs ont un écart-type relativement faible mais il augmente significativement avec le rang comme nous l'avons observé au chapitre 6 sur le cas simplifié. Ainsi, les 5 premiers rangs du classement sont plutôt stables mais le classement des dernières stratégies est beaucoup plus variable. Le classement apparaît moins robuste aux variations des seuils de préférence qu'aux seuils d'indifférence.

L'analyse du graphique de Simos (Fig. 7.15) pour les extremums de seuils de préférence met en évidence que la réduction des seuils de préférence génère plus de situations d'incomparabilité. Toutefois, les premiers rangs des deux distillations sont plutôt stables.

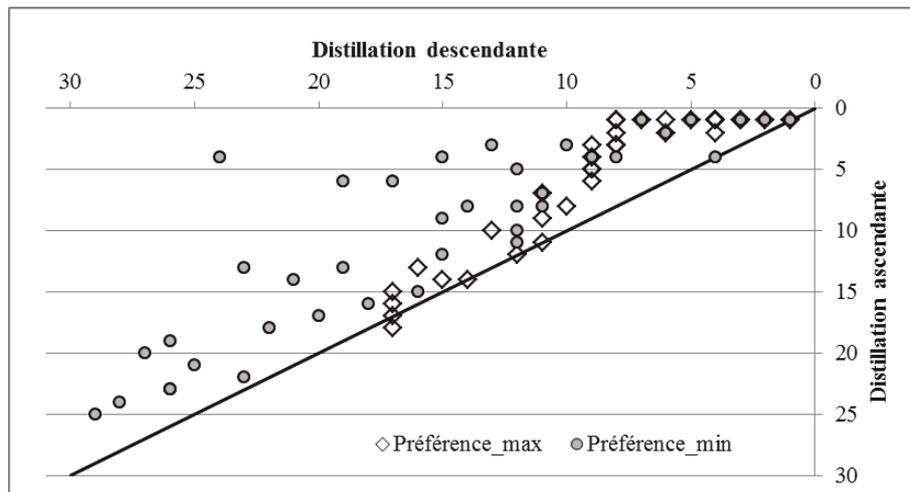


Fig. 7.15 : Graphique de Simos pour les jeux extrêmes de seuils de préférence

### 7.5.3 Seuils de veto

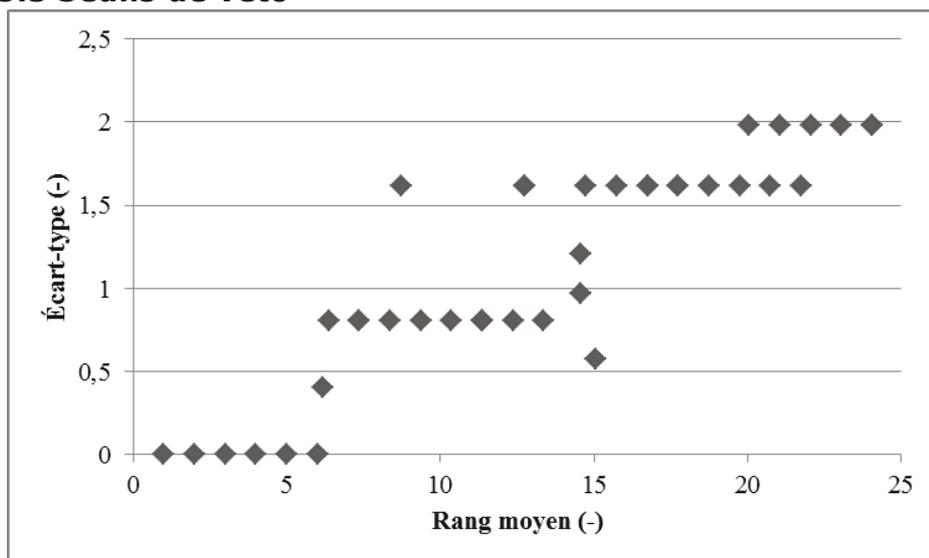


Fig. 7.16 : Écart-type des rangs en fonction du rang moyen – Robustesse aux seuils de veto

Les rangs des stratégies varient peu avec les seuils de veto (Fig. 7.16). Sur les 16 jeux de seuils de veto étudiés, les stratégies atteignent en moyenne deux ou trois rangs différents. Par ailleurs, les premiers rangs de l'étude (jusqu'au 6) ne varient pas du tout.

Contrairement aux autres seuils, les seuils de veto n'affectent pas le classement. Celui-ci est donc robuste.

### 7.5.4 Conclusions

Les résultats de l'analyse de robustesse n'apparaissent pas totalement concluants. Le classement est robuste aux seuils d'indifférence et de veto. Cependant, les seuils de préférence présentent une influence significative sur le classement. La détermination des seuils de préférence n'est pas issue d'une analyse d'incertitude propre à ce bâtiment, ils ne sont donc pas nécessairement adaptés.

La définition de ces paramètres apparaît être une étape déterminante dans la mise en place de la démarche et peut gêner la fiabilité du résultat.

## 7.6 Étape 9 : les recommandations

L'analyse de robustesse a permis de mettre en évidence que les premiers rangs du classement sont stables. Toutefois, les seuils de préférence montrent des effets sur le rangement des stratégies significatifs à partir du 6<sup>ème</sup> rang.

Les recommandations que nous pouvons établir avec confiance sont que la configuration n°3 d'isolation (ensemble du bâtiment) ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants. Ensuite, les stratégies les mieux classées préconisent une absence d'isolation des parois ou une isolation thermique par l'extérieur.

La stratégie qui représente le meilleur compromis (S\_0132) comprend les actions :

- Changement des fenêtres de la cuisine ;
- Isolation thermique par l'extérieur ;
- Configuration d'isolation des parois n°2 : ensemble des parois en pierre de taille.

Le Tableau 7.10 synthétise les résultats de cette stratégie en parallèle de ceux du cas initial sur l'ensemble des critères de décision.

**Tableau 7.10 : Critères de décision du meilleur compromis et du cas initial**

	Taux d'inconfort (%)				Besoins de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Teneur en eau (kg/kg)		Coût (€/m <sup>2</sup> )
	Cuisine	Séjour	Chambres	Sdb		Pierre de taille	Moellons	
S_000	19	18	28	29	96	0,019	0,072	0
S_0132	8	8	31	29	48	0,020	0,072	39

Cette stratégie permet donc une division par deux des besoins de chauffage et une nette amélioration du confort de la cuisine et du séjour. Le taux d'inconfort des chambres et de la salle de bain, ainsi que les teneurs en eau des deux parois ne sont pas impactés par cette stratégie par rapport au cas initial.

Toutefois, en termes de recommandation, nous ne nous limitons pas à l'unique stratégie positionnée au rang 1. Les cinq premières stratégies peuvent aussi être pertinentes et sont stables avec les jeux de seuils donc leur classement est fiable.

## 7.7 Conclusions

Ce chapitre a été l'occasion de tester la démarche de sélection d'une stratégie de réhabilitation sur un bâtiment en tuffeau avec une configuration réaliste. Nous avons ainsi pu constater que le processus fonctionne. Toutefois, les recommandations établies ont une fiabilité amoindrie par rapport au cas simplifié. En effet, l'analyse de robustesse a mis en avant le fort effet des seuils de préférence et donc de l'incertitude sur les résultats. L'extrapolation que nous avons réalisée à partir du cas simplifié présente donc des limites notables. Pour assurer des résultats plus robustes, il est nécessaire de reprendre la démarche de définition des seuils de préférence par une analyse d'incertitude. Une autre raison de cette baisse de fiabilité est aussi la complexité du bâtiment dont la modélisation trouve ces limites avec l'outil que nous avons utilisé.

Cependant, le processus permet d'obtenir des préconisations en termes d'actions de réhabilitation stables puisque les cinq premiers rangs du classement varient peu.

Par ailleurs, cette application à un bâtiment réaliste souligne l'adaptabilité de la démarche. En effet, elle permet de considérer les actions déjà entreprises sur le bâtiment, ici le changement des fenêtres autres que la cuisine et les spécificités du bâtiment. Elle semble donc applicable à la diversité existante de bâtiments en tuffeau. Elle souligne aussi la difficulté d'élargir les conclusions que nous avons obtenues sur ce bâtiment à l'ensemble du patrimoine en tuffeau vu les différences déjà notées avec le cas simplifié.



## Conclusion générale

La réhabilitation des bâtiments existants est un enjeu majeur des prochaines années. Elle représente un volet d'actions prioritaire pour atteindre les objectifs de réduction des consommations d'énergie que la France s'est fixés.

Parmi les bâtiments existants, le bâti ancien, par sa diversité et ses spécificités, soulève des problématiques particulières dans la mise en place de stratégies de réhabilitation adaptées. Ce travail concerne une part spécifique du patrimoine ancien : celui en pierre calcaire et principalement celui en tuffeau.

Certaines problématiques de la réhabilitation de ces bâtiments ont été mises en évidence en amont de cette thèse. Les travaux que nous avons alors menés ont visé l'amélioration de la connaissance de ce patrimoine et le développement d'une méthodologie d'identification de stratégies de réhabilitation efficaces et pertinentes de ces bâtiments. Toutefois, avant cela il était nécessaire de définir ce que nous entendions par stratégies efficaces et pertinentes.

Pour cela, une première étape de connaissance des spécificités du patrimoine en tuffeau a été nécessaire. Nous avons ainsi mis en exergue des problématiques spécifiques à ces bâtiments qui dimensionne l'ensemble du processus de réhabilitation. Ainsi, la forte hygroscopicité du matériau tuffeau engendre sur ces bâtiments des comportements hygrothermiques variables et de forts risques d'altérations. Cette même présence d'eau pénalise la mise en place de solutions d'isolation par l'intérieur qui peut bloquer les transferts d'humidité. En parallèle de ce premier état des lieux, nous pouvons aussi citer l'humidité relative élevée sur des périodes régulières dans ces bâtiments qui engendre des questions sanitaires. Certes, il s'agit là de deux inconvénients mais des points positifs sont aussi bien présents sur ce patrimoine : la température y est confortable en été et il bénéficie de qualités architecturales indéniables.

Un projet de réhabilitation énergétique vise certes l'amélioration des performances énergétiques mais ne se limite pas à cet enjeu. Des objectifs divers et parfois divergents sont considérés lors du choix de la solution. De plus, les problématiques identifiées sur ce patrimoine doivent aussi être intégrées à la réflexion. De ce fait, dans le processus de conception d'une stratégie de réhabilitation qui s'étend de la connaissance initiale du bâtiment par un diagnostic à la vérification des performances atteintes après travaux, nous nous sommes concentrés exclusivement sur l'identification des stratégies pertinentes vis-à-vis des objectifs identifiés.

Sur le patrimoine en tuffeau, nous avons retenu quatre enjeux essentiels : l'amélioration des performances énergétiques, l'amélioration du confort hygrothermique intérieur, la prévention du risque de dégradation de l'enveloppe et la minimisation de l'investissement financier. Pour sélectionner une stratégie répondant à ces quatre enjeux, une démarche d'aide à la décision a été construite.

La mise en place de cette méthodologie a nécessité le développement de plusieurs points. Dans un premier temps, il a été indispensable de traduire les enjeux retenus en critères évaluables. Cela a donné lieu à la définition de quatre critères de décision : les besoins de

## Conclusion générale

chauffage annuels, le taux d'inconfort hygrothermique des ambiances, la teneur en eau au sein du tuffeau après réhabilitation et l'investissement financier initial.

A la suite de cette étape, il est apparu que le calcul de ces critères nécessitait la mise en place d'un outil de modélisation du bâtiment. Cet outil, pour produire des évaluations des réhabilitations fiables, se devait de traduire de manière réaliste le comportement des bâtiments en tuffeau. Le choix s'est porté sur l'outil existant EnergyPlus avec l'algorithme HaMT qui couple transferts de chaleur et de masse au sein des parois. La comparaison des résultats du modèle à des mesures sur une cellule expérimentale a permis de valider l'outil retenu. S'agissant d'un modèle, il traduit de manière approximative le comportement réel de ces bâtiments. Il est donc apparu essentiel que l'incertitude du calcul des critères de décision soit considérée dans le processus d'aide à la décision pour garantir que les recommandations soient fiables.

Le dernier axe se situait sur la méthode d'analyse multicritère dont l'objectif est de structurer la comparaison des évaluations des stratégies de réhabilitation. Un cahier des charges a été établi suivant les particularités de notre objet d'étude, l'aspect essentiel étant l'intégration de l'incertitude des critères de décision dans la démarche. Vis-à-vis de ces besoins, la méthode d'aide à la décision ELECTRE III a été sélectionnée.

Une fois les outils indispensables à la mise en place de la méthodologie d'aide à la décision, la vérification de son fonctionnement a été réalisée sur un cas simplifié. Les résultats ont été comparés à une étude simplifiée et sont cohérents. Notre démarche permet, par ailleurs, de proposer un nombre plus restreint de travaux à mener.

Cette étape de vérification a été complétée par une application à un cas réaliste dont la complexité est issue d'un bâtiment en tuffeau réel. Certaines données calculées sur le cas simplifié ont été extrapolées pour ce cas. Les recommandations établies sont alors un peu moins robustes mais la complexité du bâtiment et ses spécificités ont bien été intégrées aux résultats puisque les travaux recommandés diffèrent sur ces éléments (état initial du bâtiment, contraintes spécifiques) par rapport au cas simplifié.

Du point de vue de la réhabilitation des bâtiments en tuffeau, les deux exemples étudiés ont fourni des recommandations différentes puisque leur état initial n'était pas le même. Il est toutefois possible de tirer quelques conclusions générales vis-à-vis de la réhabilitation de ces édifices. Parmi les techniques d'isolation des parois testées, la fibre de bois par l'intérieur entraîne une accumulation d'eau dans le tuffeau préjudiciable pour la structure. L'isolation thermique par l'extérieur a un coût élevé mais a un effet positif par rapport aux autres solutions sur le taux d'inconfort, la teneur en eau et les besoins de chauffage. Suivant l'état des menuiseries, leur changement n'est pas forcément l'action à engager car elle a un coût élevé tout en ayant parfois peu d'impact. Au contraire, en l'absence d'isolation en toiture, il s'agit de la préconisation prioritaire des actions. Les isolations thermiques par l'intérieur en laine de verre et en ouate de cellulose ont un effet plutôt pénalisant pour le confort hygrothermique et la teneur en eau. Il n'est pas possible de généraliser les autres conclusions obtenues car elles sont spécifiques au cas testé.

Concernant la méthodologie développée ici, il est nécessaire de préciser les limites de cette démarche. Tout d'abord, le critère de décision caractérisant le risque de dégradation est simplifié par rapport aux développements des altérations réellement observées sur le tuffeau. Des lacunes sur la connaissance de la propension du tuffeau et sur les paramètres gouvernant les désordres n'ont pas permis de développer un outil plus précis du risque de développement de ces maladies. Le critère retenu ne traduit donc pas parfaitement l'enjeu que nous avons retenu. De plus, la méconnaissance des caractéristiques hygrothermiques du tuffeau in situ, différent de celui étudié en laboratoire, entraîne, de par le modèle, une incertitude sur les critères de décision : besoins de chauffage, taux d'inconfort et teneur en eau. Par ailleurs, le

## Conclusion générale

modèle retenu n'intègre pas l'ensemble des spécificités du bâti tuffeau dont les remontées capillaires et la pluie. Enfin, certaines hypothèses de modélisation affectent de manière importante le classement comme l'effet des actions de réhabilitation sur la perméabilité à l'air.

Cependant, malgré ses limites, les deux cas d'étude l'ont montré, la démarche d'aide à la décision fonctionne. Elle fournit des recommandations de travaux adaptés au patrimoine en tuffeau et plus spécifiquement encore au bâtiment considéré. Les enjeux auxquels nous avons cherché à répondre sont bien pris en compte.

Il est de plus important de préciser que cette démarche a vocation à évoluer suivant les besoins des acteurs du secteur, suivant les évolutions de la connaissance de ces bâtiments et des outils de modélisation.

Dans ce travail, nous nous sommes arrêtés sur quatre critères particulièrement adaptés au patrimoine en tuffeau. Cependant, il s'agit clairement d'un processus ouvert où d'autres objectifs comme un bilan carbone faible, une amélioration de la qualité de l'air peuvent facilement être envisagés. L'ajout de critères de décision peut permettre à terme d'appliquer la méthode à d'autres catégories de bâtiments (avec un critère de durabilité basé spécifiquement sur le développement de moisissure dans un matériau terre-paille par exemple).

Par ailleurs, ici l'outil EnergyPlus avec HaMT a été étudié car il présentait des atouts pour le patrimoine en tuffeau. Sur d'autres types de bâtiment, la démarche peut facilement s'orienter sur l'utilisation ou le développement d'autres outils de modélisation.

Enfin, notons que ce processus a été appliqué dans une démarche de recherche. Nous souhaitons certes qu'il soit applicable et fonctionnel mais les temps de réalisation de chaque étape n'ont pas été optimisés. L'application opérationnelle de la démarche est donc envisageable sous couvert d'une réduction des temps de calcul. En effet, certaines étapes ont demandé plusieurs semaines pour produire des résultats fiables. L'optimisation des ressources nécessaires aux différentes étapes est donc une perspective de ce travail pour en faire une démarche utilisable par tous et pour tous.



## Références

[ADEME, 2013] ADEME. Chiffres clés – Bâtiment – Edition 2013.

[Alomari, 2014] Alomari A., Risk assessment of thermo-hydrromechanical stone decay in built heritage. Thèse de doctorat. Université d'Orléans. 2014.

[Arrêté 1982] Le ministre délégué auprès du ministre de l'industrie, chargé de l'énergie, le ministre de la santé et le ministre de l'urbanisme et du logement. Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements [en ligne]. Journal officiel du 15 novembre 1983. Disponible sur :  
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000862344>

[Asadi, 2014] Asadi E., Gameiro da Silva M., Henggeler Antunes C., Dias L., Glicksman. Multi-Objective Optimization For Building Retrofit: A Model Using Genetic Algorithm And Artificial Neural Network And An Application. Energy and Buildings, 2014, vol. 81, pp. 444-456.

[Ascione, 2011] Ascione F., de Rossi F., Vanoli G. P. Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios. Energy and Buildings, 2011, vol. 42, Issue 8, pp. 1925-1936.

[ASHRAE, 2002] ASHRAE Guideline 14-2002, 2002. Guideline for Measurement of Energy and Demand Savings.

[ASHRAE 55] ASHRAE Standard 55-2013, 2013. Thermal environmental conditions for human occupancy. 54 p.

[Baret, 2011] Baret Y. Traiter l'humidité : Comprendre les origines de l'humidité - Diagnostiquer les désordres - Évacuer l'humidité - Prévenir son retour. Édition Eyrolles. 2011, 79 p.

[Bailly, 2013] Bailly A., Jiang Y., Guyot G., Desfougères F., AIVC : Preliminary analysis of a French Buildings Airtightness Database, 2013, Athènes.

[Beck, 2008] Beck K., Al-Mukthar M. Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone. Environmental Geology, 2008, vol. 56, Issue 3 et 4, pp. 715-727.

[Ben Mena, 2001] Ben Mena S. Méthodes de surclassement et analyse de robustesse. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 2001, vol. 5, n°1, pp. 37-41.

## Références

- [Benavente, 2004] Benavente D., Garcia del Cura M.A., Fort R., Ordonez S. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 2004, vol. 74, Issue 1-2, pp. 113-127.
- [Berger, 2012] Berger J., Tasca-Guernouti S., Woloszyn M., Buhe C. L'humidité dans les bâtiments: Pathologies et paramètres gouvernants. In: IBPSA France 2012. Chambéry.
- [Bergeron, 2009] Bergeron V., Methani A., La qualité de l'air intérieur : une préoccupation croissante. Société des experts chimistes de France [en ligne]. *Edition Dunod*. 2009, p. 40. Disponible sur [http://perso.ens-lyon.fr/amine.metahni/Publications/Bergeron-Metahni-2009-\(1\).pdf](http://perso.ens-lyon.fr/amine.metahni/Publications/Bergeron-Metahni-2009-(1).pdf).
- [Béziat, 1987] Béziat A. Etude expérimentale de la conductivité thermique de matériaux argileux hautement compacts : contribution à l'étude du stockage de déchets radioactifs. Thèse de doctorat. Université d'Orléans. 1987.
- [Bouchlagem, 2000] Bouchlagem N. Optimising the design of building envelopes for thermal performance. *Automation in Construction*, 2000, vol. 10, n°1, pp. 101-112.
- [Burhenne, 2010] S. Burhenne, D. Jacob, and G.P. Henze. Uncertainty analysis in building simulation with monte carlo techniques. In *SimBuild 2010 Fourth National Conference of IBPSA-USA*, New York City, New York, 2010.
- [Canacki, 2007] Canacki H., Demirboga R., Karakoc B., Sirin O., Thermal conductivity of limestone from Gaziantep (*Turkey*). *Building and environment*, vol. 42, n°4, 2007, p. 1777-1782.
- [Candas, 2000] Candas V. Confort thermique. *Techniques de l'ingénieur*, 2000, BE9085.
- [Cantin, 2010] CANTIN R., BURGHOLZER J., GUARRACINO G., et al. Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France. *Building and Environment*, 2010, vol. 45, n°2, pp. 473-484.
- [Cardell, 2003] Cardell C., Delalieux F., Roumpopoulos K., Moropoulou A., Auger F., Van Grieken R., Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France. *Construction and Building Materials*, April 2003, vol. 17, n°3, P. 165-179.
- [Catalina, 2009] Catalina T. Estimation of residential buildings energy consumptions and analysis of renewable energy systems using a multi-criteria decision methodology. Thèse de doctorat, école doctorale MEGA, 2009, 217 p.
- [Cetiner, 2014] Cetiner I., Edis E. An environmental and economic sustainability assessment method for retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, 2014, vol. 74, pp. 132-140.
- [Chen, 2006] Chen Z., Clements-Croome D., Hong J., Li H., Xu Q. A multi-criteria lifespan energy efficiency approach to intelligent building assessment. *Energy and Buildings*, 2006, vol. 38, n°5, pp. 393-409.

## Références

[Chéné, 1999] Chéné G., Bastian G., Brunjail C., Laurent J.P., Vieillissement accéléré de blocs de tuffeau en laboratoire sous l'effet de cycles d'imbibition-séchage. *Matériaux et constructions*, Septembre 1999 , vol 32, n°7, p. 525-532.

[Concha-Lozano, 2012] Concha-Lozano N., Gaudon P., Pages J., de Billerbeck G., Lafon D., Eterradosi O., Proetctive effect of endolithic fungal hyphae on oolitic limestone buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 2012, vol. 13, n°2 p. 120-127.

[CSTB, 2009] CSTB. Règle de calcul "SIREN". Edition CSTB, France, 2009.

[CTMNC, 2009] Michel F., Quelques notions de géologie, CTMNC. 2009.

[D'Cruz, 1987] D'Cruz N. A., Radford A. D., a multi-criteria model for building performance and design. *Building and environment*, 1987, vol. 22, n°3, pp. 167-179.

[Dascalaki, 2002] Dascalaki E., Santamouris M. On the potential of retrofitting scenarios for offices. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, Issue 6, pp. 557-567.

[Dessandier, 2000] Dessandier D., Auger P., Haas H., Hugues G., Guide méthodologique des pierres des monuments en termes de durabilité et compatibilité. Rapport de recherche, n° BRGM/RP-50137-FR, France, Décembre 2000, 76p.

[DGUHC, 2011] Tasca-Guernouti S., Bertron J., Berger J. et al. Modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien avant 1948, Rapport n°2, 2011, 66 p. *Rapport confidentiel*.

[DHUP, 2007] DHUP, MPF, CETE Est, Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie. Août 2007, 71 p.

[DoE] US Departement of Energy  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename\\_menu=whole\\_building\\_analysis/pagename\\_submenu=energy\\_simulation](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename_submenu=energy_simulation)

[Duguë, 2010] Duguë A., Betbeder F., Lopez J., Lagiere P., Évaluation des risques liés à l'humidité dans le cas d'une isolation thermique par l'intérieur de murs anciens : étude de cas. Conférence IBPSA France, 2010, 8p.

[EERE, 2012] EnergyPlus Engineering Reference, The Reference to EnergyPlus Calculations, 2012.

[EnergyPlus, 2012] Henninger R., Witte M. EnergyPlus Testing with ASHARE 1052-RP Toolkit - Building Fabric Analytical Tests. Prepared for : U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy - Office of Building Technologies Washington D.C. June 2012. 57 p.

[Espinosa, 2008] Espinosa R.M., Franke L., Deckelman G. Model for the mechanical stress due to the salt crystallization in porous materials. *Construction and building materials*, 2008, vol. 22, Issue 7, pp. 1350-1367.

[Ezzdine, 2009] Ezzdine Rana, *Endommagement des monuments historiques en maçonnerie*. Thèse de l'Université de Bordeaux 1. 183p. 2009.

## Références

- [Ferrari, 2007] Ferrari S., 28th AIVC Conference : Building envelope and heat capacity: re-discovering the thermal mass for winter energy savings, 2007, Greece.
- [Flory-Celini, 2008] Caroline Flory-Celini. Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant. PhD thesis, Université Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
- [François, 1995] François C., Lahrech R. Typologies des résidences principales françaises, CSTB. 1995, GEC-DGE-95.06R.
- [Fronteau, 2010] Fronteau G., Moreau C., Thomachot-Svhneider C., Barbin V., Variability of some lutetian building stones from the Paris Basin, from characterisation to conservation, *Engineering Geology*, vol. 115, n°4, 2010, pp. 158-166.
- [Gallauziaux, 2010] Gallauziaux T., Fedullo D. Le grand livre de l'isolation. Paris. Edition Eyrolles, 2010, 683 p.
- [Gens, 2014] Gens A., Hurely J. F., Tuomisto J. T., Friedrich R. Health impacts due to personal exposure to fine particles caused by insulation of residential buildings in Europe. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 84, pp. 213-221.
- [Gholap, 2007] Gholap A. K., Khan J. A. Design and multi-objective optimization of heat exchanges for refrigerators. *Applied Energy*, 2007, vol. 84, n°12, pp. 1226-1239.
- [Gillon, 1997] Gillon F. Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutations électroniques. Thèse de doctorat. Université de Lille. 1997. 181 p.
- [Graulière, 2006] Grauliere P., Typologie des bâtiments d'habitation existants en France. Synthèse des caractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique. Rapport de recherche, FRANCE : La Défense : METL, 2005, 150 p.
- [Hagentoft, 2004] Hagentoft, C.E., Kalagasidis, A. S., Adl-Zarrabi, B., Roefls, S., Carmeli, J., Hens, H., Grunewald, J., Funk, M., Becker, R., Shamir, D., Adan, O., Brocken, H., Kumaran, K., Djebbar, R., 2004. Assessment method of numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building components: Benchmarks for one-dimensional cases, *Thermal Environments and Building Science*, vol. 27, Sweden.
- [Hall, 2013] Hall M. R., Casey S. P., Loveday D. L., Gillott M., Analysis of UK domestic building retrofit scenarios based on the E.ON Retrofit Research House using energetic hygrothermics simulation – Energy efficiency, indoor air quality, occupant comfort, and mould growth potential. *Building and Environment*, 2013, vol. 70, p. 48-59.
- [Heim, 2009] HEIM D., KRAWCZYNSKI S., GRUNEWALD J., 11<sup>th</sup> International IBPSA Conference : Numerical analysis of heat and moisture transfer in historical ceramic masonry wall, 2009, Glasgow, Scotland. 6 p.
- [Hens, 2008] Hens H. IEA-ECBCS Annex 41 - Whole building heat, air and moisture response. Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar, Copenhagen, June 19, 2008, (C. Rode, editor), Dept. of Civil Engineering, BYG R-191, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2008

## Références

- [Hoffman, 1994] Hofmann, J. B. Ambiances climatisées et confort thermique. Les actes du COSTIC, 1994, 120 p.
- [Holm, 2000] HOLM Andreas, KUNZEL Hartwig M. Non-isothermal moisture transfer in porous building materials. Materials week, 2000, Munich, 9p.
- [Hong, 2012] Hong S. H., Strlic M., Ridely I., Ntanos K., Bell N., Cassar M. Climate change mitigation strategies for mechanically controlled repositories: The case of The National Archives, Kew. Atmospheric Environment, 2012, vol. 49. pp. 163-170.
- [INSEE, 2013] Chiffres sur les travaux d'amélioration - rénovation des logements. Disponible sur : <http://www.insee.fr/fr/themes/info-rapide.asp?id=36&date=20140228>.
- [İpekoğlu, 2007] İpekoglu B., Böke H., Çizer Ö., Assessment of material use in relation to climate in historical buildings. Building and Environment, 2007, vol. 42, n°2, pp. 970-978.
- [ISO 15686-5] ISO. Bâtiments et biens immobiliers construits – Prévission de la durée de vie – Partie 5 : Approche en coût global. ISO 15686-5 :2008, 2008.
- [Jacques, 2005] Julien Jacques. Contribution à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée. PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 2005.
- [Jacquot, 2003] Jacquot A., De plus en plus de maisons individuelles. INSEE, 2003.
- [Janssens, 2005] Janssens A., Woloszyn M., Rode C., Sasic-Kalagaisdis A. and De Paepe M. From EMPD to CFD – overview of different approaches for Heat Air and Moisture modeling in IEA Annex 41. Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar, Copenhagen, June 19, 2008, (C. Rode, editor), Dept. of Civil Engineering, BYG R-191, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2008
- [Kieslinger] Kieslinger, Les principaux facteurs d'altération des pierres à bâtir, disponible sur internet, 1950.
- [Kolokotsa, 2009] Kolokotsa, D., Diakaki, C., Grigoroudis, E., Stavrakakis, G. and Kalaitzakis, K.. Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. Advances in building energy research, 2009, vol. 3, n°1, pp.121-146.
- [Künzel, 1995] Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB Verlag.
- [Künzel, 1998] Künzel Hartwig M. Effects of interior and exterior insulation on the hygrothermal behaviour of exposed walls. Fraunhofer Institut. Materials and structures/Matériaux et constructions, vol. 31, 1998, pp 99-103.
- [Laurent, 1998] Laurent J.-P., Contribution à l'étude du comportement hygrothermique des géomatériaux dans leur environnement. HDR. Grenoble. 1998.
- [Le Moigne, 2006] Le Moigne J.L. La théorie du système générale. Théorie de la modélisation. Réédition en ligne (2006) : <http://www.mcxapc.org/inserts/ouvrages/0609tsgtm.pdf>

## Références

[Lévy, 2010] Lévy P. La rénovation écologique : Principes fondamentaux, exemples de mise en œuvre. Édition Terre vivante, 2010, 318 p.

[Loucks, 2005] Loucks D., Van Beek E., Model sensitivity and Uncertainty Analysis. In : water resources systems planning and management. Unesco, 2005, pp. 255 - 292. ISBN 92-3-103998-9.

[Ma, 2012] Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. Energy and Buildings, 2012, vol. 55, pp. 889-902.

[Macdonald, 2001] I. Macdonald and P. Strachan. Practical application of uncertainty analysis. Energy and Buildings, 33 :219–227, 2001.

[Mara, 2000] T.A. Mara. Contribution à la validation globale d'un logiciel de simulation thermo-aéraulique de bâtiment : proposition de nouveaux outils d'aide à la validation. Décembre 2000. PhD thesis, Université de la Réunion, 2000.

[Marshal, 2011] Marshal T., Diagnostic et techniques de réhabilitation du bâti ancien, Cours ENTPE 2010-2011.

[Martin, 2010] Martin S., Mazarròn F. R., Cañas I., Study of thermal environment inside rural houses of Navapolos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia, Construction and Building Materials, 2010, pp. 666-676.

[Martinaitis, 2004] Martinaitis V., Rogoza A., Bikmanien I. Criterion to evaluate the 'twofold benefit' of the renovation of buildings and their elements. Energy and Buildings, 2004, vol. 36, Issue 1, pp. 3-8.

[Maystre, 1994] Maystre L., Pictet J., Simos J., Méthodes multicritère ELECTRE : Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, CH – 1015, Lausanne, Suisse, 1994.

[Moon, 2014] Moon H. J., Ryu S. H., Kim J. T., The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings. Energy and Buildings, vol. 75, June 2014, pp. 439-446.

[Moujalled, 2007] Moujalled B., Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de doctorat école MEGA, 2007, 330 p.

[Moura, 2008] Moura P. Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain. Thèse de doctorat, INSA de Lyon. 2008.

[Murray, 2014] Murray S. N., Walsh B. P., Kelliher D., O'Sullivan D.T.J. Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms – A case study. Building and Environment, 2014, vol. 75, pp. 98-107.

[NF 1936] AFNOR. Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale. NF 1936, 2007, 10 p.

[NF 7730] AFNOR. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. NF EN ISO 7730, 2006, 12 p.

## Références

[NF 10456] AFNOR. Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques - Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles. NF EN ISO 10456, 2000, 27 p.

[NF 12371] AFNOR. Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la résistance au gel. NF EN 12371, 2010, 13 p.

[NF 12572] AFNOR. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. NF EN ISO 12572, 2001, 30 p.

[NF 13789] AFNOR. Performance thermique des bâtiments - Coefficient de transfert thermique par transmission et par renouvellement d'air - Méthode de calcul. NF EN ISO 13789, 2008, 18 p.

[NF 13790] AFNOR. Performance énergétique des bâtiments - Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux. NF EN ISO 13790, 2013, 141 p.

[NF 15026] AFNOR. Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique. NF EN 15026, 2008, 22 p.

[NF 15241] AFNOR. Ventilation des bâtiments - Méthodes de calcul des pertes d'énergie dues à la ventilation et à l'infiltration dans les bâtiments commerciaux. NF EN 15241, 2007, 24 p.

[Oliva, 2001] Oliva J.-P. L'isolation écologique : Conception, matériaux, mise en œuvre. Édition Terres Vivantes, 2001, 237 p.

[Orosa, 2012] Orosa J. A., Oliveira A. C., A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment. *Renewable Energy*, 2012, pp. 89-96.

[Oustad, 2005] Oustad Mikkel, Gustaven Arild, Uvslokk Sivert. Calculation of moisture heat transfer in compact roofs and comparison with experimental data. Norvège, 2005, 8p.

[Papadopoulos, 2002] Papadopoulos A. M., Theodosiou T. G., Karatzas K. D., Feasibility of energy saving renovation measures in urban buildings: The impact of energy prices and the acceptable pay back time criterion. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, Issue 5, pp. 455-466.

[Breviglieri, 2005] Breviglieri Pereira de Castro Eduardo. Método de auxílio à concepç ao arquitetônica baseado na análise multicritério e em dados simulados dos comportamentos da edificaç ao. Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2005, 89 p.

[Pernodet, 2010] PERNODET CHANTRELLE F. Méthode d'optimisation multicritère de scénarios de réhabilitation de bâtiments tertiaires. Application à l'évaluation de dispositifs de rafraîchissement hybride. Thèse de doctorat. Ecole doctorale MEGA. 2010. 310 p.

[Peuportier, 2012] Peuportier B., L'analyse de cycle de vie dans la construction. IBPSA France, 2012, 10 p.

[Piot, 2009] PIOT Amandine. Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique. Thèse : Génie Civil : INSA Lyon : 2009, 150 p.

## Références

- [Popov, 2003] Popov Y., Tertychnyi V., Romushkevich R., Korobkov D., Pohl J., *Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks : experimental data*. Pure and Applied Geophysics, 2003, vol. 160, p. 1137-1161.
- [Prigent, 1991] Le tuffeau blanc en Anjou, Carrières et constructions en France et dans les pays limitrophes, Éditions du CTHS, Paris, 1991.
- [RAGE, 2012] Règles de l'art du Grenelle de l'environnement 2012 - Analyse détaillée du parc résidentiel existant.
- [Rey, 2004] Rey E. Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue. Energy and Buildings, 2004, vol. 36, Issue 4, pp. 367-372.
- [Rivallain, 2013] Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants. Thèse de doctorat, Mines Paris Tech, 2013, 414 p.
- [Rode, 2008] Rode C. and Woloszyn M. Common Exercises in Whole Building HAM Modelling. Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar, Copenhagen, June 19, 2008, (C. Rode, editor), Dept. of Civil Engineering, BYG R-191, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2008
- [Rogers, 1998] Rogers M., Bruen M. Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE. European Journal of Operational Research, 1998, vol. 107, pp. 542-551.
- [Rosario Veiga, 2009] Rosario Veiga M., Velosa A., Magalhaes A. Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. Construction and Building Materials, 2009, vol. 23, Issue 1, pp. 318-327.
- [Roulet, 2002] Roulet C.-A., Flourentzou F., Labben H.H., Santamouris M., Koronaki I., Dascalaki E., Richalet V. ORME: A multicriteria rating methodology for buildings. Building and Environment, 2002, vol. 37, pp. 579-586.
- [Roy, 1985] Roy B. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Economica, Paris, 1985.
- [Roy, 1993] Roy B., Bouysseau D. Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas, Economica, Paris, 1993.
- [RT 2005] CSTB. Réglementation thermique 2005. Règle Th-U.
- [RT 2012] Arrêté du 28 Décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performances énergétiques des bâtiments nouveaux, JORF , (2013).
- [RT-ex] CSTB. Réglementation thermique pour l'existant. Règle Th-U.
- [Saïd, 2003] SAÏD M.N.A, DEMERS R.G., MCSHEFFREY L.L. Hygrothermal performance of a masonry wall retrofitted with interior insulation. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 2003, 11p.

## Références

[Saltelli, 2000] A. Saltelli, S. Tarantola, and F. Campolongo. Analysis as an ingredient of modeling. *Statistical Science*, 2000, vol. 15, pp. 377–395.

[Saltelli, 2008] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, and S. Tarantola. *Global Sensitivity Analysis. The primer*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

[Schrivver, 2009] Schrivver-Mazzuoli L. *La pollution de l'air intérieur : Sources, Effets sanitaires, ventilation*. Dunod, 2009, 265 p.

[Silva, 2012] Monteiro da Silva S., Almeida M. Selection of Rehabilitation construction solutions using ELECTRE III method. In : M. Almeida, L. Bragança, P. Silva, S. Silva, R. Mateus, J. Barbosa. *Seminário Reabilitação Energética de Edifícios*, 2012, Université do Minho. C. Araújo, pp. 25-32.

[Siret, 2004] Siret D., *Un outil de diagnostic des potentialités environnementales des enveloppes dans le cadre d'une Opération Programmée d'Amélioration énergétique et Thermique du Bâtiment (OPATB)*. Rapport final. Laboratoire CERMA, 2004, 126 p.

[Smith, 2010] Smith B., Gomez-Heras M., Viles H., *Underlying issues on the selection, use and conservation of building limestone*, Geological Society, 2010, vol. 331, pp. 1-11.

[Somerton, 1992] *Thermal properties and Temperature Related Behavior for Rock/Fluid Systems*. New-York : Elsevier, 1992, 257 p., ISBN: 978-0-444-89001-6.

[Spitz, 2012] *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments*. Thèse de doctorat de l'université de Grenoble. 2012.

[Spitz, 2013] Spitz C., Woloszyn M., Buhé C., Labat M. *Simulating combined heat and moisture transfer with energyplus: an uncertainty study and comparison with experimental data*. Conference IBPSA world 2013, Chambéry, France, 2013. 8 p.

[Stéphan, 2013] Stéphan E., Caucheteux A., Cantin R., Tasca-Guernouti S., Michel P. *Sensitivity analysis of an EnergyPlus simulation model of the ambient humidity in an old building*. Conference IBPSA world 2013, Chambéry, France, 2013. 8 p.

[Stéphan, 2014] Stéphan E., Cantin R., Caucheteux A., Tasca-Guernouti S., Michel P. *Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings*. *Building and Environment*, 2014, vol. 80, pp. 241-248.

[Tabula, 2010] TABULA, *Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stocks: Existent Experiences in European Countries and Common Approach - first TABULA Synthesis Report*, <http://www.building-typology.eu/>, Editor. 2010, EU.

[Torres, 2007] Torres I., Peixoto de Freitas V. *Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation*. *Building and environment*, 2007, vol. 42, pp. 424-435.

[Torres, 2010] Torres I., Peixoto de Freitas V. *The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historical buildings*. *Construction and building materials*, 2010, vol. 24, pp. 1331-1339.

## Références

[TRNSYS] Trnsys 16, A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, 2005, University of Wisconsin Madison, USA.

[UE, 2010] Union européenne. Directive du 19 mai 2010 concernant l'indication, par voie étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits, de la consommation en énergie et en autres ressources des produits liés à l'énergie. Journal officiel de l'Union européenne, 18 juin 2010, 12 p.

[Ventolà, 2011] Ventolà L., Vendrell M., Giraldez P., Merino L. Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. Construction and Buildings Materials, 2011, vol. 25, Issue 8, pp. 3313-3318.

[Verbeeck, 2005] Verbeeck G., Hens H. Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable ? Energy and Buildings, 2005, vol. 37, Issue 7, pp. 747-754.

[Vereecken, 2012] Vereecken E., Roels S. Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. Building and Environment, 2012, vol. 51, pp. 296-310.

[Woloszyn, 2008] Woloszyn M., Rode C., Roux J.-J. Synthèse sur la modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments dans l'Annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie. Conférence IBPSA France 2008. Lyon. 8 p.

[Zhai, 2010] Zhai Z., Previtali J., Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation. Energy and Buildings, 2010, vol. 42, n°3, pp. 357-365.

[Zhu, 2006] Zhu Y. Applying computer-based simulation energy auditing: a case study. Energy and Buildings, 2006, vol. 38, n°5, pp. 421-428.

## Sites internet

[CSTC] [http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=tv-nit&pag=228&art=5&niv01=5.3&action=list&listtype=stonetype&stonetype\\_id=17](http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=tv-nit&pag=228&art=5&niv01=5.3&action=list&listtype=stonetype&stonetype_id=17)

[CTMNC] <http://ctmnc1.ecritel.net:8080/cindocwebjsp/>

[Humibatex, 2011] [http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx\\_lwmsuivibilan\\_pi2%5BCODE%5D=ANR-11-VILD-0005](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-11-VILD-0005)

[PNRLAT] <http://www.parc-loire-anjou-touraine.fr/fr/bien-renover-son-habitat-en-tuffeau-des-conseils-pour-les-habitants>

## Liste des figures

Fig. 1.1 : Consommations du parc bâti en fonction des périodes de construction .....	18
Fig. 1.2 : Matériaux constitutifs des enveloppes de bâtiments anciens [Graulière, 2005] ...	19
Fig. 1.3 : Moyenne de la perméabilité à l'air suivant la date de construction [Bailly, 2013]	21
Fig. 1.4 : Carte géologique de la France [BRGM] .....	22
Fig. 1.5 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique sur un échantillon de 34 pierres calcaires .....	24
Fig. 1.6 : Isotherme de sorption d'un tuffeau extrait de Saint-Cyr-en-Bourg [Beck, 2006] .	26
Fig. 1.7 : Conductivité thermique de quatre pierres calcaires en fonction de leur teneur en eau [Canacki, 2007] .....	27
Fig. 1.8 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau - Modèle de Béziat appliqué au tuffeau .....	27
Fig. 1.9 : Maison rurale. Haut : schéma [PNRLAT]. Bas : Cheviré Le Rouge .....	30
Fig. 1.10 : Maison de bourg. Haut : schéma [PNRLAT]. Bas : Saint-Mathurin sur Loire ...	30
Fig. 1.11 : Maison de maître. Haut : schéma [PNRLAT]. Bas : Le Puy Notre Dame .....	30
Fig. 1.12 : Détachement en plaques – Bâtiment n°1 (Source : auteure) .....	32
Fig. 1.13 : Efflorescences – Bâtiment n°1 (Source : auteure) .....	33
Fig. 1.14 : Croûte noire – Bâtiment n°3 (Source : auteure) .....	34
Fig. 1.15 : Alvéolisations – Bâtiment n°18 (Source : auteure).....	34
Fig. 1.16 : Schéma de principe de l'instrumentation estivale .....	37
Fig. 1.17 : Température moyenne et amplitude des 21 pièces sur un été.....	38
Fig. 1.18 : Pourcentage de temps où la température intérieure dépasse 28°C dans 21 pièces sur un été.....	39
Fig. 1.19 : Humidité relative et amplitude des 21 pièces sur un été .....	39
Fig. 1.20 : Pourcentage de temps où l'humidité relative intérieure dépasse 60% dans 21 pièces sur un été.....	40
Fig. 2.1 : Organigramme de la RT-ex.....	47
Fig. 2.2 : Altérations liées à la présence d'enduits ciments (photo : auteure) .....	51
Fig. 2.3 : Séchage des parois par ventilation en pied de mur (photos issues de [Torres]) ...	53
Fig. 2.4 : Étapes de la mise en place du drain extérieur .....	54
Fig. 2.5 : Description de l'intégration d'un hérisson de cailloux et d'une dalle chaux-chanvre .....	54
Fig. 2.6 : Phases principales d'un programme de réhabilitation ( [Ma, 2012]).....	56
Fig. 2.7 : Processus de décision .....	57
Fig. 3.1 : Zone de confort hygrothermique définie par l'ASHRAE 55 .....	65
Fig. 3.2 : Zone de confort hygrothermique définie par le COSTIC .....	66
Fig. 3.3 : Exemple de diagramme de confort hygrothermique d'une pièce .....	67
Fig. 3.4 : Taux d'inconfort hygrothermique mesurés dans 21 pièces sur un été .....	68
Fig. 3.5 : Zone de confort hygrothermique et sources d'inconfort.....	68
Fig. 3.6 : Répartition du taux d'inconfort suivant les sources .....	69
Fig. 3.7 : Taux d'inconfort saisonnier suivant les pièces du cas E .....	70
Fig. 3.8 : Conditions hygrothermiques de la pièce E_4 sur une année (automne 2012 à été 2013).....	71

## Liste des figures

Fig. 3.9 : Comparaison des évolutions des humidités spécifiques intérieures et extérieures	71
Fig. 4.1 : Comparaison des teneurs en eau calculées par WUFI 1D et EnergyPlus .....	85
Fig. 4.2 : Évolution des teneurs en eau au sein de la paroi calculées par EnergyPlus et WUFI .....	85
Fig. 4.3 : Plan du rez-de-chaussée du cas d'étude .....	91
Fig. 4.4 : Indices de sensibilité de l'humidité ambiante du séjour .....	93
Fig. 4.5 : Indices de sensibilité de l'humidité ambiante de la chambre .....	94
Fig. 4.6 : Plan de la cellule expérimentale .....	95
Fig. 4.7 : Droite : vue de la façade extérieure – Gauche : vue intérieure (isolant) de la cellule expérimentale .....	96
Fig. 4.8 : Scénarios de chauffage de la cellule expérimentale (1 = confort, 0 = réduit) .....	96
Fig. 4.9 : Droite : Capteurs de température et humidité relative d'ambiance - Gauche : Centrales d'acquisition des données .....	97
Fig. 4.10 : Processus de vérification des résultats du modèle par rapport aux mesures expérimentales .....	100
Fig. 4.11 : Plage d'incertitude de la conductivité thermique du tuffeau en fonction de la teneur en eau .....	101
Fig. 4.12 : Absence de relation entre l'erreur du modèle et les valeurs du paramètre .....	102
Fig. 4.13 : Relation de Type 1 entre l'erreur du modèle et les valeurs du paramètre .....	102
Fig. 4.14 : Relation de Type 2 entre l'erreur du modèle et les valeurs du paramètre .....	103
Fig. 4.15 : Température et humidité relative extérieures mesurées sur le site d'Angers (France, 49) .....	104
Fig. 4.16 : Rayonnement solaire global horizontal et vitesse de vent mesurés sur le site d'Angers (France, 49) .....	104
Fig. 4.17 : Température et humidité relative intérieures mesurées dans la cellule expérimentale .....	105
Fig. 4.18 : Évolution de la puissance de chauffage calculée par le modèle et mesurée dans la cellule .....	106
Fig. 4.19 : Évolution de l'humidité spécifique ambiante calculée par le modèle et mesurée dans la cellule .....	106
Fig. 4.20 : Distribution de l'erreur moyenne normalisée. Gauche : humidité spécifique - Droite : Puissance de chauffage .....	107
Fig. 4.21 : Corrélations entre les indicateurs CVRMSE et NMBE. Droite : humidité spécifique - Gauche : puissance de chauffage .....	108
Fig. 4.22 : Évolution de l'humidité spécifique mesurée et simulée - itération 0 .....	109
Fig. 4.23 : Corrélations entre les écarts en humidité et le taux de renouvellement d'air de la cellule .....	110
Fig. 4.24 : Relation entre l'erreur en humidité et les valeurs de la teneur en eau initiale du tuffeau - itération 1 .....	112
Fig. 4.25 : Relation entre l'erreur en humidité et les valeurs de la conductivité thermique du tuffeau - itération 1 .....	112
Fig. 4.26 : Relation entre l'erreur en humidité et les valeurs de la surface équivalente de fuite - itération 1 .....	113
Fig. 4.27 : Relation entre l'erreur sur la puissance de chauffage et les valeurs du coefficient de convection intérieur du mur sud - itération 1 .....	113
Fig. 4.28 : Évolution de l'humidité spécifique ambiante mesurée et calculée sur la simulation finale .....	114
Fig. 4.29 : Évolution de la puissance de chauffage mesurée et calculée sur la simulation finale .....	115
Fig. 4.30 : Position des valeurs finales des paramètres par rapport à la valeur et à la plage d'incertitude initiale .....	116

## Liste des figures

Fig. 4.31 : Humidité spécifique mesurée et calculée sur la période estivale pour la simulation finale .....	117
Fig. 4.32 : Humidité spécifique mesurée et calculée sur la période estivale - teneur en eau initiale égale à 0,1 kg/kg .....	118
Fig. 5.1 : Définition d'un pseudo-critère.....	126
Fig. 5.2 : Indice de concordance - Méthode ELECTRE III.....	128
Fig. 5.3 : Indices de discordance - Méthode ELECTRE III .....	128
Fig. 5.4 : Exemple de graphique de classement final .....	130
Fig. 5.5 : Exemple de graphique de SIMOS .....	131
Fig. 5.6 : Exploration en étoile des paramètres d'entrée .....	132
Fig. 6.1 : Plan du cas simplifié .....	142
Fig. 6.2 : Conditions hygrothermiques avant réhabilitation.....	144
Fig. 6.3 : Distribution de la perméabilité à l'air ( $Q_{4Pa}$ ) en fonction des catégories de bâtiments en pierre .....	148
Fig. 6.4 : Effet des actions élémentaires d'isolation de la toiture sur les critères de décision .....	152
Fig. 6.5 : Effets des actions d'isolation du plancher sur les critères de décision .....	153
Fig. 6.6 : Effets des actions d'isolation des parois sur les critères de décision .....	153
Fig. 6.7 : Effets du changement des fenêtres sur les critères de décision .....	154
Fig. 6.8 : Relations entre critères de décision .....	156
Fig. 6.9 : Démarche de détermination des seuils de préférence .....	158
Fig. 6.10 : Graphique de Simos du cas simplifié .....	162
Fig. 6.11 : Écart-type des rangs en fonction du rang initial – Robustesse aux seuils d'indifférence .....	165
Fig. 6.12 : Graphique de Simos pour les jeux extrêmes de seuils d'indifférence .....	165
Fig. 6.13 : Écart-type des rangs en fonction du rang initial – Robustesse aux seuils de préférence.....	166
Fig. 6.14 : Graphique de Simos pour les jeux extrêmes des seuils de préférence .....	166
Fig. 6.15 : Écart-type des rangs en fonction du rang moyen - Robustesse aux seuils de veto .....	167
Fig. 7.1 : Coupe au niveau du plancher intermédiaire du cas d'étude.....	170
Fig. 7.2 : Plans des étages du cas réaliste.....	171
Fig. 7.3 : Répartition des zones .....	171
Fig. 7.4 : Température de sol suivant les mois de l'année .....	172
Fig. 7.5 : Distribution des matériaux composant le mur en moellons de tuffeau .....	172
Fig. 7.6 : Scénario de chauffage .....	173
Fig. 7.7 : Diagrammes de confort hygrothermique des pièces occupées .....	175
Fig. 7.8 : Évolution des teneurs en eau dans les parois en tuffeau .....	176
Fig. 7.9 : Évolutions des teneurs en eau sur la 5 <sup>ème</sup> année .....	177
Fig. 7.10 : Configurations d'isolation (exemple d'une ITI).....	178
Fig. 7.11 : Graphique de Simos du classement des stratégies - Cas réaliste .....	181
Fig. 7.12 : Écart-type des rangs en fonction du rang moyen – Robustesse aux seuils d'indifférence .....	182
Fig. 7.13 : Graphique de Simos pour les jeux extrêmes de seuils d'indifférence .....	182
Fig. 7.14 : Écart-type des rangs en fonction du rang moyen – Robustesse aux seuils de préférence.....	183
Fig. 7.15 : Graphique de Simos pour les jeux extrêmes de seuils de préférence.....	183
Fig. 7.16 : Écart-type des rangs en fonction du rang moyen – Robustesse aux seuils de veto .....	184

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Variabilité des propriétés des pierres calcaires ([CSTC, CTMNC]).....	23
Tableau 1.2 : Classification des pierres calcaires selon la RT 2005 [RT 2005] .....	23
Tableau 1.3 : Extremums des propriétés des calcaires [CTMNC, CSTC, RT 2005] .....	25
Tableau 1.4 : Principales propriétés du tuffeau.....	27
Tableau 1.5 : Description des typologies de maisons individuelles en tuffeau .....	30
Tableau 1.6 : Caractéristiques des maisons individuelles suivies .....	36
Tableau 2.1 : Actions élémentaires d'une réhabilitation .....	49
Tableau 2.2 : Synthèse des actions élémentaires de réhabilitation observées lors des visites .....	50
Tableau 3.1: Modèles de développement de moisissures existants (issus de Berger et al.) .	73
Tableau 3.2 : Synthèse des avantages et inconvénients des critères de coût d'une réhabilitation .....	75
Tableau 3.3 : Synthèse des enjeux, des critères de décision associés et de leurs données d'entrée .....	76
Tableau 4.1 : Niveau de granularité des outils existants.....	79
Tableau 4.2 : Aperçu d'outils de modélisation hygrothermique .....	79
Tableau 4.3 : Données nécessaires au calcul de l'algorithme HaMT .....	82
Tableau 4.4 : Définition des termes de l'équation (4.5).....	83
Tableau 4.5 : Définition des termes de l'équation (4.6) .....	83
Tableau 4.6 : Conditions ambiantes de la comparaison entre EnergyPlus et WUFI 1D [Hagentoft, 2004].....	84
Tableau 4.7 : Propriétés hygrothermiques du tuff (issues de Wufi Database) .....	85
Tableau 4.8 : Présélection de paramètres affectant les critères de décision .....	89
Tableau 4.9 : Description de parois principales du cas d'étude.....	91
Tableau 4.10 : Scénarios de chauffage des zones en contact avec la cellule expérimentale	96
Tableau 4.11 : Incertitude de mesures des capteurs de la station météorologique locale ....	98
Tableau 4.12 : Incertitude des paramètres retenus .....	101
Tableau 4.13 : Synthèse des données météorologiques du 12 au 28 février 2013 .....	103
Tableau 4.14 : Indicateurs de comparaison modèle/mesures pour la simulation initiale ....	105
Tableau 4.15 : Synthèse des indicateurs de comparaison modèle/mesure pour l'itération 0 .....	107
Tableau 4.16 : Caractérisation des relations entre l'erreur du modèle en humidité et les valeurs des paramètres .....	108
Tableau 4.17 : Valeur des paramètres de la simulation la plus cohérente en humidité - itération 0 .....	109
Tableau 4.18 : Caractérisation des relations entre l'erreur du modèle en puissance de chauffage et les valeurs des paramètres .....	110
Tableau 4.19 : Synthèse des indicateurs de comparaison modèle/mesures pour l'itération 1 .....	111
Tableau 4.20 : Synthèse des indicateurs de comparaison modèle/mesure pour l'itération 2 .....	114
Tableau 4.21 : Erreurs du modèle par rapport aux mesures sur la simulation finale .....	114
Tableau 4.22 : Indicateurs d'erreurs sur la simulation finale en période estivale .....	117
Tableau 5.1 : Synthèse de méthodes de rangement .....	125
Tableau 5.2 : Matrice de performances d'un problème d'aide à la décision .....	126
Tableau 6.1 : Composition des parois du cas d'étude .....	143
Tableau 6.2 : Performances du bâtiment avant réhabilitation .....	144
Tableau 6.3 : Actions élémentaires d'isolation des parois .....	145
Tableau 6.4 : Synthèse des stratégies de réhabilitation présélectionnées .....	147

## Liste des tableaux

Tableau 6.5 : Perméabilité à l'air du bâtiment en fonction des actions de réhabilitation réalisées.....	149
Tableau 6.6 : Débits de ventilation des différentes pièces d'un logement en fonction du nombre de pièces principales [Arrêté 1982].....	149
Tableau 6.7 : Actions élémentaires retenues et nomenclature .....	151
Tableau 6.8 : Critères de décision des 89 stratégies de réhabilitation .....	152
Tableau 6.9 : Incertitude des paramètres du modèle .....	159
Tableau 6.10 : Variation maximum de la comparaison entre deux stratégies - Seuils de préférence.....	159
Tableau 6.11 : Seuils de la méthode ELECTRE III.....	160
Tableau 6.12 : Classement des stratégies de réhabilitation - sans présélection (5 premiers rangs) .....	161
Tableau 6.13 : Évaluations des stratégies classées au rang 1 - Cas sans présélection des stratégies .....	162
Tableau 6.14 : Cinq premiers rangs du classement avec présélection .....	163
Tableau 6.15 : Cinq premiers rangs avec présélection (cas n°2).....	163
Tableau 7.1 : Surface équivalente de fuite des pièces occupées .....	174
Tableau 7.2 : Besoins de chauffage du bâtiment non réhabilité par pièce .....	174
Tableau 7.3 : Confort hygrothermique annuel et du confort thermique estivale par pièce ..	175
Tableau 7.4 : Synthèse des teneurs en eau dans le tuffeau après 5 ans.....	176
Tableau 7.5 : Synthèse des actions élémentaires retenues .....	178
Tableau 7.6 : Configurations de surfaces de fuite .....	179
Tableau 7.7 : Configurations de perméabilité à l'air suivant les actions élémentaires .....	179
Tableau 7.8 : Seuils de la méthode ELECTRE - Cas réaliste.....	180
Tableau 7.9 : 10 premiers rangs du classement - Cas réaliste.....	180
Tableau 7.10 : Critères de décision du meilleur compromis et du cas initial .....	185



## **ANNEXES**

## Annexe A Description des bâtiments en tuffeau visités

N°	Bâtiment	Date de visite	Non isolée	En cours d'isolation	Isolée
1	<b>Maison de maître</b> du 15 <sup>ème</sup> siècle – Vivy (49)	19 juin 2011	X		
2	<b>Ancienne grange</b> - Coudray-Macouard (49)	29 avril 2011			X Enduit chaux- chanvre
3	<b>Maison de bourg</b> – Saint-Mathurin sur Loire (49)	29 avril 2011		X Laine de chanvre et bois	
4	Gîte collectif – Lerné (37)	6 avril 2011			X Laine chanvre et lin
5	<b>Maison rurale</b> – Cheviré Le Rouge	20 mai 2011			X Enduit chaux- chanvre
6	Maison de bourg - Gizeux	13 avril 2011	X		
7	Maison semi-troglodyte - Montsoreau	Avril 2011	X		
8	Maison rurale - Cheillé	22 avril 2011			X Chaux-chaivre banché
9	<b>Ancienne mairie</b> – Le Puy Notre Dame	7 juin 2011	X		
10	Maison rurale - Clefs	20 mai 2011			X Enduit chaux- chanvre
11	<b>Maison troglodyte</b> – Villaines les Rochers	22 avril 2011		X Enduit chaux- chanvre banché	
12	Maison de bourg - Montsoreau	5 octobre 2011			X Laine de verre
13	Maison de bourg - Lerné	6 avril 2011	X		
14	<b>Mairie</b> - Forges	7 juin 2011	X		
15	Maison de maître – Saint-Martin	10 mai 2011	X		
16	<b>Maison de bourg</b> 15 <sup>ème</sup> siècle - Langeais	22 avril 2011			X Chaux-chaivre banché et laine de chanvre
17	<b>Maison</b> - Varennes	26 mai 2010	X		
18	<b>Maison rurale</b> – Vieux Vivy	27 avril 2011	X		

## Annexe B Liste des paramètres de l'analyse de sensibilité sur l'humidité

1	Axe par rapport au Nord	52	Coefficient d'infiltrations liées au tirage thermique
2	Chaleur spécifique de la laine de verre	53	Coefficient d'infiltrations liées au vent
3	Isotherme de sorption de la lame d'air	54	Chaleur spécifique du carrelage
4	Coefficient de suction du tuffeau	55	Épaisseur de l'ardoise
5	Absorption thermique de la laine de verre	56	Densité de l'ardoise
6	Absorption solaire de la laine de verre	57	Chaleur spécifique de l'ardoise
7	Coefficient de suction de la laine de verre	58	Épaisseur du parquet
8	Coefficient de suction du plâtre	59	Densité du parquet
9	Absorption solaire de la laine de verre	60	Chaleur spécifique du parquet
10	Coefficient de suction du carrelage	61	Épaisseur de la porte
11	Coefficient de suction de l'ardoise	62	Température de consigne
12	Coefficient de suction du parquet	63	Densité de la porte
13	Coefficient de suction de la porte	64	Chaleur spécifique de la porte
14	Épaisseur du plâtre	65	Épaisseur de la lame d'air
15	Coefficient de suction de la lame d'air	66	Densité de la lame d'air
16	Coefficient de distribution du tuffeau	67	Chaleur spécifique de la lame d'air
17	Coefficient de distribution de la laine de verre	68	Épaisseur du vitrage
18	Coefficient de distribution du plâtre	69	Transmission solaire du vitrage
19	Densité du plâtre	70	Réflexion solaire ext du vitrage
20	Coefficient de distribution du carrelage	71	Réflexion solaire int du vitrage
21	Coefficient de distribution de l'ardoise	72	Réflexion v ext du vitrage
22	Coefficient de distribution du parquet	73	Réflexion v int du vitrage
23	Chaleur spécifique du plâtre	74	Émissivité IR ext du vitrage
24	Coefficient de distribution de la porte	75	Émissivité IR int du vitrage
25	Coefficient de distribution de la lame d'air	76	Conductivité thermique du vitrage
26	Résistance à la diffusion du tuffeau	77	Porosité du tuffeau
27	Résistance à la diffusion de la laine de verre	78	Teneur en eau initiale du tuffeau
28	Résistance à la diffusion du plâtre	79	Porosité de la laine de verre

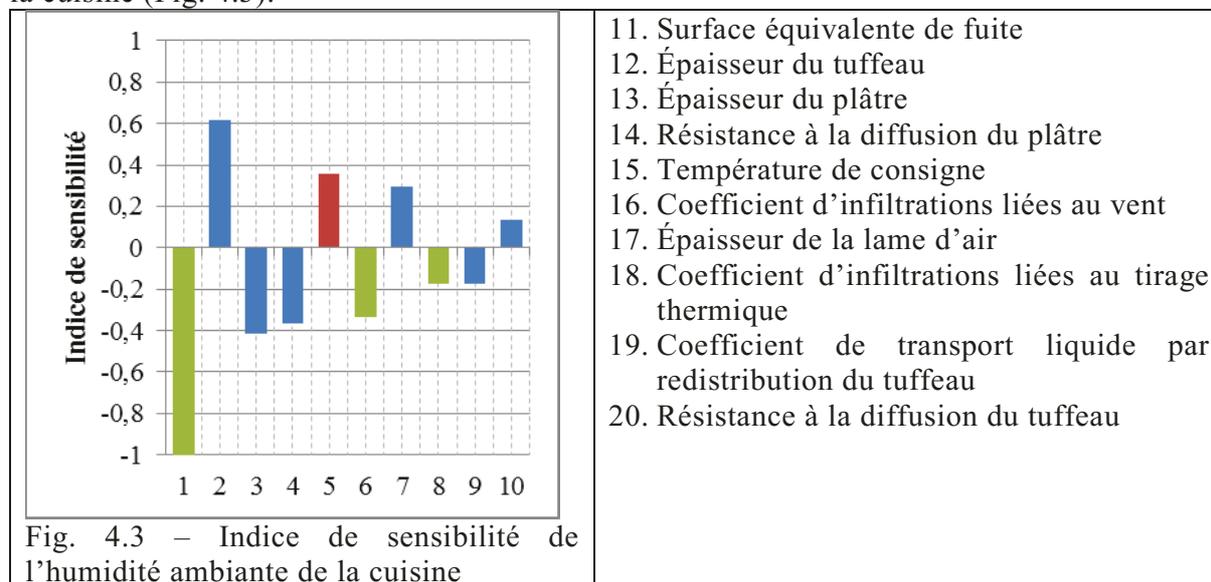
29	Résistance à la diffusion du carrelage
30	Résistance à la diffusion de l'ardoise
31	Résistance à la diffusion du parquet
32	Résistance à la diffusion de la porte
33	Résistance à la diffusion de la lame d'air
34	Absorption thermique du plâtre
35	Conductivité thermique du tuffeau
36	Absorption solaire du plâtre
37	Absorption v du plâtre
38	Conductivité thermique de la laine de verre
39	Conductivité thermique du plâtre
40	Conductivité thermique du carrelage
41	Conductivité thermique de l'ardoise
42	Conductivité thermique du parquet
43	Albédo
44	Épaisseur du carrelage
45	Conductivité thermique de la porte
46	Conductivité thermique de la lame d'air
47	Coefficient de convection extérieur
48	Coefficient de vapeur extérieur
49	Gains internes
50	Débit d'infiltration
51	Densité du carrelage

80	Teneur en eau initiale de la laine de verre
81	Porosité du plâtre
82	Épaisseur du tuffeau
83	Teneur en eau initiale du plâtre
84	Porosité du carrelage
85	Teneur en eau initiale du carrelage
86	Porosité de l'ardoise
87	Teneur en eau initiale de l'ardoise
88	Porosité du parquet
89	Teneur en eau initiale du parquet
90	Porosité de la porte
91	Teneur en eau initiale de la porte
92	Densité du tuffeau
93	Isotherme de sorption du tuffeau
94	Chaleur spécifique du tuffeau
95	Isotherme de sorption de la laine de verre
96	Épaisseur de la laine de verre
97	Isotherme de sorption du plâtre
98	Densité de la laine de verre
99	Isotherme de sorption du carrelage
100	Isotherme de sorption de l'ardoise
101	Isotherme de sorption du parquet
102	Isotherme de sorption de la porte

## Annexe C Résultats complets de l'analyse de sensibilité de l'humidité

### Sensibilité de l'humidité ambiante de la cuisine

Sur les 103 paramètres testés, seuls 10 possèdent un indice de sensibilité supérieur à 0,1 dans la cuisine (Fig. 4.3).



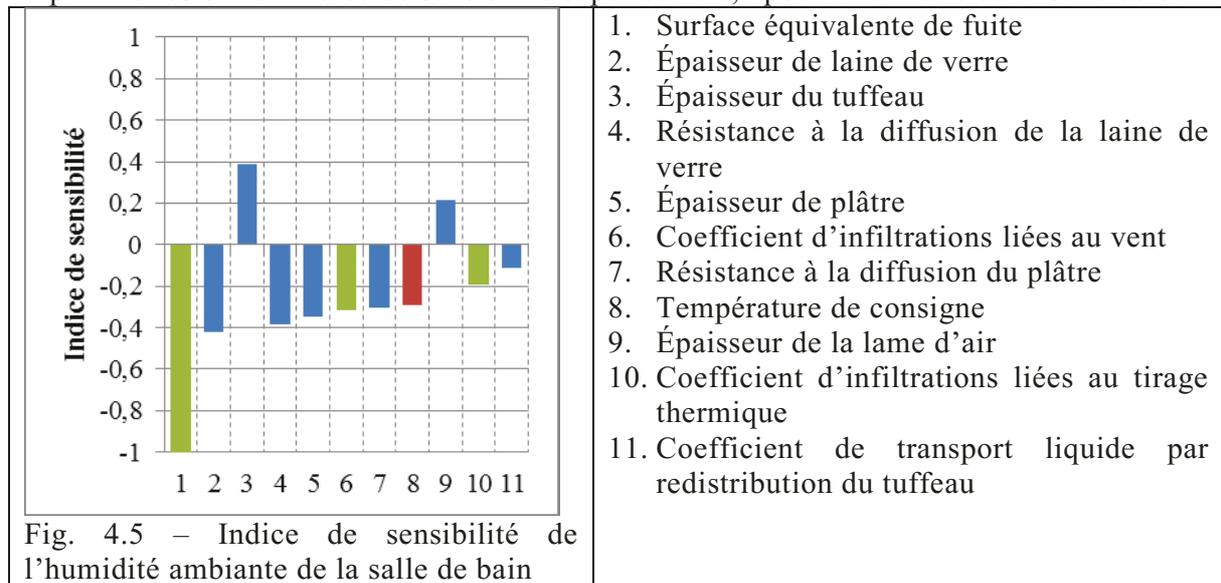
Le paramètre le plus influent est la surface équivalente de fuite. Viennent ensuite les caractéristiques du tuffeau (épaisseur) et du plâtre (épaisseur, résistance à la diffusion). Il y a toutefois un écart significatif entre l'indice de sensibilité du premier paramètre (-1) et celui du second (0,6).

La température de consigne affecte aussi l'humidité de la pièce avec un indice de sensibilité de 0,36.

Le taux de renouvellement d'air a une influence significative sur l'humidité ambiante de la cuisine car les trois paramètres qui en gèrent le calcul ont été retenus.

## Sensibilité de l'humidité ambiante dans la salle de bain

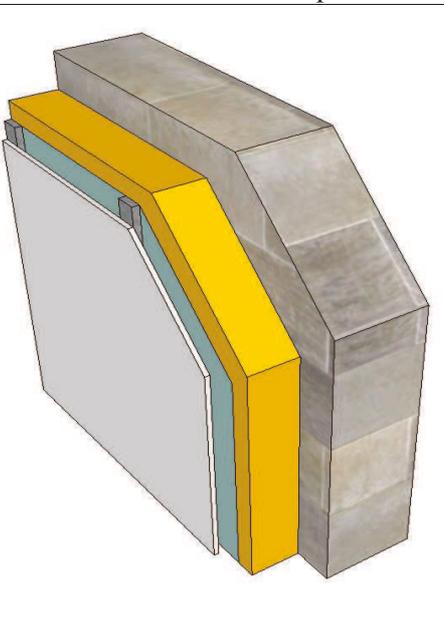
11 paramètres ont un indice de sensibilité supérieur à 0,1 pour l'humidité de la salle de bain.



Nous retrouvons ici la surface équivalente de fuite comme paramètre numéro 1. Son influence surpasse nettement celles des autres paramètres : l'indice de sensibilité du deuxième paramètre n'est que de 0,42. Les caractéristiques des matériaux sont ici aussi retenues. Cependant, la laine de verre est présente dans cette zone avec le tuffeau et le plâtre.

## Annexe D Description des actions élémentaires « isolation des parois verticales »

Solution 1 : Isolation intérieure par laine minérale

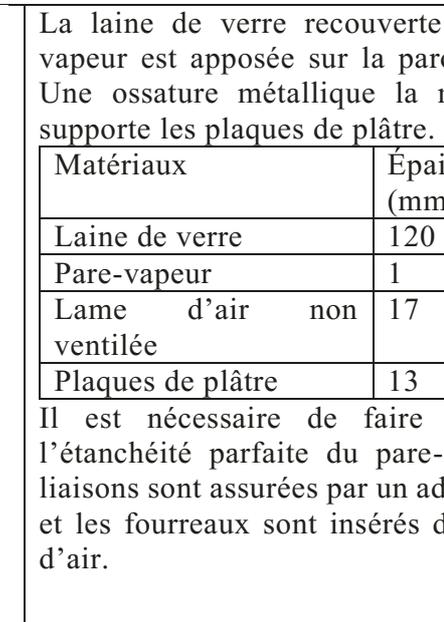


La laine de verre recouverte d'un pare-vapeur est apposée sur la paroi existante. Une ossature métallique la maintient et supporte les plaques de plâtre.

Matériaux	Épaisseur (mm)
Laine de verre	120
Pare-vapeur	1
Lame d'air non ventilée	17
Plaques de plâtre	13

Il est nécessaire de faire attention à l'étanchéité parfaite du pare-vapeur. Les liaisons sont assurées par un adhésif adapté et les fourreaux sont insérés dans la lame d'air.

Solution 2 : Isolation intérieure par ouate de cellulose

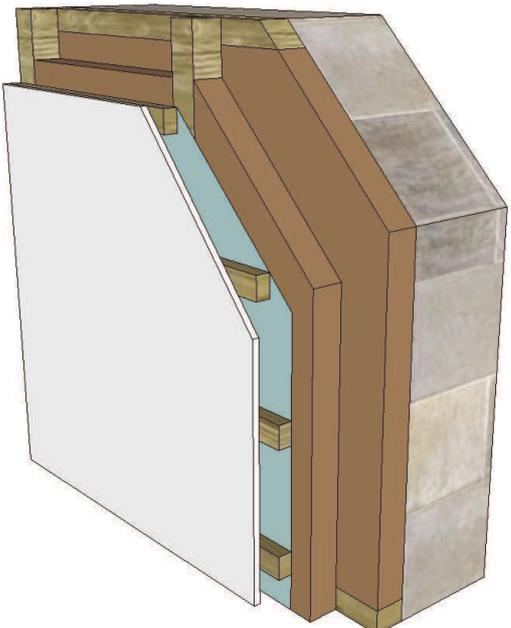


La ouate de cellulose est insufflée entre le mur et le pare-vapeur. Les montants ne sont pas fixés directement sur la paroi mais grâce à des équerres pour éviter les ponts thermiques. Une lame d'air est dégagée entre le pare-vapeur et les plaques de plâtre.

Matériaux	Épaisseur (mm)
Ouate de cellulose	120
Pare-vapeur	1
Lame d'air non ventilée	30
Plaques de plâtre	13

Il est nécessaire de faire attention à l'étanchéité parfaite du pare-vapeur. Les liaisons sont assurées par un adhésif adapté et les fourreaux sont insérés dans la lame d'air.

Solution 3 : Isolation intérieure par fibre de bois

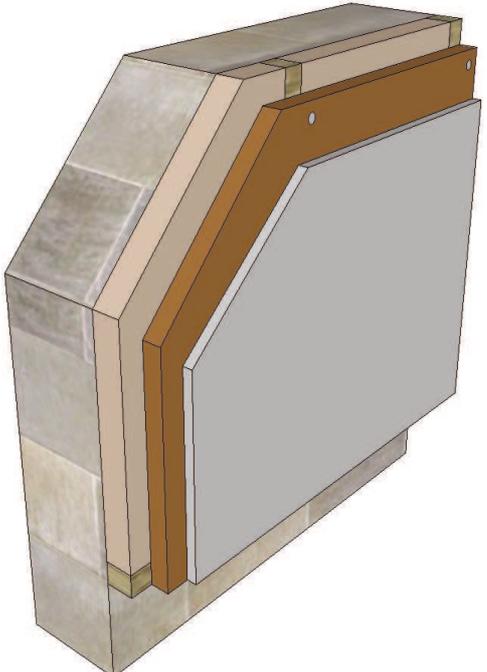


Les panneaux semi-rigides en fibre de bois en deux couches sont apposés entre le mur existant et le pare-vapeur. Une lame d'air est dégagée entre les plaques de plâtre et le pare-vapeur

Matériaux	Épaisseur (mm)
Ouate de cellulose	120
Pare-vapeur	1
Lame d'air non ventilée	30
Plaques de plâtre	13

Il est nécessaire de faire attention à l'étanchéité parfaite du pare-vapeur. Les liaisons sont assurées par un adhésif adapté et les fourreaux sont insérés dans la lame d'air.

#### Solution 4 : Isolation extérieure par fibre de bois



Des panneaux semi-rigides de laine de bois sont placés entre des montants en bois puis des panneaux rigides de fibres de bois sont fixés mécaniquement. Le complexe est recouvert d'un enduit.

Matériaux	Épaisseur (mm)
Laine de bois	100
Fibre de bois	60
Enduit	21

Deux points de vigilance sont à noter sur cette technique :

- Une distance de 20 cm par rapport au sol doit être respectée et traitée par un complexe imperméable pour éviter que le rejaillissement d'eau ne dégrade l'isolation.
- Les fabricants précisent que cette technique ne fonctionne que si la maçonnerie est sèche. Elle ne peut donc être utilisée en présence de remontées capillaires.

## Annexe E Classement complet des stratégies de réhabilitation du cas simplifié

Rang	Stratégies	Rang	Stratégies	Rang	Stratégies	Rang	Stratégies
1	S_1040 S_1110 S_2001 S_2002 S_2040	8	S_1011 S_1012 S_1111 S_1120 S_1141 S_1142	15	S_0100 S_0140 S_1121 S_2021	22	S_2032
2	S_1000 S_1001 S_1002 S_1010 S_1101 S_1102	9	S_1112 S_2011 S_2120 S_0002	16	S_0110 S_0141 S_0142 S_1122 S_2022 S_2121	23	S_0122
3	S_1100 S_2000 S_2010 S_2100	10	S_1030 S_2012 S_2041	17	S_0111 S_0112 S_0020 S_0022	24	S_0130
4	S_2101 S_2110	11	S_2030 S_2042 S_0041	18	S_0120 S_2122	25	S_0131
5	S_1020 S_2140	12	S_1130 S_2111 S_2112 S_0011 S_0012 S_0040 S_0042	19	S_0121 S_1031 S_1131	26	S_0132
6	S_2102	13	S_1021 S_2130 S_0010	20	S_1032 S_1132 S_2131		
7	S_0001	14	S_0101 S_0102 S_1022 S_0021	21	S_2031 S_2132 S_0030 S_0031 S_0032		

## Annexe F Scénarios d'occupation du cas réaliste

