

Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain

Sophie Claude

► **To cite this version:**

Sophie Claude. Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain. Génie civil. INSA de Toulouse, 2018. Français. NNT : 2018ISAT0008 . tel-01884760

HAL Id: tel-01884760

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01884760>

Submitted on 1 Oct 2018

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA Toulouse)*
Discipline ou spécialité : *Génie Civil*

Présentée et soutenue par

Sophie CLAUDE

Le 8 mars 2018

*Etude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux
pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain*

JURY

Monika WOLOSZYN, Université de Savoie (Rapporteur)
Youssef DIAB, Université Paris-Est Marne-la-Vallée (Rapporteur)
Sofiane AMZIANE, Université Clermont Auvergne (Examinateur)
Michel SIMON, Vice-Président du Grand Cahors (Invité)
Gilles ESCADEILLAS, Université Paul Sabatier (Directeur de thèse)
Stéphane GINESTET, INSA Toulouse (Co-Directeur de thèse)
Marion BONHOMME, INSA Toulouse (Co-Directrice de thèse)

Ecole doctorale : *Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)*

Unité de recherche : *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)
Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA)*

Directeur et encadrant(e)s de Thèse : *Gilles ESCADEILLAS, Stéphane GINESTET et Marion BONHOMME*

Remerciements

Voici le moment de prendre le temps de remercier les différentes personnes qui m'ont accompagnée au cours de ses trois dernières années, qui m'ont aidée à avancer dans ce travail de réflexion et à structurer ma pensée, qui m'ont épaulée, donné du temps et de leur connaissance, de leur savoir-faire et la liste est longue...

Ces remerciements, je les adresse tout d'abord à mon jury de thèse, Monika Wolozsyn et Youssef Diab qui ont accepté de rapporter ce travail de thèse et Sofiane Amziane pour avoir présidé ce jury,

A Gilles Escadeillas et Michel Simon, qui ont pris l'initiative de bâtir ensemble ce projet de thèse CIFRE qui sortait des normes. A la Communauté d'Agglomération du Grand Cahors, d'avoir financé ce travail de recherche. Aux deux laboratoires (LMDC et LRA) et leurs membres qui m'ont hébergée pendant ces trois ans,

A Stéphane Ginestet et à Marion Bonhomme, pour leur accompagnement au cours de ces trois années. Aux libertés que l'on m'a laissé prendre pour donner une direction à mon travail de thèse,

Aux différents artisans qui ont participé au projet, en particulier Gwendal Leconte, Plume Mattio, Cyril Letendart et Eric Lalande. A Ludovic Puydebois de la PFT,

A Nicolas Moulène, bien sûr, qui s'est très largement investi dans le projet, à Sophie Gomez qui a pris le relais. Merci à vous deux pour le temps que vous avez dédié à ce projet,

Aux différents partenaires du projet européen, qui me fait voir l'ampleur que prend ce projet,

A mes collègues de bureau à Cahors, pour leur accueil et un thé partagé chaque fois que je montais,

Au service patrimoine, pour cette mine de savoir sur le bâti historique de Cahors. Au service technique de Cahors, qui certes m'a fait écrouler mon mur, mais m'a également bien aidé par d'autres occasions !

A Billy et Pierre pour cette répétition de soutenance et tous leurs conseils avisés ! A Lou, Marie et Mailys pour m'avoir aidé à cuisiner ce buffet de thèse. A Noémie, pour avoir géré dans l'urgence la tenue de soutenance !

A Billy (encore !), à Aurélie et Rudy pour tous ces échanges et questionnements sur ces thématiques scientifiques peu communes au LMDC. Thomas de Larrard pour mes questions concernant l'analyse de sensibilité et Mathieu Labat pour celles concernant l'hygrothermie,

Aux doctorants du bureau de l'UCL, qui ont rendu ce mois à Londres inoubliable, à Valentina pour tous ces moments de réflexions partagés, à Ivan Korolija, Hector Altamirano et Jonathon Taylor pour leur aide précieuse.

Aux rencontres dans les différentes conférences, à tous les chercheurs, doctorants, post-doctorants de différents laboratoires que j'ai contacté par mail, par téléphone au cours de cette thèse, dont la disponibilité et la sympathie pour répondre à mes questions m'ont surprise.

Et puis bien sûr, il y a tous ceux qui n'ont rien à voir avec ce travail de thèse, mais qui sont de loin essentiels à un équilibre, à ma vie.

Aux filles, pour toutes ces années d'amitié, pour ce que l'on a traversé ensemble cet été, pour le rire de chacune, pour tout ce qui nous attend encore.

A toutes mes amitiés grenobloises qui durent et perdurent dans le temps, malgré la distance, tous vous citer serait prendre le risque d'oublier quelqu'un !

A ces rencontres improbables, dans le train, dans les covoiturages, au Boulegan qui a donné naissance à l'Ethno, à l'Ethno qui a donné naissance à tous ces moments de musique, de joie et de soutien.

A l'ensemble Méditerranéen, d'être apparu sur ma route, suite d'une rencontre dans le train, d'épicerie arabe, et d'envie de partager la musique. Merci d'être venu m'écouter soutenir (quel honneur !) et d'être venu fêter ça le soir en musique !

A ma famille, de mes grands-parents à mes cousins ! A mes parents, à ma grande sœur, mon alliée,

A Miguel, de ne m'avoir jamais pris trop au sérieux, d'avoir toujours tout dédramatisé, de partager d'autres essentiels avec moi.

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi. - **Albert Einstein**

A Gwladys, lumineuse...

Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments est devenu aujourd'hui une nécessité imposée par l'urgence écologique. Les logements anciens, en centre urbain ou en milieu rural, représentent une part importante du parc immobilier français, parfois insalubre, à rénover. Dans le centre ancien de Cahors, les vieilles demeures médiévales sont considérées comme un patrimoine historique à sauvegarder qui ne peut être rénové thermiquement que de l'intérieur pour préserver la valeur architecturale de la façade extérieure. Or l'isolation par l'intérieur peut bouleverser l'équilibre hygrothermique de la paroi et est susceptible d'entraîner une modification de la capacité de séchage de celle-ci, un risque de condensation interstitielle et l'apparition de moisissures. Il est donc essentiel de valider la performance hygrothermique de la paroi après isolation en s'appuyant sur des outils et des méthodes fiables qui permettent de qualifier au mieux les solutions d'isolations choisies.

Le choix du matériau et du système d'isolation est déterminant car il influence à la fois la performance hygrothermique de la paroi, la qualité de l'air intérieur, le coût et l'empreinte carbone de la rénovation. Ce travail de thèse, réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE avec la Communauté d'Agglomération du Grand Cahors, étudie la pertinence des isolants bio-sourcés pour l'isolation par l'intérieur du bâti ancien en centre urbain en se focalisant sur la performance hygrothermique de la paroi. Les spécificités des matériaux bio-sourcés et du bâti ancien et l'absence de certaines données nous ont amené à réaliser une étude multi-échelle alliant expérimental et numérique.

Les simulations hygrothermiques permettent d'évaluer les risques de développement de pathologies après rénovation de ces parois, mais la fiabilité des résultats dépend en partie des données d'entrée et des conditions aux limites. Pour cela, les données matériaux proviennent d'une caractérisation en laboratoire et une instrumentation in-situ a permis de confronter les résultats numériques et expérimentaux. Cette instrumentation in-situ a été menée au sein d'un Living Lab permettant à la fois l'expérimentation et la rencontre des différents acteurs de la rénovation au niveau local à travers la mise en place d'une isolation par l'intérieur à base de matériaux bio-sourcés.

A Cahors, les bâtiments sont situés dans un environnement urbain très dense, d'époque médiévale, où la création d'un microclimat urbain spécifique dû à la morphologie urbaine ne peut être négligée. Dans cette étude, la modification par l'environnement urbain des conditions aux limites extérieures (principalement le rayonnement solaire et les coefficients de transfert par convection) a été analysée. Le modèle mis en œuvre couple le modèle hygrothermique Delphin au modèle de simulation thermique des bâtiments EnergyPlus et à l'outil ArcGIS (Geographic Information Systems). L'objectif est de prédire les conditions aux limites extérieures dans la géométrie réelle de la zone urbaine dense ainsi que le transfert hygrothermique dans les enveloppes du bâtiment. Les résultats de la simulation indiquent une corrélation quantitative entre les caractéristiques de la morphologie urbaine et la performance hygrothermique des parois rénovées et montrent que certaines configurations accentuent les risques de dégradation des parois.

Mots clés : Matériau bio-sourcé, rénovation bâti ancien, transferts de chaleur et de masse, isolation par l'intérieur, performance hygrothermique, microclimat urbain

Improving the energy efficiency of buildings is essential to reduce greenhouse gas emissions and mitigate against climate change. Historic dwellings in rural areas or urban centres represent a large part of the French building stock that needs to be refurbished. In the city centre of Cahors, the old medieval dwellings are considered valuable cultural heritage and internal insulation is often the only insulation technique available that preserves the architectural value of the exterior façade. But internal insulation may impact the hygrothermal performance of the wall, leading to lowered drying capacity, interstitial condensation and the risk of mould growth. In order to avoid hygrothermal failure, a reliable risk assessment is extremely important and must be done with reliable tools and methods to identify the right insulation technique.

The selection of the insulation material and the system is crucial because of its impact on the hygrothermal performance of the wall, the indoor air quality, the financial cost, and the carbon footprint of the refurbishment solution. This PhD thesis, funded by a CIFRE agreement with the Communauté d'Agglomération du Grand Cahors, studied the suitability of bio-based materials for the internal insulation of historical dwellings in urban area, focusing on the hygrothermal performance of the walls. Due to the complexity of the problem and the lack of needed data, we ran a multi-scale study including both experimental and numerical modelling methods.

Hygrothermal models may be used to assess the risk of failure, but the accuracy of results depends on reliable input data, including external boundary conditions which may vary significantly in dense medieval cities such as Cahors. Hence, in this research, the material data was obtained from laboratory analysis, and numerical results were compared with long-term monitoring data.

In Cahors, the dwellings are located in a very dense medieval urban area, where the microclimate – which is a consequence of urban morphology – cannot be neglected, when modelling the hygrothermal performance of façades. In this study, the modification of external boundary conditions – in particular modification of solar radiation and convective coefficients – by surrounding buildings is analysed. Simulations were run by linking the hygrothermal model Delphin to the building energy model EnergyPlus and the Geographic Information Systems software ArcGIS. The goal was to predict the external boundary conditions for individual façades in the city, accounting for urban geometry of the city centre of Cahors and the hygrothermal behaviour of external walls.

Results highlight a quantitative correlation between some urban morphology characteristics and the hygrothermal performance of refurbished walls, with some configurations raising the risk of damage patterns.

Keywords: bio-based material, historical building refurbishment, hygrothermal performance, internal insulation, heat and mass transfer, urban microclimate

SOMMAIRE

Introduction générale.....	7
CHAPITRE 1 : Contexte politique, économique et social	
1. Introduction.....	10
2. Rénover le bâti ancien.....	12
2.1. Du bâti ancien au bâti contemporain : un bouleversement des logiques constructives	12
2.2. Une réglementation thermique différente.....	15
2.3. Particularité de la rénovation en milieu urbain.....	17
3. Utiliser les isolants bio-sourcés.....	18
3.1. Un matériau soutenable.....	18
3.2. Confort et santé.....	19
3.3. Blocage de la filière.....	19
4. Mettre en place un Living Lab pour dépasser les blocages.....	20
4.1. Le Living Lab pour répondre à la complexité.....	21
4.2. Les limites du Living Lab mis en place à Cahors.....	24
5. Conclusion.....	26
6. Références.....	27
CHAPITRE 2 : Contexte scientifique et méthodologie	
1. Introduction.....	30
2. Particularités physiques des matériaux bio-sourcés.....	30
2.1. Un milieu poreux.....	30
2.2. Influence sur les propriétés hygrothermiques.....	31
2.3. Sensibilité des matériaux bio-sourcés à l'humidité.....	33
3. Caractérisation à l'échelle du matériau.....	33
4. Etude à l'échelle de la paroi et du bâtiment.....	35
5. Modéliser les transferts couplés au sein des matériaux bio-sourcés.....	35
6. Méthodologie adoptée dans le cadre de la thèse.....	36
7. Conclusion.....	38
8. Références.....	39
CHAPITRE 3 : Dispositifs expérimentaux	
1. Introduction.....	42
2. Caractérisation des matériaux.....	42
2.1. Composition et choix des matériaux.....	42
2.2. Propriétés microstructurales.....	43
2.3. Propriétés thermo-physiques.....	44

2.4.	Propriétés hydriques.....	49
2.5.	Conclusion	57
3.	Instrumentation in-situ	58
3.1.	Cas d'étude.....	58
3.2.	Suivi à long terme	60
3.3.	Résultats.....	63
4.	Conclusion du chapitre	73
5.	Références	74

CHAPITRE 4 : Influence de la morphologie urbaine

1.	Introduction.....	78
2.	Caractérisation de la morphologie et de la climatologie urbaine	78
2.1.	Morphologie urbaine.....	78
2.2.	Modification des conditions aux limites par le microclimat urbain.....	78
2.3.	Définition d'indicateurs	86
3.	Méthodologie associée et validation des outils numériques utilisés.....	91
3.1.	Analyse en composantes principales.....	91
3.2.	Association EnergyPlus-ArcGIS	92
4.	Résultats et analyses.....	97
4.1.	Etude du tissu urbain	97
4.2.	Résultats.....	98
5.	Conclusion	104
6.	Références	105

CHAPITRE 5 : Transferts de chaleur et de masse

1.	Introduction.....	110
2.	Transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux	110
2.1.	Mécanismes de transfert d'humidité et de stockage dans les matériaux poreux	112
2.2.	Mécanismes de transfert de chaleur	114
3.	Sélection d'un outil de simulation hygrothermique.....	115
3.1.	Présentation du modèle DELPHIN 5.....	115
3.2.	Validation et vérification du modèle	115
4.	Cas d'étude: Caractéristiques des parois.....	118
4.1.	Description des parois	118
4.2.	Présentation des matériaux	118
4.3.	Hypothèses du modèle et choix de simplification.....	120
4.4.	Conditions aux limites	121
4.5.	Configurations étudiées	122

5. Résultats et discussion	123
5.1. Comparaison des configurations [REF] et [RAD.M]	123
5.2. Comparaison des configurations [RAD.M] et [F.OBST].....	124
5.3. Comparaison des configurations [WDR_ville] et [WDR_fact3].....	125
5.4. Influence du coefficient de convection massique [COEF.M]	126
5.5. Comparaison de chacune des configurations pour la paroi Ouest.....	126
6. Conclusion	127
7. Références	129

CHAPITRE 6 : Durabilité de la paroi

1. Introduction	132
2. Croissance de moisissures et évaluation du risque	132
3. Choix du modèle, de l'indicateur et des paramètres	135
3.1. Modèle VTT	135
3.2. Choix des différents indicateurs.....	136
4. Résultats et analyse	139
4.1. Identifications des variables représentatives.....	139
4.2. Facteur de risques en fonction de l'orientation et de la typologie de la paroi	143
4.3. Cartographie des résultats.....	153
5. Conclusion	154
6. Références	156

CONCLUSION

Conclusions des chapitres	159
Perspectives de recherche	162

INTRODUCTION GENERALE

Fenêtres à croisées du 12^{ème} siècle, maçonneries apparentes dévoilant d'anciennes baies géminées, nos centres urbains sont riches d'un patrimoine culturel et architectural à valoriser, bien souvent reflets d'une culture et d'un savoir constructif local. Et pourtant, ces mêmes centres urbains connaissent un déclin dont seules les métropoles et les villes très touristiques semblent être épargnées. La communauté d'agglomération du Grand Cahors, qui finance ce travail de thèse doctorale dans le cadre d'une convention CIFRE, se lance le défi de revitaliser son centre ancien. Tâche ardue car les exigences sociétales actuelles ont modifié nos modes d'habiter et de déplacement. Mais justement, cette revitalisation urbaine n'est-elle pas l'opportunité de repenser nos villes et de les rendre plus soutenables ?

Résorber l'habitat indigne et améliorer la performance énergétique du bâti ancien tout en sauvegardant l'aspect patrimonial font partie des objectifs proposés par la ville de Cahors. Cette rénovation est aussi vue comme l'occasion de valoriser une économie locale, en s'appuyant sur le savoir-faire des artisans et en promouvant des matériaux à faible impact environnemental. Le Living Lab mis en place à Cahors au cours de ce travail de thèse a servi de lieu d'expérimentation mais aussi de rencontres entre les différents acteurs de la rénovation thermique au niveau local.

Dans les centres anciens, afin de concilier patrimoine et amélioration énergétique du bâti, l'isolation thermique par l'intérieur est souvent préférée à d'autres solutions techniques. Or une telle modification de la paroi opaque peut provoquer une rupture de l'équilibre hygrothermique. De plus, les matériaux bio-sourcés et le bâti ancien présentent des singularités qui ne peuvent être négligées. De façon à préserver la durabilité de la paroi, il est donc essentiel de valider la performance hygrothermique après isolation en s'appuyant sur des outils et des méthodes fiables qui permettent de qualifier au mieux les solutions d'isolations choisies.

Ce travail de thèse est divisé en six chapitres.

Les deux premiers décrivent le contexte socio-économique ainsi que scientifique dans lequel s'inscrit cette étude. L'amélioration énergétique des logements anciens est essentielle aux objectifs de réduction de consommation énergétique. Mais sur bien des points, la rénovation thermique de ceux-ci diffère de celle du bâti contemporain. Afin d'assurer la performance hygrothermique de la paroi, une caractérisation physique des matériaux fiable et des simulations hygrothermiques adéquates sont nécessaires. Or, l'étude bibliographique met en avant des écarts entre les mesures et les simulations numériques des matériaux à forte hygroscopicité et possédant une perméabilité élevée comme les matériaux bio-sourcés. Afin de répondre à cette problématique, nous proposons une méthodologie qui confronte différentes échelles et allie expérimental et numérique.

Par la suite, dans le Chapitre 3, afin de mieux connaître les transferts de chaleur et de masse au sein des matériaux étudiés, ce travail démarre à l'échelle matériau avec la caractérisation hygrothermique des briques et des isolants bio-sourcés, sous des sollicitations stationnaires et dynamiques. En parallèle, une instrumentation in-situ permet d'avoir une analyse sous climat réel des caractéristiques stationnaires et dynamiques de deux parois représentatives du bâti cadurcien.

Les sollicitations extérieures ne pouvant être fidèlement reproduites sans la prise en compte de l'influence de la morphologie urbaine sur le climat urbain, une étude de celle-ci relevant les spécificités du tissu urbain du centre de Cahors est réalisée Chapitre 4. La pertinence de l'influence du microclimat urbain sur la réponse hygrothermique de la paroi et la validité du modèle de transfert de chaleur et de masse sont ensuite vérifiées Chapitre 5.

Enfin, une évaluation des risques liés à une humidité interstitielle élevée, qui provoquerait une dégradation microbologique progressive est menée Chapitre 6, permettant de valider ou d'appliquer un principe de précaution à l'usage des isolants bio-sourcés ou conventionnels utilisés pour l'isolation intérieure selon la façade étudiée.

CHAPITRE 1

Contexte politique, économique et social

L'enjeu peut devenir à bien des égards, un catalyseur de changements bénéfiques. La crise du climat peut en effet offrir la possibilité de rebâtir et de raviver les économies locales.

Naomi Klein

1. Introduction.....	10
2. Rénover le bâti ancien.....	12
2.1. Du bâti ancien au bâti contemporain : un bouleversement des logiques constructives	12
2.1.1. Echelle du matériau	12
2.1.2. Echelle du bâtiment.....	13
2.1.3. Echelle du tissu urbain.....	14
2.2. Une réglementation thermique différente	15
2.3. Particularité de la rénovation en milieu urbain.....	17
3. Utiliser les isolants bio-sourcés.....	18
3.1. Un matériau soutenable.....	18
3.2. Confort et santé	19
3.3. Blocage de la filière	19
4. Mettre en place un Living Lab pour dépasser les blocages.....	20
4.1. Le Living Lab pour répondre à la complexité	21
4.1.1. Un Living Lab dimensionné pour le projet ENERPAT.....	22
4.1.2. La gouvernance partenariale.	24
4.2. Les limites du Living Lab mis en place à Cahors.....	24
5. Conclusion	25
6. Références	27

1. Introduction

Les dernières décennies, accompagnées d'une crise énergétique et climatique, ont amené avec elles de nouveaux défis et une prise de conscience des conséquences des fonctionnements de notre société moderne basée sur les énergies fossiles et particulièrement énergivore. Au sein de cette société, le secteur du bâtiment n'est pas en reste car il représente en France environ 45% de la consommation de l'énergie finale (résidentiel et tertiaire confondus) et est responsable de plus de 20% des émissions de gaz à effet de serre (ADEME 2014).

Pour répondre à cette problématique, l'urbanisme, l'architecture et le génie civil font partie des disciplines appelées à innover en matière de construction, de rénovation, de formes bâties, et des modes de vie qui en découlent. En effet, les activités et modes de consommation liés au milieu urbain génèrent une empreinte écologique importante ; ainsi on estime que 75 % de la consommation d'énergies fossiles dans les pays de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economiques) a lieu dans les villes.

Il existe donc une urgence écologique à venir améliorer l'efficacité énergétique du bâti, notamment en milieu urbain. Mais cette urgence n'est pas seulement écologique, mais également sociétale. Dans son 21^{ème} rapport annuel sur l'état du mal-logement (Fondation Abbé Pierre 2016), la Fondation Abbé Pierre souligne qu'environ 15% des Français sont en précarité énergétique et qu'il existe une corrélation claire entre la difficulté à se chauffer et la dégradation de l'état de santé. La précarité énergétique dépend de multiples déterminants (prix élevé de l'énergie, mauvaises conditions d'habitat, faibles ressources financières) rendant difficiles la caractérisation des ménages concernés. Plusieurs indicateurs existent, mais le critère de définition actuellement retenu, bien que contesté, est l'allocation d'au moins 10 % des revenus aux dépenses énergétiques : 3,8 millions de ménages seraient alors concernés en France.

Même si les chiffres exacts ne sont pas connus, selon un rapport de la communauté d'agglomération du Grand Cahors (Communauté d'Agglomération du Grand Cahors, 2014), le centre de Cahors habité majoritairement par une population modeste compte environ 30% d'habitants en précarité énergétique alors que la moyenne française avoisine 15%. Cette valeur élevée s'explique notamment par le nombre important d'habitats considérés comme indignes et le haut taux de vacance du centre ancien (environ 30%) qui entraîne une surconsommation pour les parties habitées d'un immeuble presque vide.

La rénovation est donc une urgence, d'autant plus que depuis juillet 2015, la loi sur la transition énergétique stipule que la performance énergétique est l'un des critères de décence des logements en location (Loi n° 2015-992).

La ville de Cahors, possède un centre historique, d'époque médiévale, considéré comme héritage culturel (Figure 1). Forte de ce patrimoine, la ville de Cahors souhaite redynamiser son centre en valorisant ses richesses architecturales mais également en améliorant le confort d'habiter des appartements médiévaux pour faire revenir les jeunes ménages et éviter le dépeuplement et la paupérisation du centre. Pour cela, en 2014, la Ville de Cahors et la Communauté d'agglomération du Grand Cahors ont engagé une politique de restauration et de reconstruction de la ville sur la ville dans le cadre du projet « Cœur d'Agglo ». Le développement durable constitue le fondement de cette intervention, en articulation avec la révision du Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur (PSMV) du Site Patrimoine Remarque et la démarche innovante

« ENERPAT », contraction des termes Energie et Patrimoine, qui s'interroge sur comment conjuguer efficacité énergétique des bâtiments et patrimoine.



Figure 1 : Délimitation du site patrimoine remarquable à Cahors (gauche), Cathédrale St Etienne, au cœur du centre médiéval (droite) (issu de Chantiers 2012).

Différentes stratégies d'amélioration énergétique peuvent être mises en place : les stratégies dites passives visant à améliorer l'enveloppe du bâti et les stratégies actives favorisant des systèmes énergétiques plus efficaces. Dans le cadre de cette thèse, nous focalisons notre intérêt sur les systèmes de rénovation thermique des parois opaques et plus particulièrement sur l'isolation thermique par l'intérieur car les règles de sauvegarde du bâtiment patrimonial à Cahors limitent toutes modifications des façades extérieures.

Comme toute transformation d'un bâtiment, la rénovation thermique par l'intérieur peut générer une forte complexité car elle peut servir une diversité d'intérêts et soulève plusieurs problématiques :

- Le bâti ancien peut-il s'adapter aux nouvelles exigences énergétiques ? Faut-il valoriser le patrimoine ou l'efficacité énergétique ? Comment prioriser les intérêts ou concilier les objectifs ?
- Les préoccupations énergétiques et environnementales actuelles incitent au développement de solutions innovantes et techniquement plus efficaces mais ne faut-il pas aller au-delà de solutions uniquement performantes, pour questionner le type d'économie et le type de travail que nous souhaitons valoriser ? En effet, derrière chaque produit se cache une énergie grise et un mode de production avec son impact associé.

2. Rénover le bâti ancien

2.1. Du bâti ancien au bâti contemporain : un bouleversement des logiques constructives

Rénover le bâti ancien tel que celui rencontré dans le centre ancien de Cahors nécessite au préalable une connaissance de ce dernier et notamment une prise de conscience que les logiques constructives ont profondément été modifiées au cours du dernier siècle et ce à différentes échelles.

Les bâtiments construits avant 1948 et basés sur un mode constructif traditionnel constituent le bâti ancien. La fin de la seconde guerre mondiale marque la transition entre une architecture souvent vernaculaire, qui s'appliquait à prendre en compte l'environnement climatique, utilisant des ressources et des matériaux locaux, à une architecture industrialisée, chauffée et éclairée artificiellement, déconnectée du milieu environnant et employant de nouveaux matériaux manufacturés. L'architecture vernaculaire se définit comme l'expression d'un savoir-faire empirique, d'une culture et de traditions locales. De nombreux auteurs qui étudient aujourd'hui les principes d'une architecture soutenable, cherchent à comprendre et à s'inspirer de la richesse de l'architecture vernaculaire (Correia, Dipasquale, and Mecca 2014; Motealleh, Zolfaghari, and Parsaee 2016). Il faut néanmoins toujours garder à l'esprit qu'une architecture, particulièrement dans les centres urbains, est certes une adaptation au climat, mais également le reflet d'une vie sociétale et d'une politique locale. A Cahors, par exemple, les encorbellements des maisons à pan de bois n'avaient pas forcément d'objectif bioclimatique mais bien d'obtenir plus d'espace, sans payer plus de taxes foncières, celles-ci dépendant de la surface au sol. Ce phénomène prit de l'ampleur à tel point qu'il fallut le réguler par un décret d'urbanisme au Moyen Age.

Les spécificités de cette architecture s'expriment à différentes échelles.

2.1.1. Echelle du matériau

Les matériaux utilisés sont pour la plupart du temps des ressources locales, non standardisées, c'est-à-dire dont les propriétés peuvent varier sur un même matériau et présentant une sensibilité à l'humidité. Cette sensibilité à l'humidité a déjà été relevée dans différents projets. Parmi eux nous pourrions citer le projet HUMIBATEX, le projet ATHEBA et le projet HYGR0BA.

Ces projets ont été mis en place en réponse aux différents désordres apparaissant à la suite d'une rénovation (thermique ou non) des façades anciennes. En effet, de nombreuses modifications, que ce soit la mise en place d'un enduit de façade extérieur cimentaire (Figure 2, gauche), le rejointoiement à base d'un mortier cimentaire (Figure 2, droite), ou l'isolation par l'intérieur, engendrent une modification de l'équilibre hygrothermique du mur et avec lui des risques de pathologies. L'isolation thermique par l'intérieur en particulier, en modifiant la capacité de séchage de la paroi et en accentuant des ponts thermiques, peut engendrer des points de condensation entre le mur et l'isolant pouvant entraîner des désordres allant du développement de moisissures à l'apparition de risques structurels dans certains cas (Straube and Schumacher 2007; Vereecken and Roels 2014).



Figure 2 : Désordres observés sur des façades extérieures cadurciennes : (gauche) chute de l'enduit cimentaire, délitement du mortier de soubassement et apparition de mousse, (droite) délitement de la brique

L'hétérogénéité ne s'exprime pas seulement au niveau des propriétés matériaux mais également au sein des parois. Des siècles de rénovations successives et d'adaptations du bâti à une époque constructive ont entraîné l'utilisation de matériaux disparates sur une même façade (Figure 3)

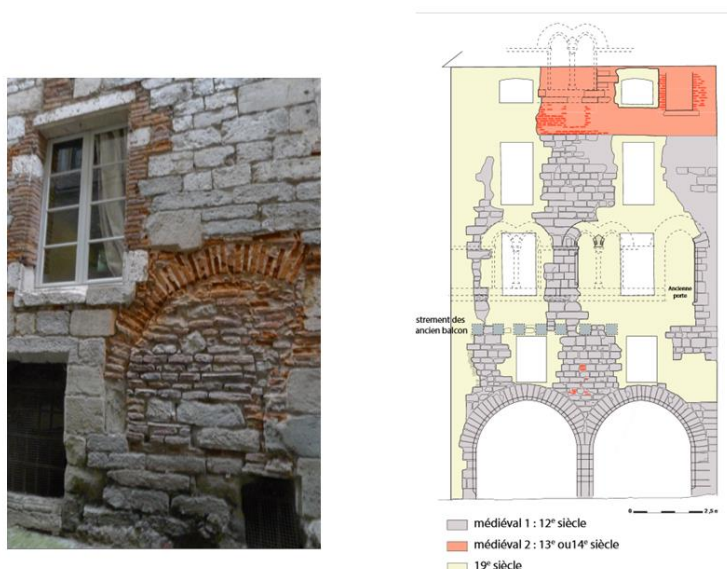


Figure 3 : Rénovations successives au cours des siècles sur des façades cadurciennes (illustration de droite issue de A.Charrier, 2013)

2.1.2. Echelle du bâtiment

La forte épaisseur des parois est également l'une des caractéristiques du bâti ancien. A Cahors, certains murs en rez-de-chaussée peuvent atteindre un mètre d'épaisseur. Ces bâtiments à structure lourde possèdent une forte inertie thermique. Cette propriété sera détaillée au Chapitre 3.

Lorsqu'ils n'ont subi aucune rénovation, les bâtiments anciens disposent rarement d'un système de ventilation mécanique (DGHUC et al. 2007). 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.

Les techniques actuelles d'amélioration énergétique appliquées au bâti contemporain consistent en l'étanchéisation du bâti qui permet de diminuer les infiltrations d'air et donc d'améliorer les

performances énergétiques. Pour autant, la diminution du renouvellement de l'air intérieur aura des conséquences sur plusieurs critères retenus : l'humidité contenue dans l'air, produite par les habitants en hiver ne pourra plus s'échapper, ce qui entraînera un inconfort hygrothermique et à terme le développement de moisissures pouvant causer la dégradation du bâti et avoir des conséquences sur la santé des habitants.

Les logiques de rénovation appliquées au bâti contemporain doivent donc être adaptées ou appliquées avec intelligence. A Cahors, de nombreux soupiraux de caves ont été rebouchés lors de rénovation de rue ou de façades, entraînant par la suite des désordres par cette simple modification.

2.1.3. Echelle du tissu urbain

La prise en compte de l'environnement climatique intervient également à l'échelle de la morphologie du quartier, l'architecture cherchant par exemple à optimiser l'accès au rayonnement solaire, ou encore à l'éviter (Figure 4).

Dans un contexte où les systèmes de chauffage étaient quasi inexistant, la seule façon de rendre les logements viables était de rechercher une mitoyenneté maximale. Les centres anciens des villes d'Europe du Nord ont comme point commun un usage intensif de la mitoyenneté avec une implantation de bâtiments dense. La compacité de ces structures offre une protection aux vents et aux intempéries et permet de conserver la chaleur urbaine lors de la saison d'hiver (APUR 2013; Doya 2010).

A contrario, (Hien and Chen 2009) soulignent que dans les pays tropicaux, le climat étant chaud et humide, on maximise l'espace des rues et des géométries ouvertes afin de privilégier la ventilation naturelle et la dispersion de l'humidité. La réduction du flux solaire est plutôt effectuée par des composantes architecturales individuelles de protection solaire, la priorité étant donnée à la ventilation lorsqu'il s'agit de l'orientation et des dimensions de la rue.



Figure 4 : Optimisation de l'accès au rayonnement solaire, village de Provence, issu de (Projet VERSUS 2014)

Toutes ces particularités, à différentes échelles, créent la spécificité du bâti ancien. Bien que celles-ci ne soient pas pleinement maîtrisées, la réglementation thermique essaie de prendre en compte le fait que le bâti ancien a un comportement hygrothermique différent du bâti contemporain.

2.2. Une réglementation thermique différente

Le niveau de performance des bâtiments d'avant 1948 est à peu près similaire à celui des immeubles construits selon la réglementation thermique de 2000 (Figure 5). Suite à une étude sur un panel de logements anciens, (DGUHC et al. 2007) relèvent des consommations énergétiques (recensées par facture énergétique) inférieures à 230 kWh/m²/an. Si l'on se réfère au classement de performance énergétique des bâtiments (allant d'une échelle de A à I), les bâtiments sont donc classés de C (91 à 150 kWh/m²/an), à D (151 à 230 kWh/m²/an) contre F (331 à 450 kWh/m²/an) pour les bâtiments d'après-guerre et d'avant-choc pétrolier. Il est cependant difficile de généraliser ces conclusions, compte tenu de la diversité des typologies que possède le bâti ancien.

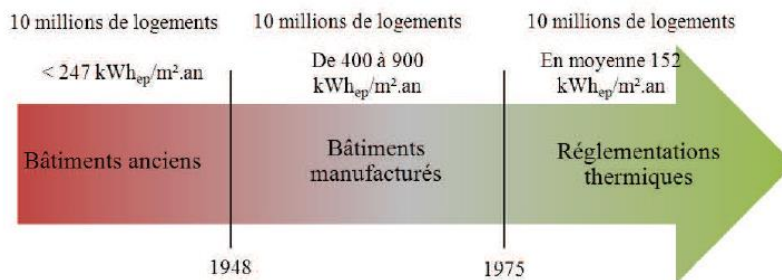


Figure 5 : Consommation du parc bâti en fonction des périodes de construction d'après (Stephan 2014)

La particularité thermique du bâti ancien, décrite précédemment, est reconnue en termes de réglementation thermique où un principe de précaution est appliqué en cherchant, de manière générale, à ne pas imposer de travaux qui pourraient nuire à sa pérennité. Le schéma suivant décrit le dispositif général de la réglementation thermique selon l'ampleur des travaux et l'époque de construction du bâtiment.

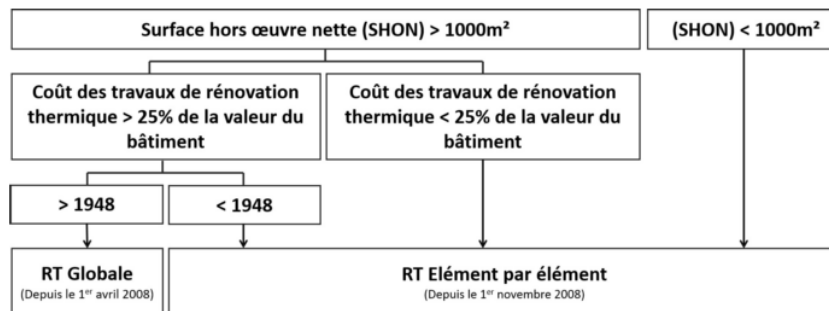


Figure 6 : Schéma du dispositif général de la réglementation thermique pour les bâtiments existants d'après (Molle and Patry 2011)

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

Les exigences sur les résistances thermiques minimales des parois définies par cet arrêté peuvent être résumées dans le tableau suivant.

Résistance thermique de la paroi après isolation (m ² K/W)	Zone	Jusqu'au 31 décembre 2017	du 1 ^{er} janvier 2018 au 31 décembre 2022	A compter du 1 ^{er} janvier 2023
Isolation des murs	H1	2,3	2,9	3,2
	H2	2,3	2,9	3,2
	H3	2	2,2	2
Toitures terrasse	H1	2,5	3,3	4,5
	H2	2,5	3,3	4,3
	H3	2,5	3,3	4
Planchers de combles perdus	H1	4,5	4,8	5,2
	H2	4,5	4,8	5,2
	H3	4,5	4,8	5,2
Rampants de toiture	H1	4	4,4	5,2
	H2	4	4,3	4,5
	H3	4	4	4
Isolation des planchers	H1	2,3	2,7	3
	H2	2,3	2,7	3
	H3	2	2,1	2,1

Figure 7 : Exigences sur les résistances thermiques (m².K/W) des parois (RT élément par élément)

Néanmoins, pour le bâti ancien une exception est faite pour les travaux d'isolation des parois opaques (murs de façades constitués de matériaux anciens), pour lesquels l'application de la réglementation thermique n'est pas exigée (article 2, arrêté du 3 mai 2007), en raison des risques d'incompatibilité de l'isolation rapportée avec le mur d'origine.

Un autre cas d'exception est fait pour les bâtiments situés dans un secteur protégé au titre du patrimoine. Les travaux d'isolation thermique ou de remplacement des fenêtres ne doivent pas entraîner de modifications de l'aspect extérieur (articles 6 et 15, arrêté du 3 mai 2007). Pour les travaux ayant lieu sur un périmètre soumis à un Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur, c'est ce dernier qui définira les interventions possibles sur le bâti.

Le centre ancien de Cahors est classé Site Patrimonial Remarquable et déroge à la loi, permettant aux artisans de travailler avec des matériaux habituellement exclus par la réglementation thermique. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que le cadre législatif est en perpétuelle évolution, à l'exemple du décret du 30 mai 2016 qui obligeait de recourir à l'isolation par l'extérieur en cas de ravalement important des façades et qui a finalement été modifié quelques mois plus tard. L'obligation d'isolation ne s'impose en définitive que pour le bâti non traditionnel, composé de matériaux récents de type briques industrielles, béton etc... Le bâti ancien et les monuments labellisés « Patrimoine du XX^e siècle » sont exemptés afin de préserver leur qualité architecturale.

Cependant, l'appartenance du centre ancien à un Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur oblige pour toute réalisation de travaux à déposer une autorisation préalable qui nécessitera l'accord de l'architecte des bâtiments de France, ce qui peut être vu par certains propriétaires comme un frein.

Dans le cas de l'amélioration des performances thermiques d'un bâtiment constitué de logements, le choix du bouquet de travaux est bien sûr conditionné par le budget, mais dans le cas de programmes financés par des subventions publiques, la performance énergétique théorique à atteindre fait partie des critères d'attribution des subventions. Dans le cas de Cahors, l'aide de l'Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat (ANAH) par exemple n'est accordée que si les travaux réalisés améliorent d'au moins 25% les performances énergétiques du logement (ANAH 2015). Or, souvent, les différents organismes financeurs se basent sur les calculs DPE, ou au mieux à une simulation thermique, même si de nombreuses études ont démontré que le cas du bâti ancien ne correspond pas aux cas pris en compte dans le calcul DPE (DGUIHC et al. 2007).

De plus, le bâti ancien est régi par un fonctionnement physique différent de celui des bâtiments d'après-guerre où l'apparition de procédés industriels a considérablement modifié les ouvrages dans leur conception. Construit à partir de matériaux hygroscopiques, le bâti ancien présente un équilibre hygrothermique subtil. Cette particularité rend également impropre l'utilisation des simulations thermiques dynamiques, car les transferts d'humidité ne sont pas pris en considération alors que le bâti ancien y est particulièrement sensible (DGUIHC et al. 2007).

L'exigence de performances basées sur des calculs peu adaptés peut donc inciter à privilégier des solutions de rénovation qui peuvent être contraires à la préservation patrimoniale du bâtiment (Minassian 2011).

2.3. Particularité de la rénovation thermique en milieu urbain

Le projet ENERPAT se focalise sur la rénovation thermique du bâti en centre urbain. Le contexte urbain du centre-ville est en effet souvent plus complexe car il cristallise des enjeux politiques, culturels, sociaux et économiques en un même lieu et donc autant d'acteurs différents. Chaque transformation ayant lieu dans le centre urbain peut donc être sujet à conflit, les intérêts des uns pouvant être contradictoires avec ceux des autres.

La Communauté d'Agglomération du Grand Cahors pilote et accompagne des opérations visant à impulser une dynamique autour de la rénovation énergétique de l'habitat. Cette mobilisation s'exprime à travers des programmes locaux de l'habitat (PLH) et des opérations programmées d'amélioration de l'habitat en collaboration avec l'ANAH.

En avril 2015, le Grand Cahors a lancé une Opération Publique d'Amélioration de l'Habitat de Renouvellement Urbain (OPAH-RU). Ce dispositif permet à des propriétaires, qu'ils soient occupants ou bailleurs, de bénéficier de subventions pour réaliser des travaux dans leurs logements. La durée de l'OPAH-RU est de 5 ans (2015-2020). Cette nouvelle OPAH-RU vise à renforcer l'attractivité du cœur de l'agglomération du Grand Cahors, à encourager le maintien ou le retour des familles en ville. Le site patrimonial remarquable profite du dispositif renforcé avec des subventions spécifiques :

- pour des travaux d'économies d'énergie dans le cadre de la démarche ENERPAT ;
- pour des travaux de fusion de petits logements afin de créer des logements familiaux ;
- pour favoriser l'accession à la propriété ;
- pour des travaux de remise sur le marché de logements vacants.

Néanmoins, le faible nombre de propriétaires occupants dans le centre ancien (Ville de Cahors 2017) et la configuration multi-proprétaires des immeubles cadurciens ne facilitent pas les démarches vers la rénovation, notamment pour des travaux sur les parties communes.

3. Utiliser les isolants bio-sourcés

En Europe, les laines minérales ainsi que les mousses issues de la chimie du pétrole (mousse de polyuréthane, polystyrène expansé ou extrudé) dominent le marché (Papadopoulos 2005), les éco-matériaux ne représentant pour l'instant qu'une faible part du marché de l'isolation.

Or, le choix du matériau est une bonne base pour se diriger vers une architecture soutenable. L'éco matériau doit répondre aux critères de l'éco-conception (Cripps 2004; Peuportier 2003), c'est-à-dire :

- limiter les impacts environnementaux durant tout son cycle de vie ;
- procurer des conditions de confort aux occupants du bâtiment pendant son exploitation ;
- ne pas présenter de danger pour la santé tant pendant la phase de mise en œuvre que d'utilisation du bâtiment ;
- apporter un bénéfice économique et social.

3.1. Un matériau soutenable

Les matériaux bio-sourcés sont, par définition, des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale et sont utilisés dans le secteur de la rénovation thermique en tant qu'isolants manufacturés ou en vrac (laines de fibres végétales, textile recyclés, etc...), sous forme d'enduits correctifs (chaux et chanvre, terre et paille) ou de panneaux.

En particulier, les matériaux issus des agro-ressources présentent de nombreux avantages en termes de soutenabilité, s'ils respectent certains critères :

- provenir de ressources locales afin de promouvoir une économie valorisant les circuits courts qui limite la production de carbone et favorise ainsi une économie locale ;
- être peu transformés ou en vrac pour réduire les étapes d'une transformation industrielle et ainsi diminuer l'empreinte carbone ;
- provenir de sorties de filières pour transformer des déchets en ressources. Parmi eux, la chènevotte par exemple, qui est la partie ligneuse de la tige du chanvre, est un rebut de l'industrie textile et représente 60% de la plante. Le choix de travailler avec des sorties de filière permet d'éviter que des terres agraires soient accaparées par la culture de matériaux destinés à la construction et peut également être pour l'agriculture une opportunité de stabiliser son économie et sa production (Cripps 2004) ;
- utiliser des agro-ressources qui captent du CO₂ lors de leur phase de croissance et qui sont des ressources renouvelables avec une période de croissance rapide ;
- présenter un faible impact environnemental en fin de vie, grâce au recyclage, compostage ou à la réutilisation. L'étape de fin de vie dépend en grande partie des ajouts lors de la manufacture du produit (ajout de fibres synthétiques dans de nombreux panneaux de fibres de bois).

3.2. Confort et santé

Un matériau d'isolation possède les qualités nécessaires lorsqu'il procure des conditions de confort aux occupants du bâtiment pendant son exploitation, qu'il ne présente pas de danger pour la santé tant pendant la phase de mise en œuvre que d'utilisation du bâtiment, mais également qu'il ne provoque pas de désordres au cours de son utilisation. En termes de qualité de l'air, les composants organiques volatiles (COV) font partie des polluants présents dans l'air dangereux pour la santé et qui peuvent être limités par le choix du matériau.

(Maskell et al. 2015) ont mesuré les émissions COV de plusieurs produits bio-sourcés et ont mis en avant qu'à part la laine de bois qui peut émettre sous certaines conditions, tous les matériaux testés sont classés comme peu émetteurs en termes de COV et de formaldéhydes. De plus, les matériaux bio-sourcés étant pour la majorité fortement hygroscopique, ils ont la capacité de réguler l'humidité relative présente dans l'air (Osanyintola and Simonson 2006).

3.3. Blocage de la filière

La filière des matériaux bio-sourcés a été identifiée par le Commissariat au Développement Durable comme l'une des filières vertes ayant un potentiel de développement économique élevé (MEEDDM / CGDD 2010). Or, pour le moment, il existe encore de nombreux freins à l'utilisation de solutions techniques à base de matériaux biosourcés. Différents auteurs (DHUP and CSTB 2011; Leylavergne 2012) relèvent les points suivants :

- au niveau amont de la filière, la distribution est encore peu coordonnée alors que les matériaux sont disponibles. Les quantités de matériaux bruts mobilisables à l'heure actuelle suffisent par rapport à la demande. Par exemple, sur la filière paille, l'ancienne région Midi Pyrénées produit le quart de la production nationale de blé dur et 30 à 40% de la paille non récoltée reste sur les parcelles. Le manque de structuration et l'éparpillement de la ressource sont autant d'obstacles. Pour la filière bois, c'est par exemple la multiplicité des petits propriétaires (la forêt est à 83% privée, avec plus de 300 000 propriétaires) qui rend difficile la structuration. Pourtant la ressource est disponible car on compte un accroissement naturel d'un million de mètre cube par an et seulement 20% est pour l'instant exploité (CERCAD 2015). Cela a pour conséquence qu'il est souvent plus facile d'importer des matériaux, alors que l'objectif est de travailler en filière courte ;
- un règlement et un corpus normatif difficiles à comprendre et à gérer par les entrepreneurs de la construction. Certaines règles professionnelles ont déjà été rédigées, d'autres sont en cours de rédaction, l'objectif étant de trouver un équilibre, pour que le système normatif ne vienne pas bloquer le savoir-faire empirique de l'artisan ;
- le manque de reconnaissance des matériaux bio-sourcés par les professionnels et par le public. La faible capitalisation technique des chantiers a pour conséquence le manque de réalisation pilote pour diffuser et rassurer sur les techniques à base de matériaux bio-sourcés. De plus, certaines réalisations, faites avec un manque de connaissances du professionnel (par exemple une mauvaise mise en œuvre entraînant le développement de moisissures), peuvent avoir pour conséquence une communication négative qui dessert la filière. Beaucoup de temps est souvent passé à rassurer la maîtrise d'ouvrage ;

- le manque de connaissances technique pour réellement valoriser les solutions à base de matériaux bio-sourcés, notamment sur les propriétés de durabilité et le comportement hygrothermique ;
- le déficit de formation des acteurs à tous les niveaux de qualifications.

Ces nombreux freins ne favorisent donc pas l'utilisation et l'innovation à base de matériaux bio-sourcés.

De plus, en France, l'innovation du secteur du bâtiment passe souvent par un ATEX (Avis Technique Expérimental) qui est un processus long et coûteux, le rendant souvent inaccessible aux petites entreprises et favorisant une innovation (et une commercialisation) par les grands groupes.

A cela, s'ajoute le fait que la plupart des logements sont détenus par des propriétaires bailleurs qui seront donc moins concernés par les conditions de confort du logement qu'un propriétaire occupant. Ce propriétaire bailleur, face à la lourdeur des démarches pour faire subventionner la rénovation thermique de son bien, ne cherchera souvent pas à favoriser une solution à base de matériaux bio-sourcés, la filière connaissant encore de nombreux freins. La complexité de ces rénovations rend peu propice le choix d'une innovation et amène les maîtrises d'ouvrages à choisir des solutions déjà maîtrisées dans le bâti contemporain mais malheureusement peu adaptées au bâti ancien.

4. Mettre en place un Living Lab pour dépasser les blocages

La multiplicité des enjeux et des acteurs, aussi bien pour la rénovation thermique d'un centre urbain en site patrimonial remarquable, que dans la filière des éco-matériaux, rend difficile l'émergence de solutions techniques à base de matériaux bio-sourcés. Même si plusieurs programmes de recherche travaillent aujourd'hui sur ces questions, fréquemment l'innovation échoue quand le milieu est d'une trop grande complexité, dû au passage difficile entre étude et milieu réel.

A cela s'ajoute des critères plus pratiques, tel que le coût financier ou la facilité de pose de l'isolant.

Le Living Lab est une méthodologie qui peut combler le fossé existant entre la recherche et la mise sur le marché dans un milieu réel et complexe (Figure 8).

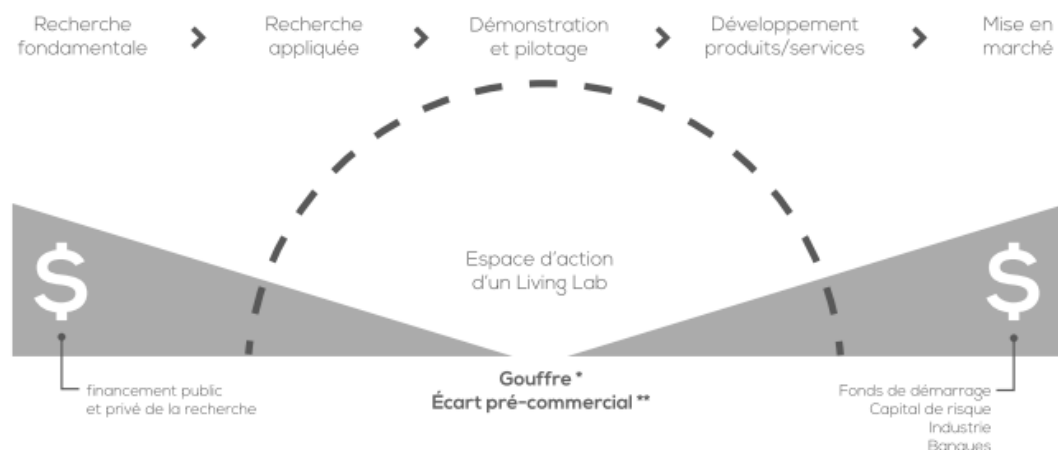


Figure 8 : Espace d'action des Living Lab au sein du cycle d'adaptation et d'innovation (Dubé 2014)

Le Living Lab de Cahors cherche à valider des techniques de rénovation thermique à base de matériaux écologiques par le biais d'une expérience scientifique. Cette étude réalisée à la fois en laboratoire et dans un contexte réel vise à permettre la montée en compétence de la filière en dépassant l'un des blocages des matériaux bio-sourcés : leur faible connaissance au niveau scientifique.

4.1. Le Living Lab pour répondre à la complexité

Le Living Lab est un terme qui aurait été utilisé pour la première fois au Massachusetts Institute of Technology (MIT), qui proposait alors une méthodologie de recherche non plus centrée sur l'utilisateur mais « portée par l'utilisateur », permettant la formulation, le prototypage et la validation de solutions complexes dans des contextes multiples et mouvants de la vie réelle (Doyon et al. 2016). L'un des piliers du Living Lab est l'expérimentation dans un environnement réel. Tester un produit ou un service en conditions réalistes d'usage et dans la durée permet de dessiner une solution technique qui sera durable et empreinte de valeur. L'autre pilier du Living Lab est le principe de co-création. Dans un Living Lab les usagers ne se limitent pas aux usagers finaux mais à une communauté d'usagers qui fait référence aux personnes en interaction avec le produit ou le service final. Cette notion inclut non seulement les usagers finaux mais aussi les usagers en amont et les usagers secondaires.

Chacun se mobilise pour participer en tant qu'individu pour mobiliser sa connaissance et sa créativité.

La méthodologie Living Lab permet également l'intervention de la recherche scientifique en dehors du cadre universitaire habituel, dans un contexte réel, permettant ainsi une meilleure communication avec les futurs usagers.

Parmi les trois piliers principaux d'un Living Lab recensé par le Livre Blanc (Dubé 2014), on compte l'expérimentation dans un environnement réel, la co-création et l'utilisateur en tant que porteur de l'étude.

4.1.1. Un Living Lab dimensionné pour le projet ENERPAT

Le Living Lab mis en place à Cahors cherche à appréhender la rénovation thermique du bâti ancien dans un territoire urbain complexe dans toutes ses dimensions en essayant de relier entre eux les acteurs qui agissent sur la ville et sa fabrication.

a) Trouver un écosystème réaliste à étudier

Le Living Lab comprend deux bâtiments, propriétés de la Ville de Cahors. Ces appartements ont été choisis comme étant représentatifs du bâti ancien cadurcien. Situés dans le site patrimonial remarquable, dans un îlot dense du centre ancien, ces bâtiments correspondent à la morphologie urbaine étudiée. De par leur mode constructif (pan de bois avec un remplissage de brique et mur épais de briques maçonnées) les deux bâtiments représentent les deux typologies les plus fréquentes du centre ancien. Par choix, afin de mieux comprendre les caractéristiques physiques du bâti ancien, les appartements sont vides pour s'affranchir de l'influence de l'occupant sur les performances thermiques.

Ce lieu crée un espace pour tester des systèmes de rénovation thermique en milieu réel et permet à chaque « utilisateur » d'être force de propositions dans son domaine d'expertise.

Dans le cas du Living Lab ENERPAT nous parlerons d'environnement réaliste plutôt que réel (par environnement réel, on fait référence au vrai milieu de vie de l'utilisateur). Ici, l'occupant n'est pas présent, notamment car les mesures ont un caractère intrusif dans le milieu de vie des usagers.

Le Living Lab est donc un espace physique dans un contexte réaliste où certaines conditions d'usage sont néanmoins recréées.

b) Une communauté d'usagers travaillant en co-création

Une communauté d'usagers est un regroupement naturel de personnes qui partagent des caractéristiques similaires face à l'usage d'un produit ou d'un service. Ces communautés peuvent regrouper des consommateurs, des citoyens, des fournisseurs, des employés, des partenaires privés ou publics selon des intérêts communs (Dubé 2014).

Parmi les acteurs du projet ENERPAT on compte :

- la Communauté d'agglomération du Grand Cahors et la Ville de Cahors qui font monter en compétence le Living Lab grâce à leur connaissance du Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur du centre ancien (ensemble des règles d'urbanisme) des conditions d'éligibilité aux différentes aides lors du montage de dossier de subventions ;
- les artisans de la CAPEB du Lot, formés au patrimoine et rassemblant différents corps de métiers (maçon, menuisiers, maître enduiseur). Leur savoir-faire permet de penser une solution cohérente au niveau de la mise en œuvre et des ressources localement disponibles ;
- l'association Viviers Bois, comme filière souhaitant raviver la filière bois local ;
- le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) et le Laboratoire de Recherche en Architecture de Toulouse (LRA) apportant leurs compétences scientifiques sur les problématiques matériaux, études hygrothermiques du bâti et étude de la morphologie urbaine ;

- la PFT Midi Pyrénées (rassemblement de formations professionnelles techniques destinées à l'amélioration de l'habitat), qui amène son expertise sur l'instrumentation des deux bâtiments et invite les élèves, qui sont eux-mêmes de futurs acteurs de la rénovation thermique, à participer au projet.

Les différents acteurs grâce à leurs domaines d'expertise amènent des connaissances sur deux des freins souvent présents qui sont la réglementation et la faisabilité technique du projet. Cette transdisciplinarité permet un partage de l'expertise, un partage des équipements ainsi qu'un gain de temps par rapport aux étapes habituelles de recherche et de validation de solutions techniques (Claude et al. 2017).

Suite à des ateliers de co-création, une solution technique de rénovation en chaux-chaux banché a été définie. Cette solution a été mise en œuvre par les élèves en apprentissage à la Chambre des Métiers du Lot (Figure 9). Une simulation d'occupation (période de chauffe, cycle d'humidification) et l'étude de l'évolution des propriétés physiques du bâti (conductivité des parois, régulation de la température et de l'humidité dans les pièces, évolution de la consommation énergétique) permettra d'apporter ensuite des réponses à la pertinence ou non de certaines solutions techniques.



Figure 9 : Mise en œuvre du chaux-chaux banché avec les élèves de la Chambre des Métiers du Lot dans les appartements tests du projet ENERPAT, septembre 2017

A travers cette rénovation expérimentale, l'objectif est multiple : tester une solution technique, former des élèves lors d'un chantier utilisant des matériaux bio-sourcés en centre ancien, et également, faire interagir et se rencontrer différents acteurs de la rénovation thermique dans un cadre expérimental sans la dimension financière.

Concernant les menuiseries, une solution à base d'une essence locale, le bois de châtaigner, a été sélectionnée par l'association Viviers Bois pour la confection des châssis de fenêtre. Le bois de châtaigner ne fait pas partie du circuit habituel de bois fournis aux menuiseries industrielles ou semi-industrielles. Celles-ci travaillent usuellement avec du pin sylvestre en provenance de Russie ou des bois exotiques, les filières étant bien établies. Pour cette étude, une menuiserie semi-industrielle, avec la participation d'un menuisier artisan pour le débitage du bois au préalable, a accepté de se prêter à l'expérience et de modifier pour l'occasion sa filière d'approvisionnement. A nouveau le cadre expérimental et privilégié du Living Lab a permis de

tester dans un cadre réaliste une solution innovante en respectant les règles du site patrimonial remarquable qui obligent à la mise en œuvre de menuiserie en bois (Figure 10).



Figure 10 : Mise en place d'une menuiserie avec un châssis en bois de châtaigner

4.1.2. La gouvernance partenariale

Au sein du Living Lab, chacun participe en tant qu'individu et mobilise sa connaissance et sa créativité (Doyon et al. 2016).

L'attachement informel des différents acteurs au Living Lab impose que chaque acteur présent trouve au-delà de l'intérêt collectif, un intérêt personnel à la démarche.

Pour les artisans de la CAPEB, ce projet représente l'opportunité de revaloriser le métier d'artisan. Par sa définition l'artisan fabrique, produit quelque chose qui n'existait pas (David 2011). Or la standardisation des produits de constructions pour répondre à des normes toujours plus contraignantes a supprimé une partie du savoir-faire de l'artisan. Le centre ancien de Cahors, comme tout le bâti classé ou sauvegardé est hors du champ d'application de la réglementation thermique, ce qui permet une expression du savoir-faire de l'artisan.

Au niveau de la recherche scientifique, l'expérimentation dans un cadre réaliste permet d'obtenir des résultats autres que ceux relevés en cellule de laboratoire ou sur une paroi expérimentale. La configuration des bâtiments entre eux ayant un impact décisif sur les consommations d'énergie (APUR 2011) et les modèles thermiques actuels ne correspondant pas au bâti ancien (DGUHC et al. 2007), il est enrichissant de travailler dans un cadre réaliste, avec un bâtiment intégré à la morphologie urbaine.

4.2. Les limites du Living Lab mis en place à Cahors

Le Living Lab tel que mis en place à Cahors présente toutefois certaines limites :

- un des premiers freins de ce « laboratoire vivant » est l'absence pour le moment de l'utilisateur final. En effet, même si une large communauté d'utilisateurs est présente (architecte, artisans, collectivité), l'utilisateur final en tant que propriétaire ou occupant du bien à rénover ne participe pas clairement à l'expérience. La politique de la ville, soulignent (Bacqué and Mechmache 2013), constitue un terrain riche

d'expérimentations participatives mais elle n'en demeure pas moins conduite et décidée « par le haut ». Il est difficile pour les habitants de s'approprier un projet lorsque celui-ci n'émerge pas directement des citoyens, mais d'une volonté politique « d'en haut ». De plus, il existe souvent un désintérêt du public lorsque les questions deviennent trop politiques ou trop techniques (Neveu 1999). Le Living Lab possède pourtant une structure pertinente pour vulgariser des problématiques complexes. Dans les dispositifs actuellement existants en France et ayant quasiment réussi l'« empowerment » des citoyens on pourra citer le programme ENERTERRE (Olivier 2014), un dispositif qui s'articule autour de chantiers participatifs d'auto-réhabilitation pour lutter contre la précarité énergétique en milieu rural. Avec un montage partenarial, ce dernier a réussi à mettre l'habitant au centre du projet. Un formateur professionnel encadre les chantiers, auxquels participent le propriétaire de la maison, d'autres bénéficiaires de l'expérimentation et des bénévoles volontaires ;

- les deux parties prenantes principales du projet (communauté d'agglomération et laboratoire universitaire) sont des organisations structurées de manière hiérarchique, verticale. Or, comme le souligne (Doyon et al. 2016), la gouvernance du Living Lab est sensée gommer les cadres des organisations, chacun se mobilisant pour participer en tant qu'individu et mobilisant sa connaissance et sa créativité. Le leadership peut être mouvant et l'organisation est principalement horizontale. Ce type d'organisation est, pour les laboratoires, comme pour les institutions publiques, très loin de leur mode de fonctionnement habituel et n'en facilite pas l'appropriation ;
- la culture scientifique basée sur la pose de protocoles expérimentaux et le savoir-faire empirique de l'artisan sont très éloignés. Les différences de culture des domaines d'expertises présents rendent parfois difficiles l'avancement du projet ;
- parmi les freins on compte également l'absence d'un leadership dans l'animation de la plateforme du Living Lab. La communauté d'agglomération du Grand Cahors a initié le projet et porté le leadership dans la phase de montage du projet. Or aujourd'hui, la communauté d'agglomération ne possède plus toutes les compétences nécessaires à l'animation de ce « laboratoire vivant ». Le principe d'un leadership mouvant est approprié pour mettre en avant les compétences de chacun dans les différentes phases du projet, mais la prise de position des acteurs comme meneurs n'est pas spontanée et souvent difficile à faire émerger.

Le projet ENERPAT a été initié en 2015, le Living Lab mis en place à Cahors au cours de cette thèse en est aujourd'hui à ses débuts et ne cesse d'être modifié dans son fonctionnement, ne se voulant pas un dispositif figé, mais bel et bien « vivant ». Il a vocation à évoluer, en s'inspirant certes des recommandations d'experts, mais surtout des avis des porteurs de projet et du public, avec toute la diversité de sensibilités et de pratiques.

5. Conclusion

Responsable d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre et des consommations d'énergie, les territoires urbains détiennent également des leviers d'action puissants pour mettre en place des gouvernances favorisant la « transition énergétique ».

L'énergie est en effet au centre de nombreuses thématiques où les collectivités territoriales ont un rôle crucial à jouer dans différents domaines : en accompagnant l'amélioration énergétique du bâti, en valorisant des déplacements limitant les émissions de gaz à effets de serre, en choisissant un type de distribution d'énergie ou en élaborant de documents de stratégie territoriale (volet énergie du SCOT), car les collectivités ont un rôle de structuration et de mise en cohérence des différentes stratégies énergétiques. Dans les centres anciens, la valeur patrimoniale et architecturale du bâti amène à sauvegarder l'existant. Il est essentiel de revitaliser nos centres urbains notamment en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments.

Fruit du travail réalisé, un nouvel espace Living Lab qui sert de support à un bâtiment démonstrateur a été mis en place fin 2016 dans le centre ancien de Cahors avec un montage financier plus établi car soutenu par un projet européen SUDOE. Suite aux observations réalisées sur le premier espace Living Lab, la communauté d'agglomération a plus clairement pris le leadership pour animer ce nouveau lieu. Le Living Lab, à présent composé de deux espaces d'expérimentation, permet une étude systémique de la validité des isolants bio-sourcés utilisés pour la rénovation du bâti ancien face à la multiplicité des enjeux d'une rénovation thermique (amélioration des performances énergétiques, amélioration du confort hygrothermique, prévention du risque de dégradation du bâti, respect des règles d'urbanisme et minimisation du coût des travaux).

6. Références

- ADEME. 2014. *Climat, Air et Energie. Chiffres Clé. Rapport Technique.*
- ANAH. 2015. "Le Guide Des Aides."
- APUR. 2011. *Analyse de La Performance Thermique Des Logements Parisiens Construits Entre 1801 et 1850.*
- APUR. 2013. *Amélioration Des Performances Énergétiques Du Bâti Ancien de La Région Bruxelles-Capitale.*
- Bacqué, Marie-hélène and Mohamed Mechmache. 2013. *Pour Une Réforme Radicale de La Politique de La Ville. Citoyenneté et Pouvoir D'agir Dans Les Quartiers Populaires.*
- CERCAD. 2015. *Les Filières Locales de Matériaux de Construction Biosourcés et Géosourcés En Midi-Pyrénées. Etat Des Lieux et Enjeux.*
- Claude, Sophie, Stéphane Ginestet, Marion Bonhomme, Nicolas Moulène, and Gilles Escadeillas. 2017. "The Living Lab Methodology for Complex Environments : Insights from the Thermal Refurbishment of a Historical District in the City of Cahors , France." *Energy Research & Social Science* 32:121–130.
- Charrier, Anais. 2013. *Cahors, Les Chantiers.*
- Communauté d'Agglomération du Grand Cahors. 2014. "Etude OPAH-RU Étude Faisabilité RHI-THIRORI - Comité Pilotage."
- Correia, Mariana, Letizia Dipasquale, and Saverio Mecca. 2014. *Heritage for tomorrow. Vernacular Knowledge for Sustainable Architecture.* Firenze Un.
- Cripps, Andrew. 2004. *Crops in Construction Handbook.*
- David, Gabriel-françois. 2011. "Artisanat, Métiers et Compagnonnage." Pp. 242–56 in *ICOMOS.*
- DGUHC, CETE de l'Est, DGCB-LASH, and MPF. 2007. *Connaissance Des Batiments Anciens & Economies D'Energie.*
- DHUP and CSTB. 2011. *Obstacles Au Développement Des Filières de Matériaux et Produits Biosourcés Pour La Construction et Plan D'action Pour Les Surmonter.*
- Doya, Maxime. 2010. "Analyse de L'impact Des Propriétés Radiatives de Façades Pour La Performance Énergétique de Bâtiments D'un Environnement Urbain Dense."
- Doyon, Mélanie et al. 2016. "L'approche Living Lab et L'aménagement Des Espaces Ouverts Agricoles. Un Exemple En Région Métropolitaine de Montréal." 6.
- Dubé, Patrick. 2014. *Le Livre Blanc Des Living Lab.*
- Fondation Abbé Pierre. 2016. *L'état Du Mal-Logement En France. 21e Rapport Annuel.*
- Hien, Nyuk and Yu Chen. 2009. "Tropical Urban Heat Islands - Climate Buildings and Greenery." *International Journal of Ventilation* 7(4):2009.
- Lévy, Pierre. 2010. *La Rénovation Écologique. Principes Fondamentaux - Exemples de Mises En Œuvre.* edited by T. Vivante.
- Leylaverigne, Elvire. 2012. "La Filière Terre Crue En France." Mémoire de DSA, CRAterre

Grenoble

- Loi n° 2015-992. 2015. "Loi N° 2015-992 Du 17 Août 2015 Relative À La Transition Énergétique Pour La Croissance Verte - Article 12." 2015.
- Maskell, D. et al. 2015. "Properties of Bio-Based Insulation Materials and Their Potential Impact on Indoor Air Quality." in *First International Conference on Bio-based Building Materials*. Clermont-Ferrand.
- MEEDDM / CGDD. 2010. *Les Filières Industrielles Stratégiques de L'économie Verte*.
- Minassian, Hovig Ter. 2011. "La Réhabilitation Thermique Des Bâtiments Anciens À Paris : Comment Concilier Protection Du Patrimoine et Performance Énergétique ?" *Cybergeo : European Journal of Geography* 18.
- Molle, Dimitri and Pierre-Manuel Patry. 2011. *RT 2012 et RT Existant: Réglementation Thermique et Efficacité Énergétique. Construction et Rénovation*. edited by Eyrolles.
- Motealleh, Parinaz, Maryam Zolfaghari, and Mojtaba Parsaee. 2016. "Investigating Climate Responsive Solutions in Vernacular Architecture of Bushehr City." *HBRC Journal*.
- Neveu, Catherine. 1999. *Espace Public et Engagement Politique: Enjeux et Logiques de La Citoyennete Locale (Logiques Politiques) (French Edition)*.
- Olivier, Pierre. 2014. "ENERTERRE Une Expérimentation Contre La Précarité Énergétique." 2-3.
- Osanyintola, Olalekan F. and Carey J. Simonson. 2006. "Moisture Buffering Capacity of Hygroscopic Building Materials : Experimental Facilities and Energy Impact." *Energy and Buildings* 38:1270-82.
- Papadopoulos, A. M. 2005. "State of the Art in Thermal Insulation Materials and Aims for Future Developments." *Energy and Buildings* 37:77-86.
- Peuportier, Bruno. 2003. *Eco-Conception Des Bâtiments. Bâtir En Préservant L'environnement*. Presse des Mines.
- Projet VERSUS. 2014. *VERSUS, Lessons from Vernacular Heritage to Sustainable Architecture*.
- Stephan, Emma. 2014. "Méthode D'aide À La Décision Multicritère Des Stratégies de Réhabilitation Des Bâtiments Anciens En Pierre Calcaire : Application Au Patrimoine En Tuffeau." Thèse doctorale, École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE].
- Straube, John and Chris Schumacher. 2007. "Load-Bearing Masonry Walls in Cold Climates." *Building Science Digest* 114.
- Vereecken, Evy and Staf Roels. 2014. "A Comparison of the Hygric Performance of Interior Insulation Systems: A Hot Box-Cold Box Experiment." *Energy and Buildings* 80:37-44.
- Ville de Cahors. 2017. *Opération de Restauration Immobilière, Secteur Sauvegardé de Cahors. Dossier D'enquête D'utilité Publique*.

CHAPITRE 2

Contexte scientifique et méthodologie

1. Introduction.....	30
2. Particularités physiques des matériaux bio-sourcés.....	30
2.1. Un milieu poreux.....	30
2.2. Influence sur les propriétés hygrothermiques.....	31
2.3. Sensibilité des matériaux bio-sourcés à l'humidité.....	33
3. Caractérisation à l'échelle du matériau.....	33
4. Etude à l'échelle de la paroi et du bâtiment.....	35
5. Modéliser les transferts couplés au sein des matériaux bio-sourcés.....	35
6. Méthodologie adoptée dans le cadre de la thèse.....	36
7. Conclusion.....	38
8. Références.....	39

1. Introduction

Afin de concilier patrimoine et amélioration énergétique du bâti ancien, l'isolation thermique par l'intérieur est souvent préférée à d'autres solutions techniques. Or une telle modification de la paroi opaque peut provoquer une rupture de l'équilibre hygrothermique. De façon à préserver la durabilité de la paroi, il est essentiel de valider la performance hygrothermique après isolation en s'appuyant sur des outils et des méthodes fiables qui permettent de qualifier au mieux les solutions d'isolations choisies.

Le choix du matériau et du système d'isolation détermine en grande partie la performance hygrothermique de la paroi. Or, les matériaux bio-sourcés présentent des singularités au niveau de leurs propriétés hygrothermiques qui requièrent encore des investigations. Ces singularités, présentées dans ce chapitre, demandent à être prises en compte, aussi bien dans les modèles numériques de transferts hygrothermiques, que dans la caractérisation des matériaux.

2. Particularités physiques des matériaux bio-sourcés

2.1. Un milieu poreux

Un milieu poreux est caractérisé par la combinaison d'une matrice solide et d'un espace poreux pouvant être occupé par un ou plusieurs fluides sous forme liquide ou gazeuse (J.F. Daian 2013).

Les matériaux très poreux possèdent une faible densité. Cette propriété est l'une des caractéristiques principales des matériaux isolants, car elle entraîne une faible conductivité thermique. La masse volumique des isolants thermiques peut évoluer sur une large gamme allant de 15 kg/m³ pour la laine de verre ou le polyuréthane (Schiavoni et al. 2016) à 650 kg/m³ pour certains enduits chaux-chanvre (Association Construire en chanvre 2012).

La porosité varie, selon les matériaux, de par sa géométrie et sa distribution de taille de pores. On distingue alors ceux présentant majoritairement des pores interconnectés (isolant fibreux, chaux) de ceux présentant des pores fermés (polystyrène). La première typologie autorise des transferts de vapeur d'eau, d'eau liquide, ou d'air à travers les pores du matériau (Belleudy 2016). Il est donc à noter que cette propriété influence la majeure partie des transferts de masse et de chaleur.

Il existe une grande diversité de fibres végétales (Figure 11). Or, l'orientation des agrégats végétaux, leur taille et leur forme (fibre longue ou courte), leur structure interne poreuse, le ratio et la nature du liant utilisé et la mise en œuvre sur site sont autant de paramètres pouvant influencer la densité finale du matériau et donc sa porosité (Véjélien et al. 2011).



Figure 11: Paille d'orge, moelle de tournesol et bale de riz en vrac

Il existe de plus, au sein de la structure interne même des agrégats végétaux de fortes disparités. En effet, (Palumbo Fernández 2015) a démontré qu'il existe d'importantes variations de la microstructure des agrégats végétaux, modifiant par la suite les propriétés des matériaux obtenus. La paille d'orge, très poreuse, possède par exemple une porosité bimodale autour de 2 μm et 10 μm alors que la balle de riz sera plus dense avec une porosité unimodale autour de 8 μm . Au sein d'une même variété, un agrégat végétal, selon sa provenance, c'est-à-dire selon le climat sous lequel il a été cultivé et le traitement qu'il a subi, possédera une microstructure particulière (Glé, Gourdon, and Arnaud 2011).

Les matériaux bio-sourcés présentent donc la particularité d'avoir une porosité plurimodale, due à la porosité des agrégats végétaux, celle de sa matrice minérale (dans le cas des mélanges chaux-chanvre, terre-paille) et la porosité intergranulaire. Cette combinaison donne des porosités totales élevées : à titre d'exemple 80% pour un mur en chaux-chanvre (60% pour un enduit chaux-chanvre) (Glouannec et al. 2011) et 90% pour un isolant en fibres de bois. D'un point de vue thermique, cette caractéristique est nécessaire pour un isolant car selon la microstructure du matériau, sa capacité à stocker ou à transmettre la chaleur sera modifiée.

2.2. Influence sur les propriétés hygrothermiques

Il est fréquent que les matériaux isolants ne soient comparés entre eux qu'en fonction de leur conductivité thermique. Dans le cas des matériaux bio-sourcés, cette valeur est souvent légèrement supérieure aux isolants conventionnels tels que les laines minérales et les mousses expansées ($\lambda \sim 0.04 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$) du fait d'une densité plus élevée. Cette dernière engendre également une capacité thermique plus élevée qui peut être valorisée dans certaines configurations de parois. Afin de valoriser les matériaux bio-sourcés, il est donc essentiel de mettre en avant les propriétés hygriques des isolants, c'est-à-dire leur capacité à stocker ou à se laisser traverser par l'humidité, sous forme vapeur ou sous forme liquide. Un système isolant peut réagir de différente manière à la vapeur d'eau, on parle alors de système perspirant ou fermé au transfert de vapeur, de même pour le transfert d'eau liquide, un isolant peut être hydrophobe ou plus ou moins capillairement actif.

Au niveau du stockage d'humidité, les matériaux bio-sourcés présentent une propriété essentielle, celle, comme d'autres matériaux hygroscopiques, de pouvoir échanger de l'humidité avec l'air environnant.

Cette propriété se traduit par l'isotherme de sorption (courbes d'adsorption et de désorption) illustrée Figure 12. Le matériau doit alors être considéré comme un ensemble de trois phases : la phase solide, la phase liquide, correspondant à la vapeur absorbée en surface du matériau et la phase gazeuse au sein des pores, où la vapeur d'eau et l'air sont à l'équilibre.

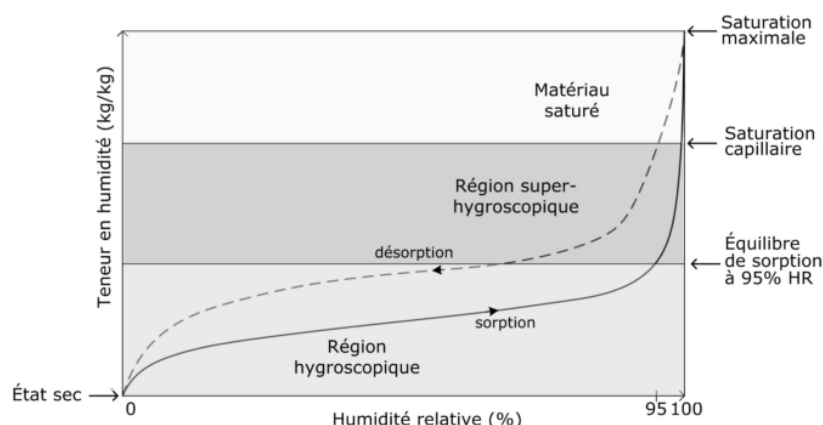


Figure 12: Isotherme de sorption d'un matériau hygroscopique présentant un hystérésis entre l'adsorption et la désorption. Issu de (Piot 2009)

Le concept de sorption multicouche proposé par (Langmuir 1918) a largement été repris par la suite dans la littérature. Le mécanisme de fixation d'humidité se fait en trois étapes (Figure 13) :

- les molécules de vapeur d'eau sont absorbées progressivement et forment une couche simple sur la surface des pores. C'est l'adsorption monomoléculaire. La liaison entre la surface et les molécules d'eau est permise grâce aux forces de Van der Waals. Le transfert en phase gazeuse est prépondérant et celui en phase liquide est alors négligé ;
- pour des humidités plus importantes, les molécules de vapeur vont être absorbées par la monocouche inférieure, on parle alors d'adsorption polymoléculaire. Le transfert d'eau cohabite sous forme vapeur et sous forme liquide ;
- à des humidités relatives élevées, les multicouches se rejoignent pour former un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. Cette fois, l'eau est retenue à la surface des pores par les forces capillaires, entraînant un remplissage des pores les plus fins vers les plus larges. On parle de condensation capillaire.

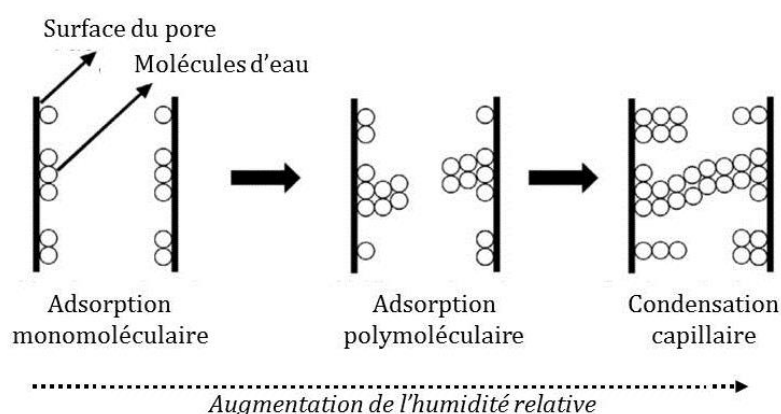


Figure 13: Schéma des phénomènes d'adsorption physique dans un pore, adapté de (Osborne 2004)

Les courbes d'adsorption et de désorption ont des formes similaires, mais peuvent avoir des valeurs différentes : on parle alors d'hystérésis de teneur en eau, un phénomène fréquent pour les matériaux bio-sourcés. L'hystérésis est souvent expliquée par le fait qu'il est plus facile pour l'eau de rentrer dans le réseau poreux que d'en sortir du fait des forces capillaires, notamment en cas de la présence de pores en forme de bouteille d'encre.

Les matériaux composés d'agrégats végétaux sont considérés comme fortement hygroscopiques comparés à d'autres matériaux de construction (Amziane, Arnaud, and Challamel 2013). Cette particularité va influencer la majorité des propriétés hygrothermiques (Jerman and Černý 2012). Ceux-ci relèvent que la capacité thermique va évoluer en fonction de la teneur en eau, cette dernière possédant une capacité thermique massique plus élevée que l'air. Une augmentation de la teneur en eau provoque une augmentation de la conductivité thermique, l'eau étant plus conductrice que l'air ($\lambda_{\text{air immobile}}=0.026 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ et $\lambda_{\text{eau}}=0.6 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$). (Taoukil 2013) a montré qu'à saturation la conductivité thermique du mélange chaux-chanvre était deux à trois fois supérieure à la conductivité sèche. Les propriétés hydriques telles que la perméabilité à la vapeur ou la diffusivité liquide évoluent également avec la teneur en eau.

Parmi les particularités des matériaux bio-sourcés, on peut noter que ceux-ci possèdent une perméabilité à la vapeur importante et une diffusivité hygrique qui n'existe pas dans les isolants hydrophobes type polystyrène expansé.

Ainsi, l'application de matériaux bio-sourcés comme isolant permet de garder une perméabilité de la paroi et d'agir comme un tampon hygrique (Lawrence et al. 2013). Cette capacité de tampon hygrique, en adsorbant et désorbant la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant, régule l'humidité intérieure et améliore la sensation de confort ainsi que la qualité de l'air (Padfield 1998).

Au-delà de la capacité de régulation de l'ambiance intérieure, cette sensibilité à l'humidité est aussi souvent présentée comme une fragilité augmentant le risque de dégradation microbienne.

2.3. Sensibilité des matériaux bio-sourcés à l'humidité

Lors de l'étude à l'échelle de la paroi, la sensibilité des matériaux bio-sourcés à l'humidité implique également une attention particulière concernant les risques d'un contact prolongé à de hautes humidités. En effet, des conditions défavorables entraînent des risques de condensation superficielle et interstitielle qui pourraient provoquer une dégradation microbienne progressive ainsi qu'une dégradation des propriétés mécaniques des tissus végétaux. Une description plus détaillée des risques de développements microbiens est donnée Chapitre 6.

Lorsque la mise en œuvre de ces matériaux nécessite un apport d'eau conséquent, leur capacité à stocker l'humidité a alors des conséquences sur le temps de séchage. Cette particularité peut générer un fort apport d'humidité dans l'air ambiant et au sein de la paroi pendant la période de séchage.

3. Caractérisation à l'échelle du matériau

Plusieurs auteurs soulignent la complexité d'avoir une caractérisation fiable des matériaux bio-sourcés (Latif et al. 2014; Mougel 2012). Celle-ci s'explique de par certaines particularités des isolants bio-sourcés (hétérogénéité, anisotropie, perméabilité à l'air et forte hygroscopicité), la spécificité de la structure végétale (gonflement avec l'humidité, fragilité) et l'influence de la teneur en eau sur les propriétés de transfert.

(Latif et al. 2014) relèvent que la forte hétérogénéité des mélanges chaux-chanvre se reflète dans les écarts-types élevés obtenus sur les résultats de caractérisation du matériau notamment

sur la perméabilité à la vapeur rendant difficile l'obtention de valeurs permettant de définir précisément la performance hygrothermique d'un matériau. L'hétérogénéité du matériau peut découler de la mise en œuvre, par exemple, pour le béton de chanvre appliqué par projection, les premières particules projetées ont tendance à être plus compactées que les dernières (Pierre and Colinart 2004). De plus, selon la technique utilisée, une orientation privilégiée des fibres peut apparaître dans le matériau.

L'accès à la microstructure de ces matériaux est également complexe du fait de la fragilité des cellules végétales. La mesure de la porosité par intrusion de mercure risque par exemple de dégrader et donc de modifier la structure porale. La porosimétrie au mercure est un moyen largement utilisé pour accéder à la distribution des diamètres de pores d'un milieu poreux. Le mercure est introduit progressivement dans le réseau poreux initialement vide. Le mercure étant un liquide non-mouillant au contact de la majorité des matériaux, il ne pénètre pas spontanément dans les pores sous l'action des forces capillaires et il est nécessaire d'appliquer une pression supérieure à la pression capillaire pour le forcer à pénétrer dans les pores de l'échantillon. Or, pour une composante végétale l'angle de mouillage peut être plus difficile à déterminer et de plus les traces d'eau résiduelle dans le matériau peuvent modifier l'emplacement des pics de la distribution porale. Or, un séchage à une température trop élevée risque d'endommager la structure de la particule végétale. Il est donc recommandé de ne pas dépasser 90°C pour le préconditionnement du matériau avant mesure.

De façon générale, l'étalement de la distribution porale des agrégats végétaux oblige à combiner plusieurs techniques de caractérisation pour avoir accès à toute la gamme de la porosité (Amziane, Arnaud, and Challamel 2013). A haute humidité, les cellules végétales peuvent être soumises à un gonflement, modifiant leur capacité d'absorption en augmentant la surface disponible pour l'adsorption (Latif et al. 2014).

L'importante perméabilité à l'air de certains isolants et la dépendance entre les propriétés hygrothermiques et la teneur en eau questionnent la validité de tests de caractérisation pourtant largement utilisés. (Duforestel 2015) observe que l'essai à la coupelle, qui est un essai normalisé (NF EN ISO 12572-2001), sous-estime probablement la perméabilité à la vapeur réelle des échantillons dans le cas de matériaux peu denses et très perméables à l'air. En effet ce test ne prend pas en compte la variation de la pression totale et les transferts par advection sont alors négligés (Berger et al. 2017).

Pour prendre en compte les performances hygrothermiques des matériaux bio-sourcés, il est nécessaire de considérer également leur comportement hygrothermique en régime dynamique. Le transfert de masse a un impact significatif sur le transfert de chaleur pour ces matériaux en corrélation avec les chaleurs latente et de sorption (Amziane and Collet 2017).

Or, les propriétés des matériaux sont majoritairement obtenues au travers de méthodes stationnaires. Ces méthodes ne sont pas adaptées à l'étude de l'influence de la teneur en eau sur les propriétés. Dans le cas de l'étude de la conductivité thermique, le gradient de température inhérent au test de la plaque chaude gardée crée également un gradient d'humidité au sein du matériau, mais la vitesse de migration de la vapeur n'est pas en adéquation avec la durée de l'essai (Clarke and Yaneske 2009). En réponse, des méthodes quasi stationnaires et des méthodes inverses sont actuellement développées (Rouchier et al. 2017).

Le test de la capacité de tampon hygrique (Moisture Buffer Value) est un test réalisé sous sollicitations dynamiques. Peu utilisé jusqu'alors sur les matériaux de construction courants, il se révèle une façon de valoriser le caractère hygroscopique des matériaux bio-sourcés et donc leur performance hygrothermique.

4. Etude à l'échelle de la paroi et du bâtiment

La majorité des tests présentés précédemment est réalisée à l'échelle du matériau. En réalité, les matériaux bio-sourcés, principalement lorsqu'ils sont utilisés pour l'isolation, sont placés au sein d'une paroi multi-couches. La combinaison de plusieurs matériaux ainsi que les différents types de sollicitations peuvent entraîner des réponses hygrothermiques différentes.

Reprenant le principe d'un système multi-couches, (Latif et al. 2015) étudie l'influence d'une couche de finition sur un mélange chaux-chanvre démontrant l'importance de celle-ci sur la capacité de tampon hygrique. Celui-ci montre que l'ajout d'une plaque de plâtre sur un mélange chaux-chanvre diminue par deux sa capacité de tampon hygrique lors du test du MBV.

L'étude à l'échelle de la paroi permet d'étudier le matériau intégré à une paroi multi-couches. En effet, l'ordre des matériaux au sein de la paroi, mais également la nature de l'interface jouent un rôle majeur dans les transferts de chaleur et de masse (De Freitas, Abrantes, and Crausse 1996).

Cette échelle permet également d'étudier la réponse de la paroi soumise à des sollicitations dynamiques côté extérieur (soit contrôlées lorsque la paroi appartient à une cellule expérimentale en laboratoire, soit libres en climat réel) et côté intérieur par les charges de chauffe et d'humidité si le bâti est occupé. Dans le cas d'une étude in-situ hors du cadre d'un laboratoire, l'étude du comportement dynamique des parois représente un cas de rénovation réaliste, où les caractéristiques de la paroi (hétérogénéité, propriétés hygrothermiques des matériaux) ne sont pas connues.

Parmi les difficultés relevées pour mener une instrumentation de cette envergure, on notera la durée importante nécessaire pour obtenir des mesures de qualité ainsi que la précision des capteurs. L'humidité relative est un paramètre particulièrement difficile à mesurer avec précision, la majorité des capteurs affiche une erreur de 5% et une forte déviance dans les hautes humidités rendant difficile l'obtention de mesures de qualité.

De plus, l'accumulation d'humidité au sein de la paroi se produit sur des échelles de temps se comptant sur plusieurs années. Les relevés des teneurs en eau devraient donc s'échelonner sur 3 à 5 ans afin de valider la durabilité d'une paroi suite à une rénovation thermique.

5. Modéliser les transferts couplés au sein des matériaux bio-sourcés

La modélisation des transferts couplés permet d'étudier la réponse hygrothermique de parois soumises à des sollicitations dynamiques. Dans notre cas d'étude, les transferts de masse ne peuvent être négligés au vu de la sensibilité à l'humidité des différents matériaux utilisés. Les simulations permettent d'élargir l'étude grâce à la variété de cas pouvant être étudiés mais également d'évaluer la durabilité de la paroi, en réalisant, plus facilement que pour l'instrumentation in-situ, des études sur de longues périodes de temps.

Néanmoins, plusieurs éléments engendrent une complexité à modéliser les transferts hygrothermiques au sein des matériaux bio-sourcés. Face à la divergence entre les résultats expérimentaux et simulés, (Busser et al. 2016) soulignent que la caractérisation des matériaux et certaines hypothèses des simulations doivent être révisées dans le cas d'étude des agrégats végétaux.

Les modèles de transferts couplés considèrent les matériaux comme homogènes et continus, alors que certains bio-sourcés présentent une anisotropie qui ne peut pas toujours être négligée.

La complexité des transferts de chaleur et de masse, résultant de phénomènes à l'échelle microscopique, nécessite forcément des simplifications dans leur traduction en un modèle mathématique. La description des mécanismes de transfert se fait alors à l'échelle macroscopique (Luikov 1975; De Vries and Philip 1957).

La relation entre ces deux échelles se fait au travers du volume élémentaire représentatif (VER) qui est le volume minimum à prendre en considération pour que, une fois appliquée la théorie d'homogénéisation, les résultats obtenus soient représentatifs du comportement macroscopique du milieu hétérogène. Il faut choisir la taille d'un VER de façon à capturer le mouvement global du fluide, du solide, le transfert thermique et pour lisser les complexités morphologiques (Le 2010).

Au vu de la forte hygroscopicité des matériaux bio-sourcés, certains paramètres doivent être adaptés et sont actuellement investigués. Parmi eux, on compte l'importance de l'hystérésis et comment la prendre en compte (Mualem 1974, Kwiatkowski, Woloszyn, and Roux 2009) ou encore l'influence de la teneur en eau sur la plupart des propriétés hygrothermiques (Dubois 2014). Au vu de la perméabilité à l'air de certains isolants, (Berger et al. 2017) remarquent que le phénomène d'advection de vapeur ne peut pas être négligé pour certains matériaux, alors que la majorité des modèles ne prennent en compte que le phénomène de diffusion de vapeur.

Au-delà de la complexité des phénomènes physiques simulés, un des freins à la simulation numérique du comportement des matériaux bio-sourcés concerne le manque de données d'entrée des propriétés hygrothermiques de ces matériaux. Si les mélanges chaux-chanvre ont par exemple été largement investigués ces dernières années, ce n'est pas le cas de nombreux agrégats végétaux (rafle de maïs, balle de riz, etc...) présentant eux aussi des caractéristiques thermo-physiques intéressantes.

6. Méthodologie adoptée dans le cadre de la thèse

Cet aperçu bibliographique sur les matériaux bio-sourcés soulève de nombreux verrous scientifiques et questionne quant à la fiabilité des résultats provenant aussi bien d'une caractérisation des matériaux, que d'une étude in-situ ou encore de simulations.

En effet, un écart entre les valeurs obtenues par ces différents outils est fréquemment observé. L'origine de ces écarts n'est pas véritablement connue et peut provenir de la métrologie, des protocoles de caractérisation ou des modèles hygrothermiques eux-mêmes (Woloszyn et al. 2014).

Dans notre cas d'étude, à la problématique des matériaux bio-sourcés s'ajoute celle du bâti ancien, difficile à simuler de façon représentative. Le bâti ancien présente en effet les particularités suivantes : des parois hétérogènes, une forte inertie thermique, une ventilation naturelle et des matériaux dont les caractéristiques ne sont pas toujours connues et ont subi un vieillissement (Tasca Guernouti 2011). Ces particularités contribuent à la très grande variété de typologie que l'on rencontre dans le bâti ancien datant d'avant 1948. Ces typologies sont dues à la variété de techniques constructives (matériaux, assemblages), mais également à l'insertion du bâti au sein du milieu urbain (taux de mitoyenneté, densité).

Ces incertitudes aussi bien dans l'étude du bâti ancien que dans celle des matériaux bio-sourcés rendent difficile l'obtention de résultats fiables. Or, l'urgence de rénover le bâti ancien demande de mettre en place une méthodologie claire pour répondre à ces problématiques : l'isolation par l'intérieur a-t-elle des conséquences sur la durabilité de la paroi et une isolation à base de matériaux bio-sourcés constitue-t-elle une solution pertinente ?

Pour pallier à cela, nous choisissons d'allier les outils numériques, la caractérisation des matériaux et une instrumentation in-situ afin d'obtenir d'augmenter la fiabilité des résultats et ainsi, favoriser l'aide à la décision quant aux solutions de rénovation thermique.

Au travers de ces outils, les objectifs sont résumés dans le tableau suivant :

Objectifs	Outils utilisés
Définir plus précisément les typologies constructives propres au centre historique cadurcien, que ce soit au niveau des matériaux qui le constituent, mais également de la réponse dynamique de différents types de paroi. Etudier l'influence du microclimat urbain propre au centre urbain très dense.	Caractérisation en laboratoire Outils SIG Instrumentation in-situ
Caractériser à l'échelle du matériau et à l'échelle de la paroi, des formulations chaux-chanvre, afin d'obtenir une meilleure connaissance de la réponse stationnaire et dynamique de ces matériaux. Cette double caractérisation permet d'avoir une base de données nécessaire aux simulations hygrothermiques et une comparaison réaliste entre une paroi en climat réel et une paroi modélisée.	Caractérisation en laboratoire Instrumentation in-situ
Prédire la performance hygrothermique d'une paroi après isolation thermique par l'intérieur et en évaluer la durabilité pour choisir une solution de rénovation thermique adaptée.	Instrumentation in-situ Simulation hygrothermique dynamique

7. Conclusion

La spécificité des matériaux bio-sourcés allée aux particularités du bâti ancien nous a amené à définir une méthodologie permettant une étude multi-échelle alliant expérimental et numérique. La confrontation des différentes échelles et outils permettra de réduire les incertitudes inhérentes à chacun de ces outils et d'évaluer ainsi la pertinence d'une isolation à base de matériaux bio-sourcés pour la rénovation thermique des façades cadurciennes.

8. Références

- Amziane, Sofiane, Laurent Arnaud, and Noël Challamel. 2013. *Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*.
- Amziane, Sofiane and Florence Collet. 2017. *Bio-Aggregates Based Building Materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM*. edited by Springer.
- Association Construire en chanvre. 2012. *Construire En Chanvre : Règles Professionnelles D'exécution*.
- Belleudy, Clément. 2016. "Modélisation Des Transferts D'air et Leur Impact Sur Le Comportement Hygrothermique Des Bâtiments." Thèse doctorale. Université Grenoble Alpes.
- Berger, J., T. Busser, D. Dutykh, and N. Mendes. 2017. "On the Estimation of Moisture Permeability and Advection Coefficients of a Wood Fibre Material Using the Optimal Experiment Design Approach." *Experimental Thermal and Fluid Science* 90:246–59.
- Busser, T., A. Piot, M. Pailha, T. Bejat, and M. Woloszyn. 2016. "From Materials Properties To Modelling Hygrothermal Transfers of Highly Hygroscopic Walls." in *CESBP*.
- Clarke, J. A. and P. P. Yaneske. 2009. "A Rational Approach to the Harmonisation of the Thermal Properties of Building Materials." *Building and Environment* 44(10):2046–55.
- Daian, J.F. 2013. *Equilibre et Transferts En Milieux Poreux*.
- Dubois, Samuel. 2014. "Modelling the Hygrothermal Behaviour of Crop-Based Construction Materials" PhD Thesis. Université de Liège.
- Duforestel, Thierry. 2015. "Des Transferts Couplés de Masse et de Chaleur À La Conception Bioclimatique: Recherches Sur L'efficacité Énergétique Des Bâtiments. Mémoire HDR."
- De Freitas, V. P., V. Abrantes, and P. Crausse. 1996. "Moisture Migration in Building Walls - Analysis of the Interface Phenomena." *Building and Environment* 31(2):99–108.
- Glé, P., E. Gourdon, and L. Arnaud. 2011. "Acoustical Properties of Materials Made of Vegetable Particles with Several Scales of Porosity." *Applied Acoustics* 72:249–59.
- Jerman, Miloš and Robert Černý. 2012. "Effect of Moisture Content on Heat and Moisture Transport and Storage Properties of Thermal Insulation Materials." *Energy and Buildings* 53:39–46.
- Kwiatkowski, Jerzy, Monika Woloszyn, and Jean Jacques Roux. 2009. "Modelling of Hysteresis Influence on Mass Transfer in Building Materials." *Building and Environment* 44(3):633–42.
- Langmuir, Irving. 1918. "The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum." *Journal of the American Chemical Society* 40(9):1361–1403.
- Latif, Eshrar, Mike Lawrence, Andy Shea, and Pete Walker. 2015. "Moisture Buffer Potential of Experimental Wall Assemblies Incorporating Formulated Hemp-Lime." *Building and Environment* 93:199–209.
- Latif, Eshrar, Simon Tucker, Mihaela Anca, Devapriya Chitral, and Darryl Newport. 2014. "Hygric Properties of Hemp Bio-Insulations with Differing Compositions." *Construction and Building Materials* 66:702–11.

- Lawrence, Mike, Andy Shea, Pete Walker, and Pieter De Wilde. 2013. "Hygrothermal Performance of Bio-Based Insulation Materials." *Proceedings of the ICE - Construction Materials* 166(4):257–63.
- Le, Anh Dung Tran. 2010. "Etude Des Transferts Hygrothermiques Dans Le Béton de Chanvre et Leur Application Au Bâtiment (Sous Titre: Simulation Numérique et Approche Experimentale)." Thèse doctorale. Université de Reims - Champagne Ardenne.
- Luikov, A. V. 1975. "Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies (Review)." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18(1):1–14.
- Mougel, Eric. 2012. "Etude Des Transferts Couplés de Chaleur et D'Humidité Dans Les Constructions Bois Studie Zur Thermik- Und Feuchtedurchdringung Im." Pp. 1–8 in *2ième forum bois construction*. Beaune.
- Mualem, Y. 1974. "A Conceptual Model of Hysteresis." *Water Resources Research* 10:514–20.
- Osborne, Mark. 2004. *Adsorption Isotherms*.
- Padfield, T. 1998. "The Role of Absorbent Building Materials in Moderating Changes of Relative Humidity." PhD Thesis. The Technical University of Denmark.
- Palumbo Fernández, Mariana. 2015. "Contribution to the Development of New Bio-Based Thermal Insulation Materials Made from Vegetal Pith and Natural Binders : Hygrothermal Performance, Fire Reaction and Mould Growth Resistance." PhD Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya
- Pierre, Thomas and Thibaut Colinart. 2004. "Caractérisation Thermo-Hydrigue D'agro-Matériaux À Base de Chanvre." 1–6.
- Piot, Amandine. 2009. "Hygrothermique Du Bâtiment: Expérimentation Sur Une Maison À Ossature Bois En Conditions Climatiques Naturelles et Modélisation Numérique." Thèse doctorale. INSA de Lyon.
- Rouchier, Simon, Thomas Busser, Amandine Piot, and Monika Woloszyn. 2017. "Hygric Characterization of Wood Fiber Insulation under Uncertainty with Dynamic Measurements and Markov Chain Monte-Carlo Algorithm." *Building and Environment* 114:129–39.
- Schiavoni, S., F. D'Alessandro, F. Bianchi, and F. Asdrubali. 2016. "Insulation Materials for the Building Sector: A Review and Comparative Analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62:988–1011.
- Tasca Guernouti, Sihem (CETE Ouest). 2011. "Modélisation Du Comportement Thermique Du Bâtiment Ancien Avant 1948."
- Vėjelienė, Jolanta, Albinas Gailius, Sigita Vėjelis, Saulius Vaitkus, and Giedrius Balciunas. 2011. "Evaluation of Structure Influence on Thermal Conductivity of Thermal Insulating Materials from Renewable Resources." *Materials Science* 17(2):208–12.
- De Vries, D. .. and J. .. Philip. 1957. "Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients." *Transactions, American Geophysical Union* 38(2).
- Woloszyn, Monika et al. 2014. "Vers Une Méthode de Conception HYGRO-Thermique Des Bâtiments Performants : Démarche Du Projet HYGRO-BAT." *Conférence IBPSA France 2014* (i):1–8.

CHAPITRE 3

Dispositifs et résultats expérimentaux

1. Introduction.....	42
2. Caractérisation des matériaux.....	42
2.1. Composition et choix des matériaux.....	42
2.2. Propriétés microstructurales	43
2.2.1. Porosité ouverte et teneur en eau à saturation	43
2.2.2. Résultats	43
2.3. Propriétés thermo-physiques.....	44
2.3.1. Conductivité thermique.....	44
2.3.2. Capacité thermique	46
2.3.3. Effusivité obtenue avec un conductimètre à plan chaud.....	46
2.3.4. Résultats	48
2.4. Propriétés hydriques.....	49
2.4.1. Isotherme de sorption.....	49
2.4.2. Détermination des coefficients de transferts hydriques	51
2.4.3. Moisture Buffer Value ou capacité de tampon hygrique	54
2.5. Conclusion	57
3. Instrumentation in-situ	58
3.1. Cas d'étude.....	58
3.2. Suivi à long terme	60
3.2.1. Monitoring des ambiances intérieures et extérieures.....	61
3.2.2. Monitoring des parois	61
3.2.3. Prise en main à distance.....	63
3.3. Résultats.....	63
3.3.1. Etude des transferts dans la paroi	63
3.3.2. Réponse dynamique de la paroi.....	65
3.3.3. Etude du confort thermique dans le bâti ancien.....	69
3.3.4. Etanchéité du bâti	71
3.3.5. Conclusion.....	72
4. Conclusion du chapitre	73
5. Références	74

1. Introduction

La porosité et la microstructure sont propres à chaque matériau de construction et en déterminent les propriétés thermiques et hygriques. La compréhension de ces phénomènes physiques est essentielle, car ils permettent l'analyse de l'impact de l'humidité sur les performances hygrothermiques de la paroi et sa durabilité. Afin de répondre à cette problématique, une étude multi-échelles est exposée dans ce chapitre. Premièrement sont présentés les différents dispositifs expérimentaux utilisés pour caractériser physiquement les matériaux de notre étude ainsi que les résultats obtenus. Puis, afin d'analyser les matériaux dans une configuration de paroi multicouches, l'étude à l'échelle matériau est complétée par une étude à une échelle plus complexe, celle de la paroi et du bâtiment afin de pouvoir observer leur réponse hygrothermique dans un environnement réel.

2. Caractérisation des matériaux

2.1. Composition et choix des matériaux

Deux types de matériaux sont caractérisés, ceux qui constituent la paroi d'origine et ceux destinés à l'amélioration thermique, soit respectivement deux briques foraines datées du 16^{ème} et 18^{ème} siècle et deux formulations d'un mélange chaux-chanvre.

Les briques ont été fournies et datées par le service patrimoine de la ville de Cahors, elles proviennent de démolitions, antérieures au projet, de bâtiments du centre ancien.



Figure 14 : Brique 18^e (bas gauche), brique 16^e (haut gauche), mélange chaux-chanvre CC1 (bas droite), mélange chaux-chanvre CC2 (bas droite)

Le choix des deux formulations et les échantillons des mélanges chaux-chanvre ont été réalisés par un artisan. Au vu de la découpe difficile du matériau chaux-chanvre, des moules à la dimension des éprouvettes souhaitées avaient été fournies au préalable. Les formulations étudiées sont présentées dans le Tableau 1 et sont habituellement utilisées pour une mise en place en banchage (formulation CC1) et en enduit (formulation CC2).

	CC1 (% massique)	CC2 (% massique)
Chaux (NHL2, chaux aérienne, mélange 1:1)	33	31.5
Chènevotte	13	6
Sable	-	14.5
Eau	54	47

Tableau 1 : Composition massique des mélanges chaux-chanvre étudiés

Les Règles Professionnelles d'exécution d'ouvrages en bétons de chanvre proposent trois applications caractéristiques des mélanges chaux-chanvre selon le rapport massique de liant et de granulats végétaux (Figure 15). Les formulations de nos mélanges se rapprochent de l'application mur pour le mélange CC1 et de l'application enduit pour CC2.

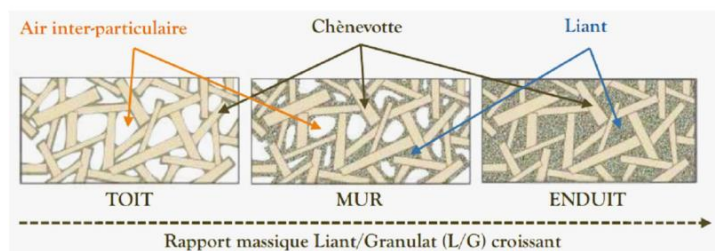


Figure 15 : Applications caractéristiques des mélanges chaux-chanvre proposées par les Règles Professionnelles

Des mélanges terre-chanvre ont également été testés, mais les résultats ne sont pas présentés ici.

2.2. Propriétés microstructurales

2.2.1. Porosité ouverte et teneur en eau à saturation

La porosité ouverte n_o est le rapport entre le volume des pores ouverts V_o (considérés accessibles à l'eau) et le volume de l'échantillon : $n_o = V_o/V$ en % (m^3/m^3). Elle renseigne directement sur le fait que les pores communiquent ou pas entre eux. La teneur en eau à saturation (correspondant au rapport entre la masse d'eau remplissant la porosité ouverte et la masse sèche de l'échantillon) et la porosité accessible à l'eau sont obtenues en réalisant une saturation sous vide des différents échantillons. Le vide obtenu grâce à un montage associant un dessiccateur et une pompe à vide permet de chasser les bulles d'air présentes dans la macroporosité.

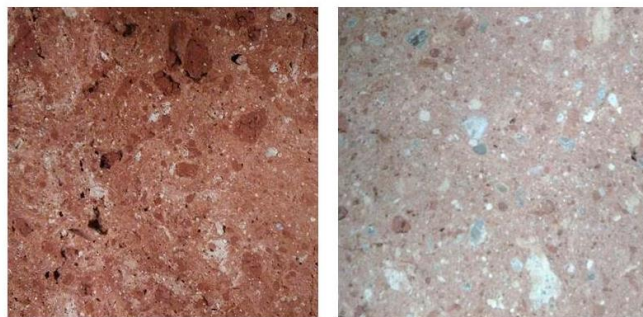
2.2.2. Résultats

La détermination de la masse volumique sèche a été réalisée pour tous les matériaux, alors que la porosité accessible à l'eau n'a été réalisée que pour les échantillons de brique.

Matériau	Brique 16 ^{ième}	Brique 18 ^{ième}	CC1	CC2
Masse volumique sèche kg/m ³	1616	1795	440	535
Porosité accessible à l'eau (%)	38.8	32.8	78.9 (calculée)	74.4 (calculée)

Tableau 2 : Propriétés microstructurales

Les résultats pour les deux briques montrent que leurs caractéristiques sont différentes en termes de masse volumique et de porosité. Dans les deux cas, une macroporosité visible à l'œil nu laisse supposer des cuissons à des températures peu élevées (Figure 16). En effet, la température de cuisson des briques impacte la distribution porale et il est connu que les fours jusqu'au 18^{ième} siècle ne permettaient ni d'atteindre des températures très élevées, ni d'obtenir une chaleur homogène.

Figure 16 : Observation visuelle d'une macroporosité, brique 16^e (gauche) et brique 18^e (droite)

Les résultats pour les deux composites chaux-chanvre montrent aussi des différences, avec une masse volumique plus faible et une porosité plus élevée pour le mélange CC1. Ceci confirme que le ratio d'agrégats végétaux par rapport au liant modifie la densité. Les agrégats, moins dense, allègent le mélange et modifient également l'agencement entre le liant et les agrégats, entraînant l'apparition d'une macroporosité intra-granulaires plus importante. (Glé, Gourdon, and Arnaud 2011) soulignent la porosité plurimodale du composite chaux-chanvre, comprenant la porosité inter-granulaire macroscopique (millimétrique), la porosité interne à la particule de chènevotte (~10 µm) et la porosité du liant (10 nm à 1µm) en fonction du type de liant.

2.3. Propriétés thermo-physiques

2.3.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur intrinsèque du matériau qui caractérise sa capacité à se laisser traverser par un flux de chaleur. La conductivité dépend de la proportion des différentes phases mais aussi de la géométrie de leur arrangement.

Différents équipements et méthodes permettent de déterminer la conductivité thermique, parmi eux, la méthode de la plaque chaude gardée et celle du fil chaud ont été retenues.

a) Méthode de la plaque chaude gardée

Le principe de la méthode de la plaque chaude gardée est illustrée Figure 17. Un flux de chaleur constant Φ , obtenu par effet Joule, est imposé au niveau de la plaque dite chaude, de surface S et va diffuser au sein de l'échantillon d'épaisseur e à caractériser.

En considérant que le différentiel de température entre la plaque chaude et la plaque froide entraîne la mise en place d'un flux de chaleur stationnaire, on peut ainsi obtenir la conductivité thermique du matériau selon l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot e}{S \Delta T} \tag{1}$$

Avec λ la conductivité thermique en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, Φ le flux de chaleur en W , e l'épaisseur de l'échantillon en m , S la section de passage du flux en m^2 et ΔT la différence de température en K .

Le flux est supposé unidirectionnel, dans la direction normale des plaques. Expérimentalement, la dimension finie de l'échantillon crée des effets de bord. Pour en limiter l'impact, l'échantillon est entouré d'isolant. Afin d'obtenir des résultats cohérents, le contact entre l'échantillon et la plaque doit être le meilleur possible, condition qui peut être difficile à obtenir dans le cas de matériau type chaux-chanvre où la planéité n'est pas assurée.

Comme pour la plupart des méthodes stationnaires, la durée de l'essai constitue un inconvénient. Dans le cas d'échantillons très isolants, ce temps peut se compter en jours.

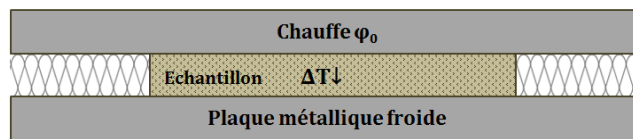


Figure 17 : Méthode de la plaque chaude gardée

b) Méthode du fil chaud

La méthode du fil chaud appartient aux méthodes en régime quasi établi qui sont dépendantes du temps. Elles permettent également, contrairement aux méthodes en régime permanent, d'évaluer des paramètres tels que la diffusivité thermique ou la capacité thermique.

Le dispositif, présenté Figure 18, est constitué d'une sonde à chocs thermiques qui sera placée entre deux échantillons identiques du matériau à caractériser et d'un boîtier d'acquisition électronique.

La procédure consiste à produire un faible échauffement local au niveau du matériau (alors considéré à l'équilibre thermique) et de mesurer l'élévation de la température au cours d'un temps très court.

L'équation suivante relie la conductivité thermique à l'évolution de la température par rapport au temps :

$$\Delta T = \frac{q}{(4\pi\lambda)} * (\ln(t) + cste) \quad (2)$$

Avec λ la conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$, q le flux linéique injecté en W/m , ΔT la différence de température en K et t la durée de l'essai en s .

Pour la fiabilité des résultats, une répétabilité des essais est recommandée. Le principe de la sonde et le dispositif ont été développés par le CSTB. Ils dérivent également de la norme ASTM D5930-97 et de la recommandation RILEM AAC 11-3.

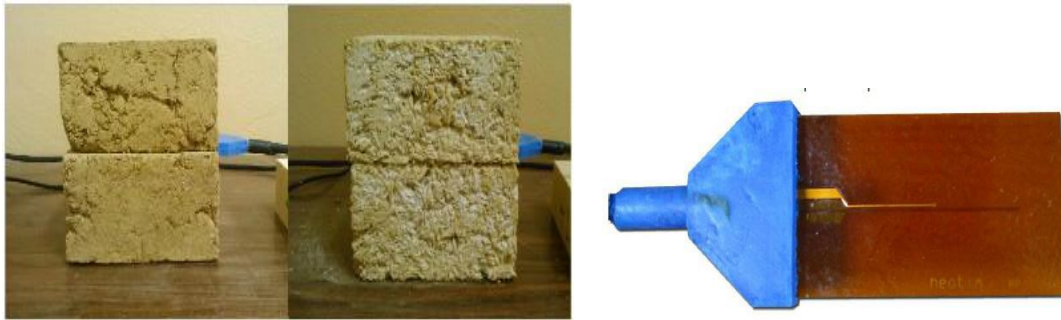


Figure 18: Méthode du fil chaud et sonde utilisée (produit par Neotim FP2C)

La méthode du fil chaud, de par sa rapidité, permet de limiter les problèmes de migration de vapeur d'eau au cours de l'essai, permettant ainsi des mesures de la conductivité à différents paliers d'humidité.

2.3.2. Capacité thermique

La capacité thermique exprime la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur. Elle est caractérisée par la chaleur massique (ou la chaleur volumique) qui mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever de $1^{\circ}C$, 1 kg (ou 1 m^3) du matériau.

La chaleur spécifique d'un milieu poreux peut être exprimée en fonction de celle des phases qui le constitue, soit $C = \sum \theta_i C_i$ avec θ_i la teneur volumique de chacun des constituants et C_i la chaleur volumique (Lui, 1975). L'eau possédant une capacité thermique non négligeable ($4.18 \cdot 10^6\text{ J.m}^{-3}.K^{-1}$), la capacité thermique d'un matériau sera linéairement dépendante de sa teneur en eau.

La capacité thermique est ici obtenue indirectement grâce à la mesure de l'effusivité thermique. L'effusivité et la diffusivité thermique sont deux paramètres décrivant respectivement la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève et l'aptitude d'un matériau à transmettre la chaleur de part et d'autre de son volume.

2.3.3. Effusivité obtenue avec un conductimètre à plan chaud.

L'effusivité représente à la fois la capacité du matériau à stocker de l'énergie par unité de volume entre deux états thermiques différant d'un Kelvin (C_{vol}) mais aussi sa capacité à faciliter la transmission de la chaleur à l'ensemble de son volume (λ) (Munaretto 2014).

Le plan chaud fonctionne de la même manière que le fil chaud. L'effusivité est reliée à la température et au temps à partir de l'équation suivante :

$$\Delta T = q(R_t - \frac{C_s}{E_{ff}^2} + 2 \frac{\sqrt{t}}{(E_{ff}\sqrt{\pi})}) \quad (3)$$

avec E_{ff} l'effusivité en $J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$, T la température en degré K, q la densité de flux injecté en W/m^2 , t la durée en s, R_t la résistance totale c'est-à-dire celle de la sonde et celle de contact en $K.m^2/W$ et C_s une caractéristique intrinsèque de la sonde en $J.K^{-1}.m^{-2}$

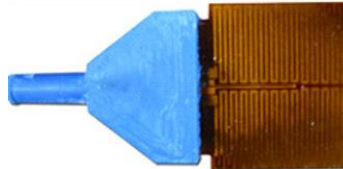


Figure 19: Sonde à plan chaud

2.3.4. Résultats

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant et comparés à quelques valeurs de références de la littérature.

Tableau 3 : Propriétés thermiques obtenues suite à la caractérisation physique

	Paramètres	Conductivité thermique sèche	Capacité thermique	Effusivité thermique	Diffusivité thermique
	Symbole et équation	λ	C_p	$\varepsilon = \sqrt{\lambda \rho C_p}$	$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$
	Unités	W/m.K	J/kg.K	J/m ² .K√s	mm ² /s
Chaux-chanvre	Valeurs recensées dans la littérature	0.09 -0.16 pour $\rho=400$ - 700kg/m ³ (Cérézo 2005) 0.116 - 0.125 pour $\rho=374$ - 416 kg/m ³ (Collet and Pretot 2014)	1000 pour $\rho=317$ kg/m ³ (Samri 2008)	231 pour (Cp=1100J/kg.K, $\lambda =0.11$ W/m.K, $\rho=440$ kg/m ³) (Collet-Foucault 2004) 297 (Evrard 2008)	1.48 pour (Cp=1550J/kg.K, $\lambda =0.11$ W/m.K, $\rho=480$ kg/m ³) (Evrard and De Herde 2005)
	Résultats expérimentaux CC1 $\rho=440$ kg/m ³	0.078±0.001 (plaque chaude gardée) 0.107 (fil chaud, état sec)	752 (calculé)	182±4 (plan chaud)	0.302 (calculé)
	CC2 $\rho=535$ kg/m ³	0.089±0.004 (plaque chaude gardée) 0.129±0.011 (fil chaud)	1125±110	279±11 (mesuré plan chaud)	0.21 (calculé)
Briques	Valeurs recensées dans la littérature	0.6 pour $\rho=1800$ kg/m ³ [1] 0.52 pour $\rho=1660$ kg/m ³ [2]	850 [1] 937 [2]	-	-
	Résultats expérimentaux Brique 16 ^{ième}	0.39 (plaque chaude gardée) 0.49±0.05 (fil chaud)	800±55 (mesuré)	801 (calculé $\lambda_{\text{fil chaud}}$)	0.38 (calculé $\lambda_{\text{fil chaud}}$)
	Résultats expérimentaux Brique 18 ^{ième}	0.525 (plaque chaude gardée) 0.715±0.07 (fil chaud)	811±47 (mesuré)	1020 (calculé $\lambda_{\text{fil chaud}}$)	0.49 (calculé $\lambda_{\text{fil chaud}}$)

[1] brique pleine historique, base de données WUFI

[2] brique pleine historique de Dresde, base de données MASEA

En comparant nos résultats aux essais de la littérature pour des échantillons de masse volumique similaire, nous obtenons des valeurs cohérentes pour les briques, comme pour les deux formulations de chaux-chanvre. La formulation CC1 contenant le plus d'agrégats végétaux et présentant donc une masse volumique plus faible est également la plus isolante. De même, la brique du 16^{ième} siècle, dont la masse volumique est plus faible, possède une conductivité thermique moins élevée.

Concernant la conductivité thermique, il existe un écart important entre les valeurs obtenues selon les dispositifs utilisés. La valeur plus faible obtenue par la méthode de la plaque gardée, peut être expliquée par la résistance de contact qui peut exister entre la plaque chaude gardée et l'échantillon. Au vu des résultats de la littérature et pour des masses volumiques similaires, le résultat du fil chaud paraît plus satisfaisant. Nous choisissons donc de retenir les valeurs obtenues par la méthode quasi-stationnaire. De plus, pour les matériaux type bio-sourcés, dont les caractéristiques thermo-physiques évoluent avec l'humidité, il est préférable de faire les mesures avec le fil chaud afin d'obtenir la conductivité en fonction de l'humidité relative.

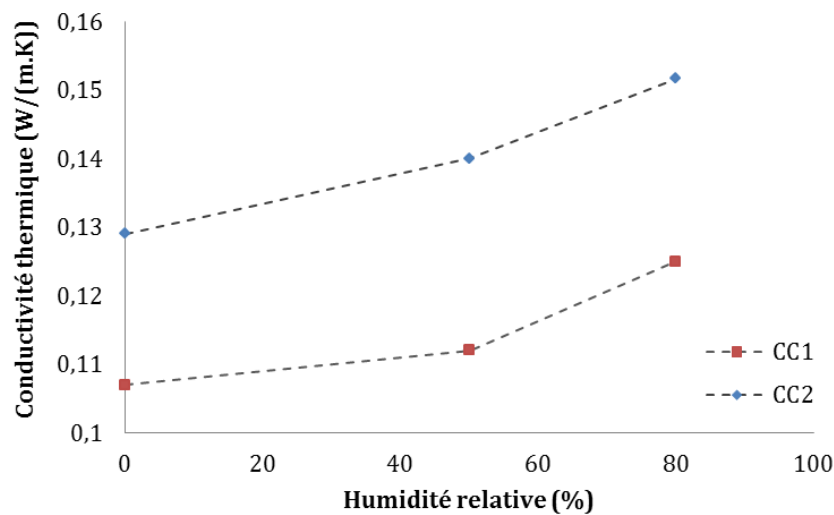


Figure 20: Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique obtenue par la méthode du fil chaud

Pour les deux formulations on observe une augmentation d'environ 15% entre la conductivité thermique sèche et la conductivité thermique à 80% HR. (Collet and Pretot 2014) trouvent une augmentation similaire (environ 25% entre 0 et 90% HR) pour un béton de chanvre d'une densité de 394 kg/m³ et font remarquer que la variation de conductivité thermique est beaucoup plus sensible à la densité du matériau qu'à la teneur en eau.

2.4. Propriétés hydriques

2.4.1. Isotherme de sorption

Les matériaux poreux ont la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air ambiant. Cette caractéristique physique est décrite par les isothermes d'adsorption et désorption. Ceux-ci décrivent les états d'équilibre successifs du matériau avec le milieu ambiant, dans des conditions de température uniformes, traduisant ainsi la sensibilité d'un matériau à la vapeur ambiante et son aptitude au stockage d'humidité.

a) Méthode gravimétrique

La méthode gravimétrique est décrite dans la norme (NF EN ISO 12751 2000). L'isotherme s'obtient en imposant une humidité relative à une série d'échantillons, dans notre cas à l'aide de sels hygroscopiques et en réalisant un suivi de masse jusqu'à stabilisation de celle-ci, pour en déduire la quantité d'eau absorbée par le matériau sous une humidité relative fixée. On admet alors que les phases liquide et vapeur dans le matériau sont à l'équilibre. Les courbes sont obtenues par paliers successifs. Pour l'isotherme d'adsorption, comme de désorption, le point de départ est essentiel car il conditionne le résultat. Même si l'influence de la température sur la teneur en eau à l'équilibre est parfois contestée, notamment au vue des incertitudes importantes lors des mesures, certains auteurs (Samri 2008) relèvent que lorsque la température augmente, la quantité d'eau absorbée pour une humidité donnée diminue. Le seuil de condensation capillaire est également augmenté. Dans notre cas, l'isotherme a été réalisée pour une seule température, à savoir 20°C.

b) Teneur en eau de référence u_{80} (kg/m³)

Il s'agit de la teneur en eau d'équilibre du matériau, lorsque celui-ci est maintenu dans une ambiance ayant une humidité relative de 80%, après une phase de séchage. Cette valeur constitue un moyen rapide d'évaluer le caractère hygroscopique du matériau. (Künzel 1995) propose une détermination simplifiée de l'isotherme de sorption à partir des valeurs u_{80} et u_{cap} .

c) Résultats

L'isotherme de sorption a été réalisée pour les deux mélanges chaux-chanvre (Figure 21). La teneur en eau u_{80} nous permet d'évaluer le caractère hygroscopique des briques historiques étudiées (Tableau 4).

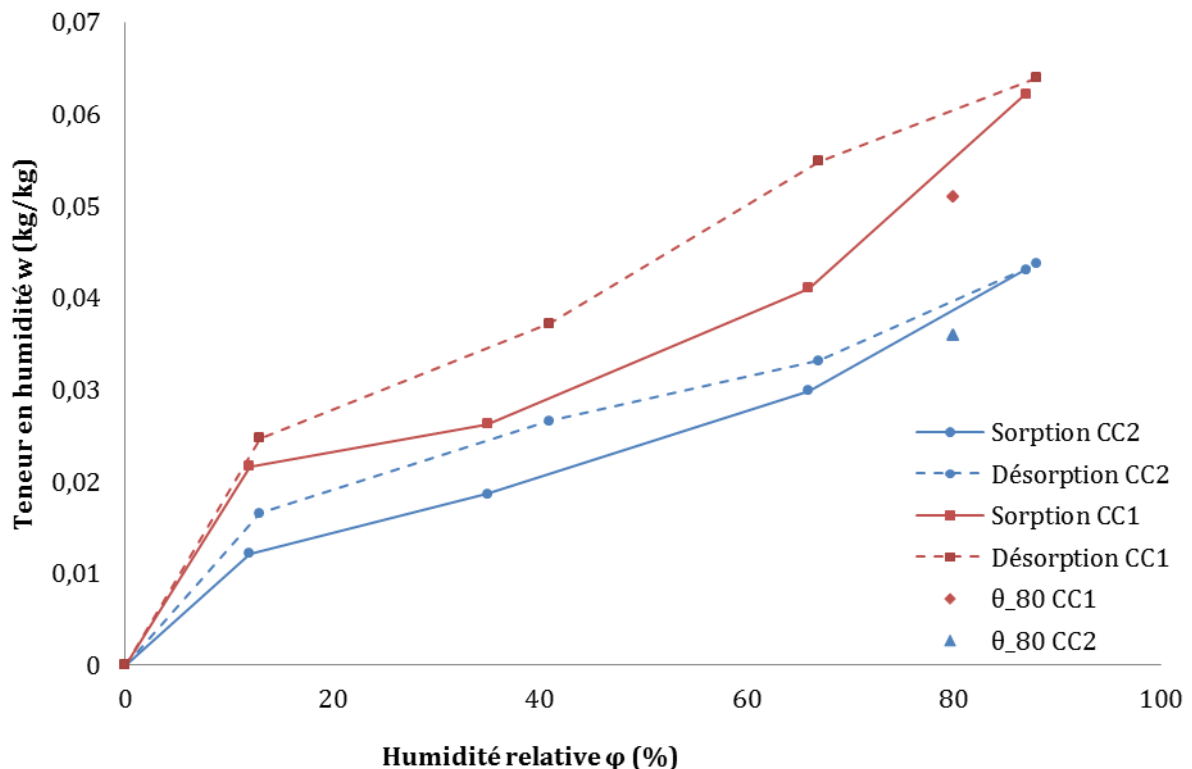


Figure 21 : Isothermes de sorption et désorption CC1 et CC2 réalisées entre 0 et 87%HR et θ_{80}

	Brique 16 ^{ième}	Brique 18 ^{ième}	CC1	CC2
θ_{80} (kg/m ³)	2.01±0.02	6.28±0.06	23.96±0.1	19.38±0.16

Tableau 4 : Teneur en eau à 80%HR

La valeur de θ_{80} plus élevée pour la brique du 18^{ième} siècle illustre une porosité plus fine. En accord avec l'isotherme de sorption, $\theta_{80,CC1}$ présente la valeur la plus élevée, traduisant une capacité de stockage hydrique supérieure. La valeur de θ_{80} nous permet de conclure que les briques sont peu hygroscopiques, à l'inverse des mélanges chaux-chanvre.

La forme des courbes des isothermes de sorption dépend de l'agencement du réseau poreux et de sa composition. Un phénomène d'hystérésis est observé pour les deux formulations.

La teneur en eau massique est plus importante pour le mélange CC1, principalement à partir de HR=50%. Cette observation est confirmée par la littérature, l'augmentation du ratio bio-agrégat/liant induit des teneurs en eau plus importantes, principalement pour les hautes humidités relatives (Amziane and Collet 2017). La taille des pores de la chènevotte favorise l'adsorption plurimoléculaire et la condensation capillaire pour cette plage de valeurs d'humidité relative (Samri 2008).

2.4.2. Détermination des coefficients de transferts hydriques

a) Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur δ s'obtient en imposant un gradient de pression partielle de vapeur Δp_v constant et unidirectionnel au travers d'un échantillon d'épaisseur e . Comme présenté Figure 22, chaque côté de l'échantillon est maintenu à une humidité relative différente, d'un côté grâce à une solution saline saturée et de l'autre par les conditions d'humidité créées en chambre climatique. Cette méthode est dite méthode de la coupelle et est décrite dans la norme (ISO 12572 2016). La mesure de la densité de flux de vapeur g_v en régime permanent conduit à la perméabilité :

$$\delta = g_v * \frac{e}{\Delta p_v} \tag{4}$$

Avec δ en kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹, Δp_v en Pa, e en m et g_v en kg.s⁻¹.m⁻²

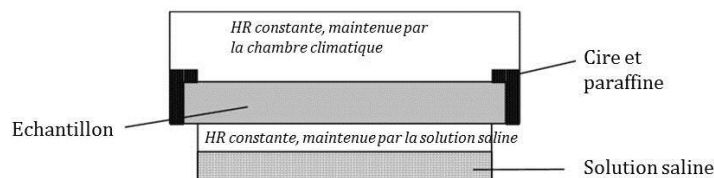


Figure 22: Schéma du test de la coupelle

Les deux gradients d'humidité relative fréquemment utilisés sont dit ceux de la coupelle sèche (0% dans la coupelle/ 50% atmosphère contrôlée) et de la coupelle humide (93 % dans la coupelle/ 50 % atmosphère), le tout dans une enceinte à 23°C. Les bords de l'échantillon sont scellés afin d'obtenir un flux unidirectionnel.

b) Essai d'absorption d'eau par capillarité

Le test de capillarité consiste à mesurer l'absorption d'eau dans le matériau sous l'effet des forces capillaires provoquées par le contact avec l'eau liquide.

Les éprouvettes sont préalablement enduites latéralement d'une résine afin de limiter l'évaporation et de favoriser un transfert liquide unidirectionnel. Elles sont ensuite séchées, puis immergées sur quelques millimètres afin d'assurer l'alimentation capillaire par une pellicule d'eau. Le volume cumulé absorbé est alors connu par la variation de poids en fonction du temps. La cinétique évolue linéairement en fonction de la racine carrée du temps, selon la seconde loi de Fick d'après la relation suivante :

$$\frac{dw}{S} = A_{cap}\sqrt{t} \tag{5}$$

Avec w la masse en kg, S la surface de l'échantillon en m^2 , A_{cap} le coefficient d'absorption capillaire en $kg.m^{-2}.h^{-1/2}$, et t le temps en h.

Les phénomènes de transferts dépendent de la géométrie des pores. Le débit est contrôlé par la distribution de la taille des pores et leur rétrécissement. Des tailles de pores plus importantes accélèrent la cinétique d'absorption mais réduisent la remontée capillaire.

A la suite de cet essai, le coefficient d'absorption capillaire A_{cap} ainsi que la teneur en eau capillaire (θ_{cap}) peuvent être déterminés. Selon (Scheffler 2008), θ_{cap} est défini comme la plus haute teneur en eau atteinte au cours de l'essai d'absorption capillaire. θ_{cap} correspond donc soit à la teneur en eau à 24h à la fin de l'essai d'absorption d'eau par capillarité, soit à la teneur en eau à laquelle la vitesse d'absorption dévie vers une asymptote horizontale (Figure 23). Les valeurs A_{cap} et θ_{cap} servent par la suite de données d'entrée au logiciel de simulation hygrothermique Delphin 5 pour dimensionner la courbe de stockage d'humidité et les coefficients de transferts hygriques.

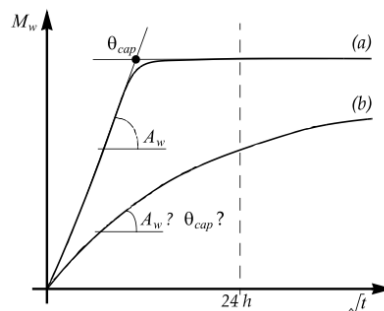


Figure 23: Essai d'absorption capillaire sur un matériau homogène (a) et un matériau hétérogène (b) d'après (Scheffler 2008)

Scheffer souligne que l'essai d'absorption capillaire n'est pas forcément adapté pour certains matériaux hétérogènes. Comme montré Figure 23, la forme de la courbe du matériau (b) diffère de la courbe idéale, et ne permet pas de définir avec précision la valeur de A_{cap} et θ_{cap} .

c) Résultats

Les différents coefficients de transferts hygriques sont réunis dans le tableau suivant.

	μ (coupelle sèche)	A_{cap} (kg.m ⁻² .h ^{-1/2})	θ_{cap} (à 24h) (kg/m ³)	θ_{sat} (kg/m ³)
Brique 16 ^{ième}	-	16.64 ± 0.3	275 ± 1.9	388
Brique 18 ^{ième}	-	6.97 ± 0.2	248 ± 1.2	328
CC1	5.5 ± 1.2	11.75 ± 0.75	305 ± 5.8	788 (calculé)
CC2	6.9 ± 2.3	23.57 ± 0.53	446 ± 3.2	744 (calculé)

Tableau 5: Propriétés de transferts hydriques

La perméabilité à la vapeur d'eau a été réalisée sur les deux formulations de chaux-chanvre. Cette propriété est influencée par la nature du liant selon (Grelat, 2005). A l'inverse, (Walker and Pavia 2014) soulignent que la macroporosité existant entre la chènevotte et la chaux a une influence plus importante que la microporosité du liant. Nos deux mélanges, réalisés avec un mélange de chaux aérienne et de NHL2, considérés comme très perméables, expliquent les faibles valeurs obtenues. De plus, la macroporosité plus importante de CC1, confirme l'observation de Walker et Pavia. (Chamoin 2013) obtient un facteur de résistance à la vapeur d'eau de 6.7 pour un béton de chanvre d'une masse volumique de 440 kg/m³, soit une valeur similaire à la nôtre.

La Figure 24 rapporte les résultats des tests d'absorption capillaire réalisés sur 24h pour les briques et les mélanges chaux-chanvre, A_{cap} et θ_{cap} sont obtenus à l'issue de ce test.

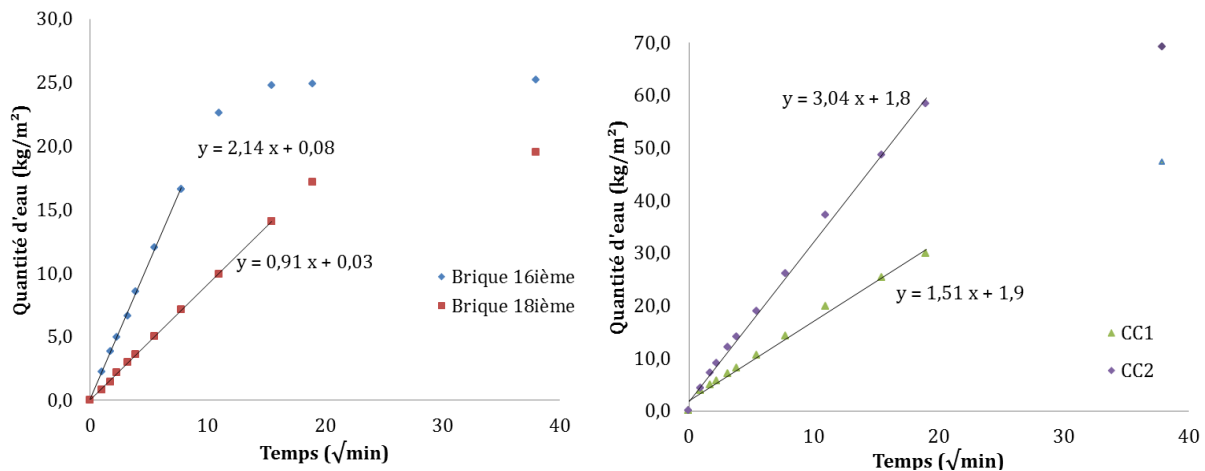


Figure 24: Résultats des essais d'absorption capillaire

Pour les formulations chaux-chanvre, la vitesse d'absorption après 24h ne s'est pas encore stabilisée. On peut donc s'interroger sur la justesse de la valeur obtenue pour $\theta_{cap,24h}$. Cette particularité est caractéristique des matériaux hétérogènes possédant une porosité plurimodale, comme souligné par (Scheffler 2008) et est particulièrement notable pour CC1, possédant un ratio agrégat végétal/liant plus élevé que CC2.

Pour les briques comme pour les mélanges chaux-chanvre, on observe une différence entre θ_{cap} et θ_{sat} (représentant une quantité d'eau occupant toute la porosité ouverte du matériau). Cette différence peut s'expliquer par la présence de nombreux pores de tailles trop élevées, ne

participant pas à l'absorption capillaire conformément à la loi de Jurin et à la présence de bulles d'air dans les plus gros pores capillaires, limitant le degré de saturation.

Si l'augmentation du coefficient de capillarité (A_{cap}) avec la densité est cohérent avec la littérature pour le matériau chaux-chanvre (Amziane, Arnaud, and Challamel 2013), les valeurs que nous obtenons sont jusqu'à 10 fois plus élevées, comparées aux valeurs qui s'échelonnent entre 2.4 et 9 kg/(m².h^{1/2}) trouvées par (Walker and Pavia 2014) et (de Bruijn et al. 2009). La variation de pente au cours de l'essai reflète la porosité plurimodale caractéristique des mélanges d'agrégats végétaux et d'une matrice minérale. Le coefficient de capillarité présente des écarts importants entre la littérature et nos deux formulations. Cela met en avant l'importance de caractériser les matériaux non normés, afin d'avoir par la suite des données d'entrée fiables pour les modèles numériques.

Pour les briques, les valeurs trouvées dans la littérature vont de 10,9 kg/(m².h^{1/2}) pour une porosité ouverte de 37.4% à 17,4 kg/(m².h^{1/2}) pour une porosité ouverte de 31%. Ces valeurs et nos résultats confirment que la porosité totale n'est pas le facteur le plus important dans le phénomène d'imbibition, mais bien la distribution de tailles de pores et la géométrie porale.

Chacun des matériaux testés (chaux-chanvre et brique) est considéré comme capillaire. Du coefficient d'absorption capillaire peut être déduit le coefficient de diffusion hydrique. Tout comme le coefficient de diffusion de vapeur, il permet de traduire à l'échelle macroscopique des comportements liés à la structure microscopique des matériaux.

2.4.3. Moisture Buffer Value ou capacité de tampon hygrique

a) Définition

Le Moisture Buffer Value (MBV) indique la quantité d'eau adsorbée ou désorbée lorsque le matériau est soumis à une variation d'humidité pendant un temps donné. Celui-ci caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air intérieur ambiant.

Sa caractérisation expérimentale se fait par le biais d'un essai détaillé dans le projet Nordtest de l'Université Technique du Danemark (Rode 2005). Les échantillons sont soumis à une variation d'humidité relative (HR) : 8 heures à 75%, suivies de 16 heures à 33%. Le même cycle de 24 heures est répété jusqu'à l'état d'équilibre. La température de l'essai est maintenue constante à 23°C. L'état de la surface du matériau doit être le plus représentatif possible du matériau in situ. La valeur $MBV_{\text{expérimental}}$ est calculée grâce à la relation suivante :

$$MBV_{\text{expérimental}} = \frac{\Delta m}{A (HR_{\text{max}} - HR_{\text{min}})} \quad (6)$$

Avec Δm la variation de masse de l'échantillon (g), A la surface exposée (m²), HR_{max} l'humidité relative maximale et HR_{min} l'humidité relative minimale (%).

(Mcgregor et al. 2014) ont étudié les différents paramètres influençant le résultat obtenu. Parmi eux, on trouve l'influence de la couche de finition, la vitesse de ventilation dans la chambre climatique déterminant le coefficient de convection massique, l'amplitude de variation de l'humidité relative ainsi que l'épaisseur de l'échantillon. Lorsque l'épaisseur du matériau est supérieure à la profondeur de pénétration hydrique, on s'affranchit de l'influence de l'épaisseur

et de l'amplitude entre les deux paliers d'humidité. La profondeur de pénétration peut être obtenue par calcul, mais est ainsi souvent surestimée.

La valeur de la profondeur de pénétration est la profondeur selon laquelle l'amplitude de variation de concentration de vapeur ne dépasse pas 1% de celle de sa surface (Arfvidsson 1999). La profondeur de pénétration $d_{p1\%}$ et la diffusivité D_w sont calculées à partir des formules suivantes, définies par (Rode 2005) :

$$d_{p1\%} = 4,61 \sqrt{\left(\frac{D_w \cdot t_p}{\delta_p}\right)} \quad \text{et} \quad D_w = \frac{(\delta_p \cdot P_{vs})}{(\rho_0 \cdot \left(\frac{dw}{d\phi}\right))} \quad (7)$$

avec $d_{p1\%}$ en m, D_w la diffusivité de l'humidité en m^2/s , t_p la période en s, ρ_0 la densité en kg/m^3 , δ_p la perméabilité en $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$, P_{vs} la pression de vapeur saturante en Pa et $dw/d\phi$ la dérivée de l'isotherme de sorption ou capacité hydrique en $(kg \cdot kg^{-1} \cdot \%HR^{-1})$

L'effusivité hydrique b_m en $kg \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-0.5}$ est définie comme suit et permet d'obtenir le $MBV_{idéal}$:

$$b_m = \sqrt{\frac{dw}{d\phi} \cdot \rho_0 \cdot \delta_p}{P_{vs}} \quad (8)$$

$$MBV_{idéal} = 0.00568 \cdot b_m \cdot P_s \cdot \sqrt{t_p} \quad (9)$$

Une classification des matériaux a été proposée (Figure 25), à la suite du Round Robin test réalisé sur une variété de matériaux de construction lors du projet Nordtest.

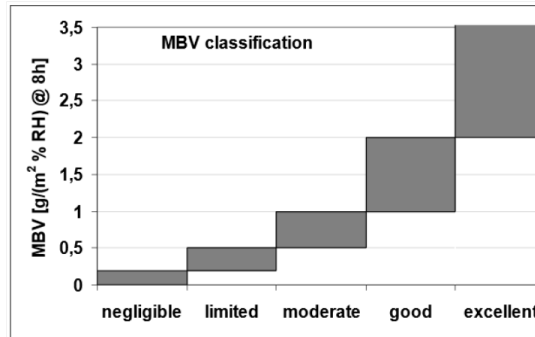


Figure 25: Classification du MBV (source: projet NordTest)

b) Résultats

Les valeurs théoriques et expérimentales sont réunies dans les tableaux suivants. Les teneurs en eau adsorbées et désorbées présentées Figure 26 proviennent des valeurs relevées entre les 5^{ème} et 7^{ème} cycles du test après un préconditionnement à 50% HR.

	μ	$\frac{dw}{d\phi}$ ($kg/(kg \cdot \%HR)$)	$D_w(m^2/s)$	$b_m(kg \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-0.5})$	$d_{p1\%}(cm)$	$MBV_{idéal}$ ($g \cdot m^{-2} \cdot \%HR^{-1}$)
CC1	7	0.0529	$3.31 \cdot 10^{-9}$	$5.73 \cdot 10^{-7}$	2.94	2.24
CC2	6	0.0361	$3.69 \cdot 10^{-9}$	$5.13 \cdot 10^{-7}$	3.34	2.00

Tableau 6: Valeurs théoriques du tampon hygrique

Pour le calcul de $dw/d\phi$, nous prenons une moyenne entre la courbe d'adsorption et de désorption.

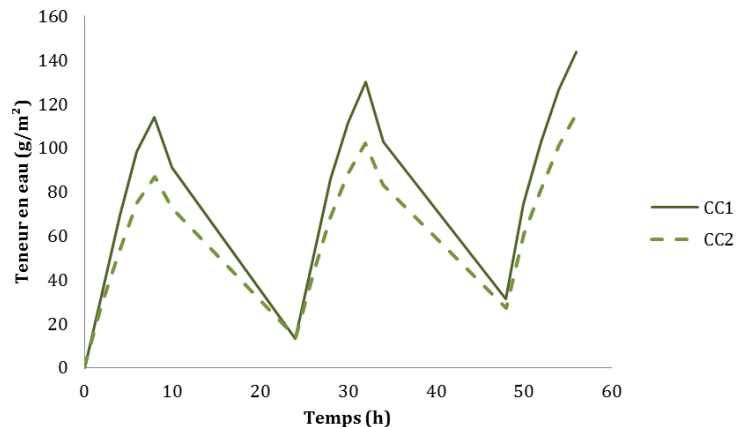


Figure 26: Humidité adsorbée et désorbée au cours des 5^{ième} à 7^{ième} cycles de charge (75% HR) et de décharge (33% HR)

	Épaisseur (cm)	MBV (g/(m ² %RH))		
		Adsorption	Désorption	Moyenne
CC2	8	2,00	1,70	1,85
	5	1,97	1,62	1,79
CC1	8	2,47	2,17	2,32
	5	2,58	2,21	2,40

Tableau 7 : Valeurs expérimentales de capacité de tampon hygrique

Dans notre cas, l'essai a été réalisé sur deux épaisseurs d'échantillon de 5 cm et 8 cm. L'obtention de résultats similaires dans les deux cas montre que l'épaisseur de pénétration de vapeur est inférieure à 5cm, en accord avec la valeur théorique.

La brique n'a pas été testée lors du test de MBV. Néanmoins la faible capacité hydrique de ce matériau dans la tranche d'humidité 33%/75%, laisse prévoir une faible capacité de tampon hygrique. Le $MBV_{\text{expérimental}}$ de la brique testée lors du NordTest variant entre 0.35 et 0.69 (Rode 2005) confirme cette hypothèse. L'ajout d'une couche de chaux-chanvre sur la brique côté intérieur permet alors de réguler les variations d'humidité relative. La formulation CC1 présente un meilleur MBV (classement Excellent), la chènevotte étant propice au stockage hygrique. (Dubois, Evrard, and Lebeau 2014) soulignent qu'il existe généralement un écart entre le $MBV_{\text{théorique}}$ et le $MBV_{\text{expérimental}}$ dû à la nature dynamique du protocole expérimental et aux résistances de surface, or ici, les valeurs semblent concorder.

Les cycles de charge et décharge illustrés Figure 26 montrent que le mélange CC1 se distingue principalement de l'autre mélange pour les hautes humidités relatives.

Le lien entre les résultats du MBV à l'échelle du matériau et la capacité à réguler l'humidité à l'échelle de la pièce est encore largement investigué. Cependant, les résultats du MBV présentent une façon efficace de comparer entre eux différents matériaux. Le matériau chaux-chanvre lorsqu'il est appliqué, peut être laissé à l'état brut ou, recouvert d'une fine couche d'enduit. L'influence de cette couche de finition a été étudiée par (Latif et al. 2015) et celle-ci doit être suffisamment perméable pour ne pas annihiler l'effet de tampon hygrique du chaux-chanvre.

2.5. Conclusion

La structure du système poral des matériaux de construction détermine une majeure partie de leurs propriétés hygrothermiques. De nombreux auteurs, en simplifiant la structure porale à un ensemble de capillaires cylindriques, ont relié le diamètre des pores à certaines propriétés hygrothermiques. Néanmoins, face à la complexité d'une caractérisation précise de la distribution porale et à la diversité de géométrie des pores, il est préférable de réaliser un minimum de tests pour obtenir les caractéristiques hygrothermiques des différents matériaux.

D'une manière générale, les résultats montrent que les propriétés hygrothermiques mesurées sont dépendantes de l'état hygrothermique des matériaux. Les mélanges chaux-chanvre sont considérés comme des matériaux hygrothermiques et tous les matériaux testés sont capillaires.

L'ensemble des grandeurs déterminées dans cette partie permet d'enrichir les bases de données quant aux caractéristiques physiques des matériaux, de mieux comprendre les phénomènes de transfert et de stockage observés au cours de l'instrumentation in-situ. Ces données seront également utilisées comme données d'entrées du modèle de transferts couplés utilisé dans la suite de cette étude.

3. Instrumentation in-situ

Afin d'étudier le comportement hygrothermique du bâti ancien du centre de Cahors, nous avons choisi d'installer une instrumentation in-situ au sein de deux appartements. Le choix du matériel (description, étalonnage des sondes hygrothermiques) ainsi que les résultats à l'échelle de la paroi et du bâtiment sont présentés dans cette partie.

3.1. Cas d'étude

Les deux appartements que nous étudions appartiennent à l'îlot Chico Mendès situé dans le cœur historique de Cahors au niveau de la rue St Urcisse (Figure 27). Cet îlot, alors à l'abandon, a été racheté par la mairie de Cahors et fait aujourd'hui l'objet d'une Commission Publique d'Aménagement afin d'être rénové puis revendu. L'objectif est de créer principalement des logements familiaux en accession à la propriété.

Nous avons arrêté notre choix sur ces bâtiments car leurs typologies constructives et leurs emplacements au milieu d'un îlot urbain dense sont représentatifs du bâti urbain cadurcien.



Figure 27 : Intégration urbaine de l'îlot Chico Mendès et des deux bâtiments étudiés situés rue St Urcisse

Différents éléments architecturaux et les cadastres existants ont permis de dater les bâtiments au 13^{ème} siècle.

Cependant, il est vraisemblable que la façade extérieure du bâtiment situé au 44 rue Ste Urcisse ait été démonté et remonté au 19^{ème} siècle avec des matériaux tout venant provenant certainement de la façade antérieure et d'autres matériaux (briques et quelques pierres).

Les deux bâtiments appartiennent à deux typologies constructives différentes:

- la brique massive pour le 44 rue Ste Urcisse, avec des épaisseurs de mur de 40cm sur toute la hauteur du bâtiment ;
- le pan de bois pour le 50 rue Ste Urcisse. Le pan de bois n'est jamais présent en rez-de-chaussée, ici nous avons donc un mur épais de près d'un mètre surplombé par les étages de pan de bois, avec un remplissage de brique d'une épaisseur de 14cm.



Figure 28: îlot Chico Mendès

Au sein de ces bâtiments nous étudions deux appartements tels que représentés sur la Figure 29.

Le fait que ces appartements soient patrimoine de la mairie de Cahors et qu'ils soient vacants a permis d'étudier l'évolution des différents paramètres hygrothermiques en évolution libre ainsi que de simuler une occupation en appliquant une température de consigne et des dégagements d'humidité grâce à un humidificateur.



Figure 29: Coupe Est et élévation Ouest des bâtiments étudiés

3.2. Suivi à long terme

Un suivi du comportement hygrothermique des deux appartements a été réalisé de juillet 2015 à décembre 2017. Cela a permis un suivi des ambiances intérieures et extérieures, ainsi qu'une étude des parois extérieures.

Comme présenté Chapitre 1, les murs extérieurs ont été isolés par l'intérieur avec un mélange de chaux-chanvre appliqué en banchage en septembre 2016. Le séchage de la paroi s'est étalé jusqu'à l'été 2017, rendant peu exploitables les mesures d'hygrométrie réalisées au sein de la

paroi au cours de cette période. Les menuiseries du 50 rue St Urcisse ont été changées en mars 2017.

Les appartements étudiés étant vides durant la période de l'étude, une simulation d'occupation a été réalisée au cours de certaines périodes. Pour cela, des convecteurs électriques, dont la consommation horaire a été relevée grâce à des pinces ampèremétriques, ont été installés. Des cycles de charge d'humidité ont aussi été simulés grâce à des humidificateurs placés dans chacune des pièces.

La Figure 30 résume l'emplacement des différents capteurs dans les trois pièces étudiées. Les thermohygromètres, fluxmètres et thermocouples étaient reliés à une centrale d'acquisition Agilent, permettant de récupérer avec un pas de temps de 10min les variables thermiques et hygrothermiques mesurées.

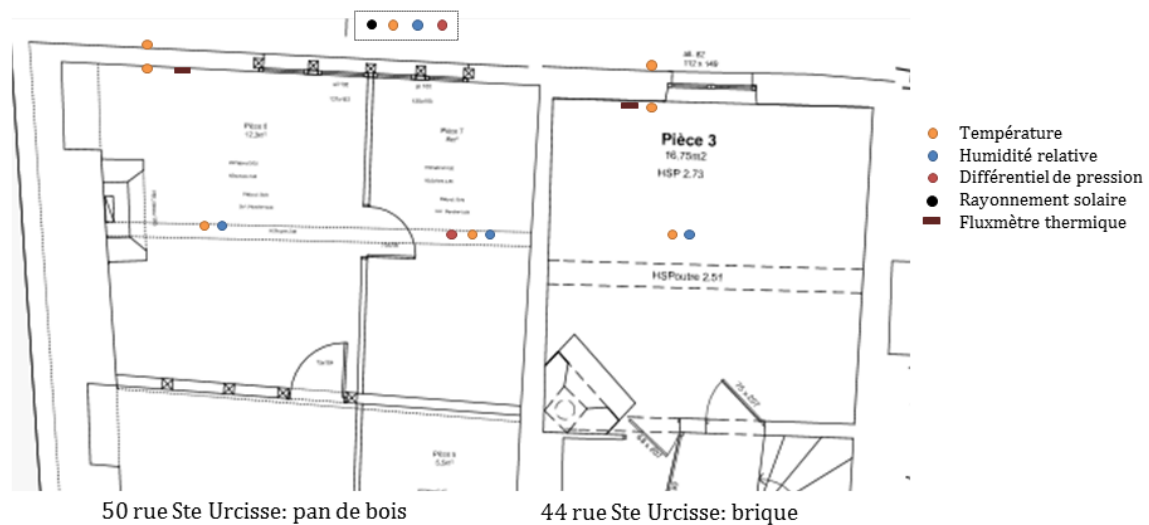


Figure 30 : Emplacement des capteurs des appartements de la rue Ste Urcisse

3.2.1. Monitoring des ambiances intérieures et extérieures

Les ambiances intérieures et extérieures (température d'air et humidité relative) ont été suivies à l'aide d'hygro-thermomètre Datalogger Kimo RH110 et RH210. En intérieur, chaque capteur a été placé au centre de la pièce, à 1.5 m du sol.

Le différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur a également été mesuré grâce à un capteur Kimo CP110, avec une prise de pression à l'intérieur et une autre à l'extérieur du bâtiment.

Afin d'obtenir la température opérative, les températures de surface ont été relevées par des thermocouples type K placés au contact de chacune des parois, sol et plafond.

3.2.2. Monitoring des parois

Le flux thermique au travers des parois a été mesuré à l'aide de fluxmètres Captec de 10*10cm², installés côté intérieur. Afin de s'affranchir des aspérités de la paroi, une graisse a été utilisée en faible quantité afin de maximiser le contact entre le mur et le fluxmètre pour éviter au maximum les résistances de contact.

Des thermocouples type K ont été placés en surface cotés intérieur et extérieur, ainsi qu'à l'interface entre l'isolant et le mur.

L'humidité relative en surface et au cœur de l'isolant chaux-chanvre a été obtenue grâce à des thermo-hygromètres Honeywell HIH4602-C.

Le flux solaire atteignant la paroi a été mesuré grâce à un pyranomètre Kimo CR110 installé perpendiculairement à la façade extérieure (Figure 31).



Figure 31: Pyranomètre (gauche) et centrale d'acquisition Agilent (droite)

Le tableau suivant relève la précision et les plages de mesures des capteurs installés.

Grandeur mesurée	Type de capteur	Plage de mesure	Précision
Température de surface	Type K (Alumel-Chromel)	-100 à 1370°C	±0.7°C
Température et Humidité relative d'air	Thermo-hygromètre Kimo (KH210 et KH110)	-20 à 70°C	De -20 à 0 °C : ±0,6 °C De 0 à 30 °C : ±0,5 °C De 30 à 70 °C : 1,5 % de la valeur lue
		5 à 95%HR	±2 %HR (de 15°C à 25 °C) Dérive liée à la température : ±0.04 x (T-20) %HR (si T<15 °C ou T>25 °C)
Humidité relative dans la paroi	Thermo-hygromètre à polymère capacitif (Honeywell HIH4602-C)	0 à 100%	±3.5%HR
Flux thermique	Captec	Sensibilité : 188mV/(W.cm ²) et 71 mV/(W.cm ²)	
Différentiel de pression	Kimo CP111	-10 à 10Pa	±2Pa
Rayonnement solaire	Pyranomètre (Kimo CR110)	0-1500W/m ²	5%

Tableau 8 : Caractéristiques des capteurs installés

Les données du tableau précédent sont des données « constructeurs ». Il est cependant à noter que les thermocouples et les thermo-hygromètres reliés à la centrale d'acquisition ont été calibrés en laboratoire. Cette étape a été nécessaire, car la valeur mesurée dépend du branchement sur la carte, de la longueur du câble, ainsi que pour les thermo-hygromètres de la tension générée par l'alimentation nécessaire à leur fonctionnement. Les thermocouples, soudés au laboratoire, ont été placés dans un bain thermostaté et également laissés en évolution libre et comparés à une sonde platine étalonée. Les thermo-hygromètres Honeywell ont été calibrés à l'aide de solutions salines.

3.2.3. Prise en main à distance

Afin de faciliter la logistique générée par la distance de cette instrumentation in-situ, notre choix s'est porté sur des dataloggers, avec un mois et demi d'autonomie pour un pas de temps de 10min. La connexion de la centrale d'acquisition et du chauffage à un ordinateur, permet une prise en main à distance grâce à la connexion internet, facilitant le suivi de cette instrumentation.

3.3. Résultats

3.3.1. Etude des transferts dans la paroi

Le coefficient de transmission thermique est obtenu grâce aux mesures fluxmétriques, selon la norme (ISO 9869-1 2014), pendant les mois de chauffe du bâtiment.

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{in,i}}{\sum_{i=1}^n (T_{in,i} - T_{ext,i})} \quad (10)$$

Avec U la transmittance thermique ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), Q le flux thermique (W/m^2) et T_{in} , T_{ext} les températures de surface intérieure et extérieure (K)

Une étude par caméra thermique est préconisée en amont afin de situer les hétérogénéités de la paroi, souvent présente dans les maçonneries anciennes. La norme se base sur la méthode de la moyenne qui stipule qu'après un certain temps, il est possible de considérer le régime comme stationnaire, les effets de la masse thermique devenant alors négligeables. Cette hypothèse n'est valide que si les variations de chaleur stockée dans le mur sont négligeables par rapport à la chaleur traversant la paroi. Lors de mesures en conditions in-situ, les conditions aux limites (température, vent, radiation solaire) changent en permanence. Il est donc conseillé de travailler en contact direct avec la surface et non avec les températures d'air pour essayer de s'affranchir des résistances de surface (Baker 2011).

La norme préconise un minimum de trois jours de mesures, mais (Baker 2011) conseille pour les parois épaisses d'étendre cette durée à 15 jours pour obtenir des résultats plus stables et un différentiel d'au moins $10^{\circ}C$ entre les ambiances intérieure et extérieure. La paroi nord est préférée afin d'éviter les effets du rayonnement solaire, mais cette contrainte n'est pas toujours permise selon la configuration du bâtiment. Dans notre cas, la paroi Nord est mitoyenne, nous avons donc instrumenté la façade Ouest.

a) Avant rénovation

Le flux thermique et les températures de surface sont relevés pendant dix jours en décembre 2015 pour les deux typologies constructives et permettent l'obtention du coefficient de transmission thermique (Figure 32).

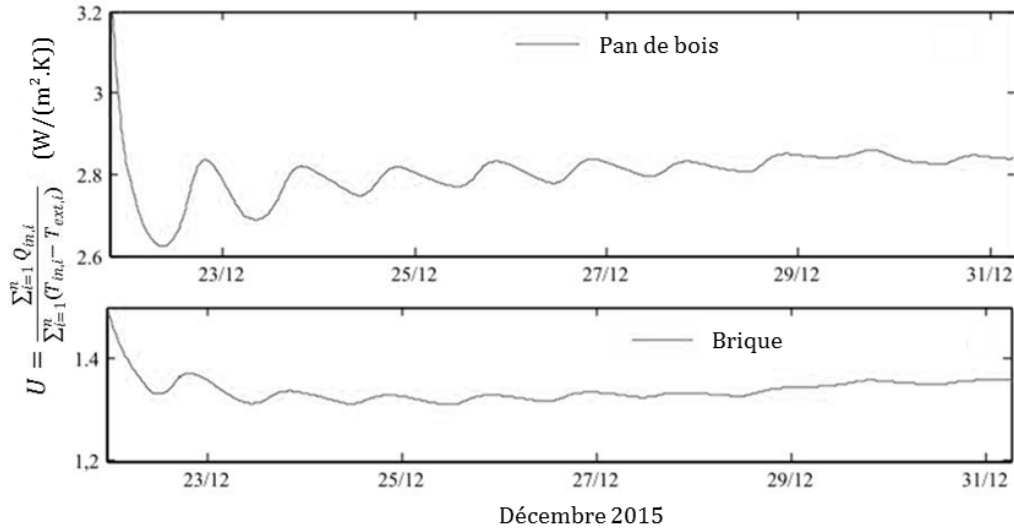


Figure 32: Coefficient de transmission thermique avant rénovation d'après ISO 9869-1

La valeur de coefficient de transmission thermique de la paroi brique varie entre 1.3 et 1.5 $W.m^{-2}.K^{-1}$ en tendant vers 1.35 $W.m^{-2}.K^{-1}$. De plus fortes variations sont observées pour la paroi en pan de bois, car moins épaisse que la paroi brique et donc plus sujette à l'impact du rayonnement solaire direct. La valeur finale se stabilise à 2.85 $W.m^{-2}.K^{-1}$.

Les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs calculées en utilisant une méthode stationnaire. Pour la façade en pan de bois, un enduit minéral de 2 cm est ajouté pour le calcul et un enduit de 1 cm de plâtre pour la façade en brique. Les résultats obtenus évoluent entre 1.20 et 1.74 $W/(m^2.K)$ (pour respectivement la conductivité thermique obtenue pour les briques du 16^{ième} et du 18^{ième} siècle) pour la paroi brique et entre 3.13 et 4.36 $W/m^2.K^{-1}$ pour la paroi pan de bois. Les valeurs mesurées diffèrent légèrement des valeurs calculées.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées :

- les maçonneries anciennes présentent souvent des défauts de planéités générant une résistance de contact entre le mur et le fluxmètre et ce, malgré l'application de la graisse thermique. La façade en pan de bois était par exemple particulièrement rugueuse ;
- la méthode ISO 9869-1 est définie pour l'étude d'un flux thermique unidirectionnel, ce qui, dans notre cas, n'est pas respecté de par l'influence du rayonnement solaire dû à l'exposition ouest de la paroi ;
- les parois étudiées sont très hétérogènes et de plus, les briques caractérisées en laboratoire ne représentent pas forcément celles présentes au sein du mur in-situ.

b) Après rénovation

Après rénovation, des mesures du flux thermique à travers les parois sont à nouveau réalisées (Figure 33).

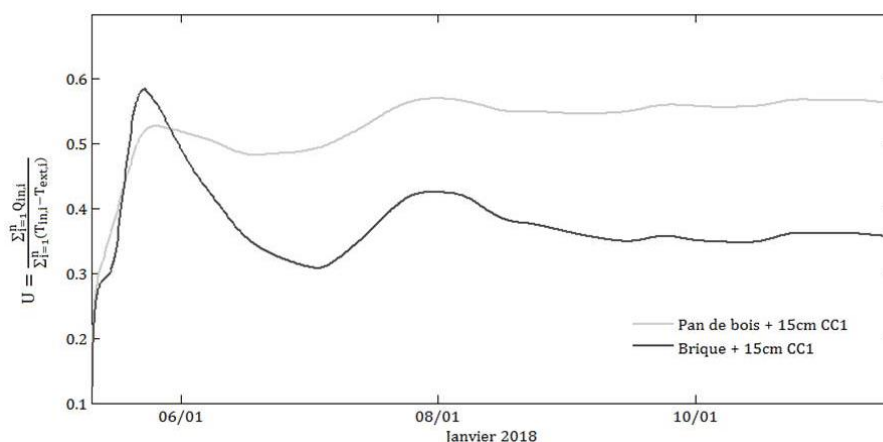


Figure 33: Coefficient de transmission thermique après rénovation d'après ISO 9869-1

On observe qu'à l'inverse des mesures réalisées avant rénovation, les variations du coefficient de transmission thermique sont plus importantes pour la typologie brique que pour la typologie pan de bois. Après isolation des parois, la température de surface intérieure dépend principalement de la température de l'air. Le bâtiment en brique étant encore très perméable car n'ayant pas bénéficié d'un changement de menuiseries, les infiltrations d'air restent importantes et entraînent de plus fortes variations de température de surface intérieure, contrairement au bâtiment en pan de bois.

Le coefficient de transmission thermique tend vers $0.36 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ pour la brique et $0.57 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ pour le pan de bois.

Le Tableau 9 résume les valeurs mesurées et calculées avant et après rénovation.

	Brique avant rénovation	Brique après rénovation	Pan de bois avant rénovation	Pan de bois après rénovation
$U_{\text{Mesuré}} \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}\text{)}$	1.35	0.36	2.85	0.57
$U_{\text{Calculé}} \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}\text{)}$ avec $\lambda_{16e}=0.49 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_{18e}=0.715 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	1.20 ± 0.07 et 1.74 ± 0.07	0.43 ± 0.04 et 0.48 ± 0.05	3.13 ± 0.09 et 4.36 ± 0.1	0.55 ± 0.07 et 0.57 ± 0.07

Tableau 9 : Coefficients de transmission thermique mesurés et calculés

Pour les deux parois, l'ajout d'un isolant a diminué les déperditions thermiques. Le changement est particulièrement notable pour la paroi en pan de bois qui était initialement très déperditif, le coefficient de transmission thermique ayant été divisé par 5. Pour le mur en brique, celui-ci a été divisé par 3.75.

3.3.2. Réponse dynamique de la paroi

Plusieurs auteurs rapportent que l'inertie thermique est un paramètre essentiel du confort thermique et participe à la réduction des charges de chauffage et de refroidissement (Feng, 2004) et (Balaras 1996). Cependant, en modifiant les transferts thermiques au sein de la paroi, l'isolation thermique affecte l'inertie du bâti et celle de la paroi. (AECOM 2012) conclut que l'isolation par l'intérieur peut favoriser la surchauffe estivale, dans le cas de charges thermiques

internes durant la journée (occupant, rayonnement solaire entrant ou infiltration d'air chaud), l'air chaud restant alors confiné à l'intérieur.

Au vu des conditions climatiques estivales de Cahors, ce paramètre doit être soigneusement étudié pour éviter l'installation de l'air conditionné contraire aux objectifs de réduction de consommation énergétique.

L'inertie thermique correspond à la réponse dynamique de la paroi ou de l'enveloppe à une sollicitation climatique. L'inertie va donc déphaser et amortir, c'est-à-dire qu'elle va retarder et réduire l'amplitude des variations de température.

Certains auteurs (Maalouf et al. 2014; Munaretto 2014) marquent une distinction entre l'inertie de transmission et l'inertie d'absorption. Quand on s'intéresse aux sollicitations provenant de l'extérieur vers l'intérieur (variation journalière de la température extérieure, flux solaire), on parle de transmission, le paramètre important étant alors la diffusivité des matériaux. Plus la diffusivité thermique sera faible, plus le déphasage ainsi que l'amortissement seront importants. Lorsque la sollicitation vient de l'intérieur, telle que des cycles de chauffe en hiver, ou les rayonnements solaires réchauffant la température de l'air intérieur, l'inertie d'absorption consiste en la capacité de l'enveloppe à stocker cette énergie, puis à la redistribuer plus tard par radiation. Cette inertie est caractérisée par l'effusivité thermique, soit la capacité d'un matériau à absorber puis restituer l'énergie. Plus l'effusivité sera élevée, plus le matériau sera capable de stocker et de restituer de l'énergie thermique.

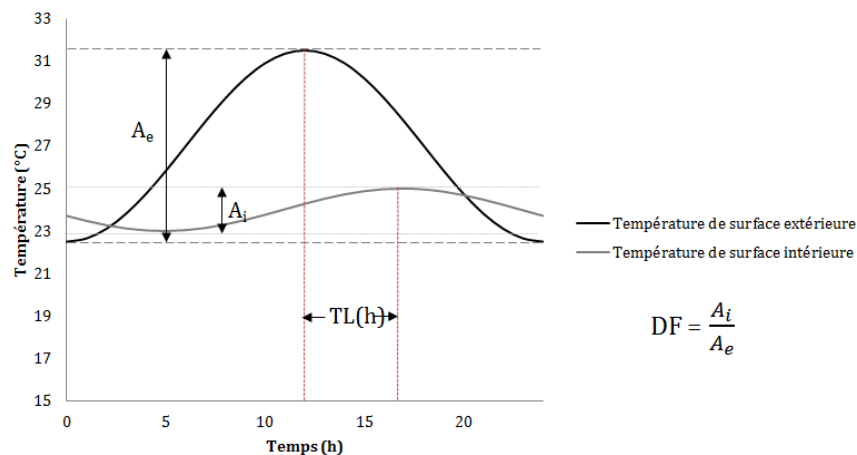


Figure 34: Phénomènes de déphasage (TL) et amortissement (DF)

De façon simplifiée, l'inertie de transmission est fréquemment décrite selon deux paramètres (voir Figure 34) : le déphasage qui décrit le temps nécessaire à l'onde de chaleur pour se propager à travers le mur et l'amortissement, défini comme le ratio entre l'amplitude des variations extérieures et intérieures.

En réalité, l'inertie thermique n'est donc pas simplement liée aux phénomènes conductifs mais aussi aux transferts de chaleurs superficiels (Li & Xu, 2006). Cela explique que l'évaluation de l'inertie, de façon expérimentale, ne se traduit pas par une valeur constante. En effet, celle-ci est directement liée à l'évolution des conditions aux limites de part et d'autre de la paroi. La forme non sinusoïdale des sollicitations, l'augmentation ou la baisse de la température moyenne extérieure, la dynamique de la réponse de la température de l'air intérieur ou encore la couverture nuageuse modifiant le rayonnement de la voute céleste sont autant de paramètres

faisant varier la réponse dynamique de la paroi. On notera également une différence entre le déphasage jour et le déphasage nuit (Sun et al. 2013).

Afin de pouvoir comparer nos résultats, nous choisissons d'étudier la réponse de la paroi après une suite de trois journées d'été relativement identiques, avec une température moyenne extérieure stable et des amplitudes de température similaires. Soit la période du 24/08/17 au 26/08/17 (ou alors 2/08 pour brique) pour l'étude post-rénovation et du 23/08/16 au 25/08/16 pour l'étude pré-rénovation.

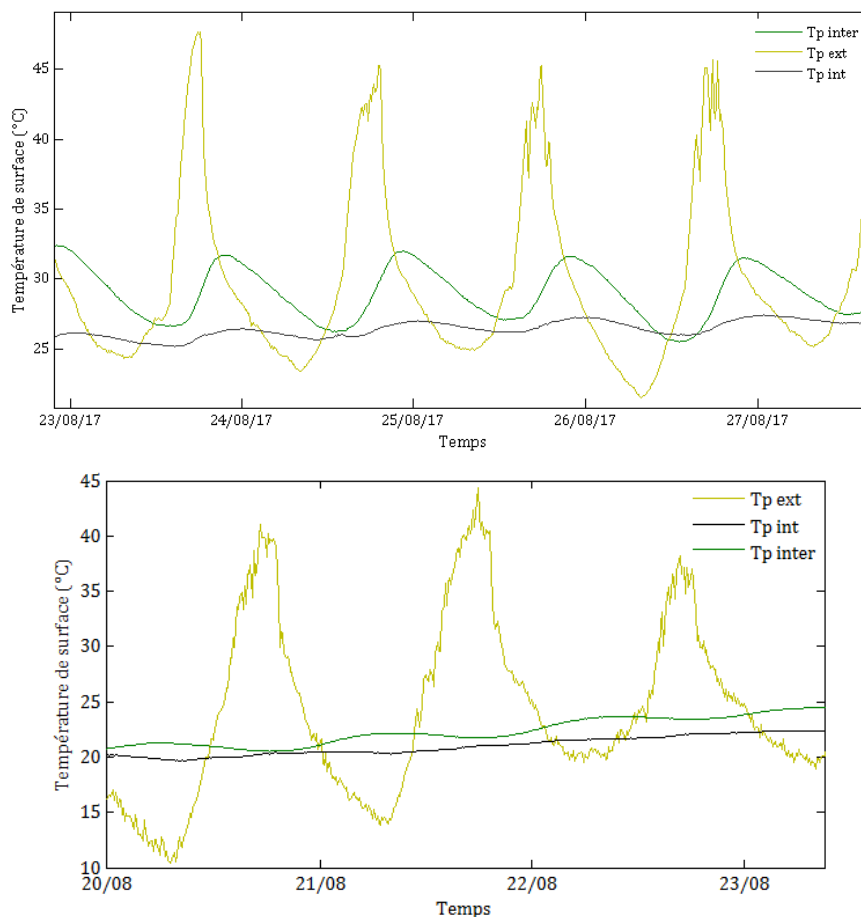


Figure 35: Evolution des températures de surface pour la paroi pan de bois (haut) et brique (bas) (Août 2017)

Sur la courbe de température de surface intérieure (Figure 35), certains jours, deux maxima de température sont à présent observables : le premier pic quelques minutes après le maximum d'ensoleillement extérieur correspond à la réponse quasi immédiate de la surface de la paroi à la température de l'air, due à sa faible effusivité et le deuxième pic, comme le résultat du flux de chaleur par conduction à travers la paroi. Comme souligné par Latif, la faible effusivité du matériau chaux-chanvre entraîne une réponse très rapide de la température de surface de la paroi.

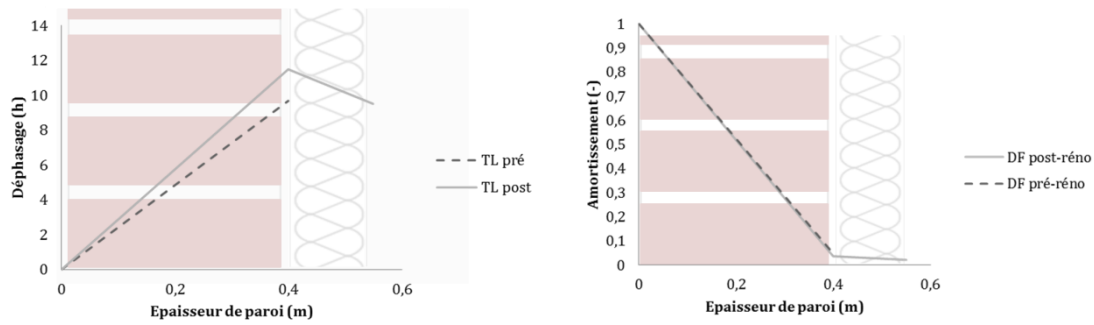


Figure 36: Déphasage (TL) et amortissement (DF) mesurés pour la paroi brique avant et après isolation

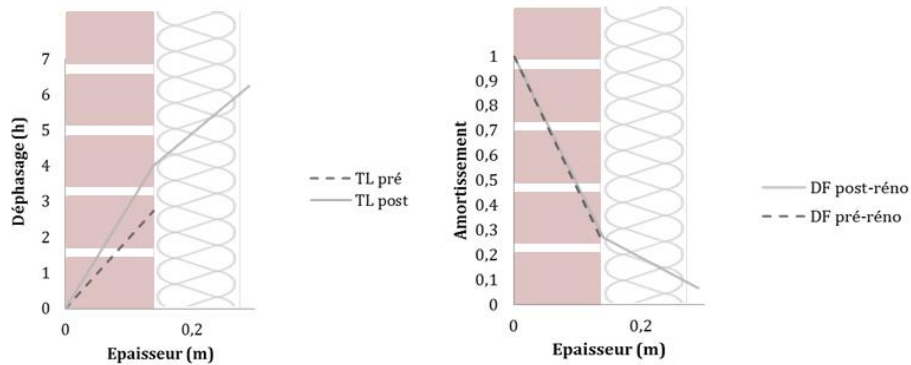


Figure 37: Déphasage et amortissement mesurés pour la paroi pan de bois avant et après isolation

	Brique		Pan de bois	
	Pré-rénovation	Post-rénovation	Pré-rénovation	Post-rénovation
TL_{mur} (h)	9.6 ± 3.08	9.55 ± 2.86	2.74 ± 1.09	6.23 ± 1.31
DF_{mur}	$0,0473 \pm 0.0006$	0.0210 ± 0.0005	0.2910 ± 0.0005	0.068 ± 0.0007
$TL_{pièce}$ (h)	1.32 ± 0.54	0.96 ± 0.4	0.27 ± 0.1	0.6 ± 0.2
$DL_{pièce}$	0.0483 ± 0.005	0.0610 ± 0.002	0.0963 ± 0.001	0.1010 ± 0.0009

Tableau 10: Evolution des amortissements (DF) et des déphasages (TL) des pièces et des parois

A l'échelle de la pièce, on constate que le déphasage ainsi que l'amortissement n'ont presque pas été modifiés (Tableau 10).

Alors que l'inertie de la paroi est importante, celle de la pièce, que ce soit dans le bâti brique ou pan, oscille autour d'une heure. Cela confirme que la paroi extérieure d'un bâtiment bien que mitoyen ne dicte qu'en partie le comportement thermique de l'air intérieur. De plus, la forte perméabilité à l'air des bâtiments anciens influence également la température de l'air intérieur.

3.3.3. Etude du confort thermique dans le bâti ancien

Le bâti ancien se distingue des autres types de bâtiment par son bon confort d'été, qu'il convient de préserver lors d'un projet de rénovation (Heberlé 2016).

Il existe différentes normes pour étudier les conditions de confort thermique en période estivale. Pour les bâtiments en ventilation naturelle, (De Dear and Brager 1998) conseillent de travailler uniquement avec des normes de confort adaptatif, permettant une étude plus fine et correspondant mieux au ressenti des occupants. Cette approche se fonde sur l'idée que l'acceptation des conditions de confort n'est pas une constante mais évolue : plus il fait chaud dehors, plus l'occupant peut accepter des températures intérieures élevées.

Le confort intérieur pendant les étés 2015 et 2017, respectivement pré et post rénovation, est étudié selon la norme ASHRAE 55 (Figure 38). Les mesures ont été réalisées dans des conditions similaires (sans occupant, volets fermés) et les deux périodes estivales étudiées connaissent quasiment le même nombre de journée de fortes chaleurs.

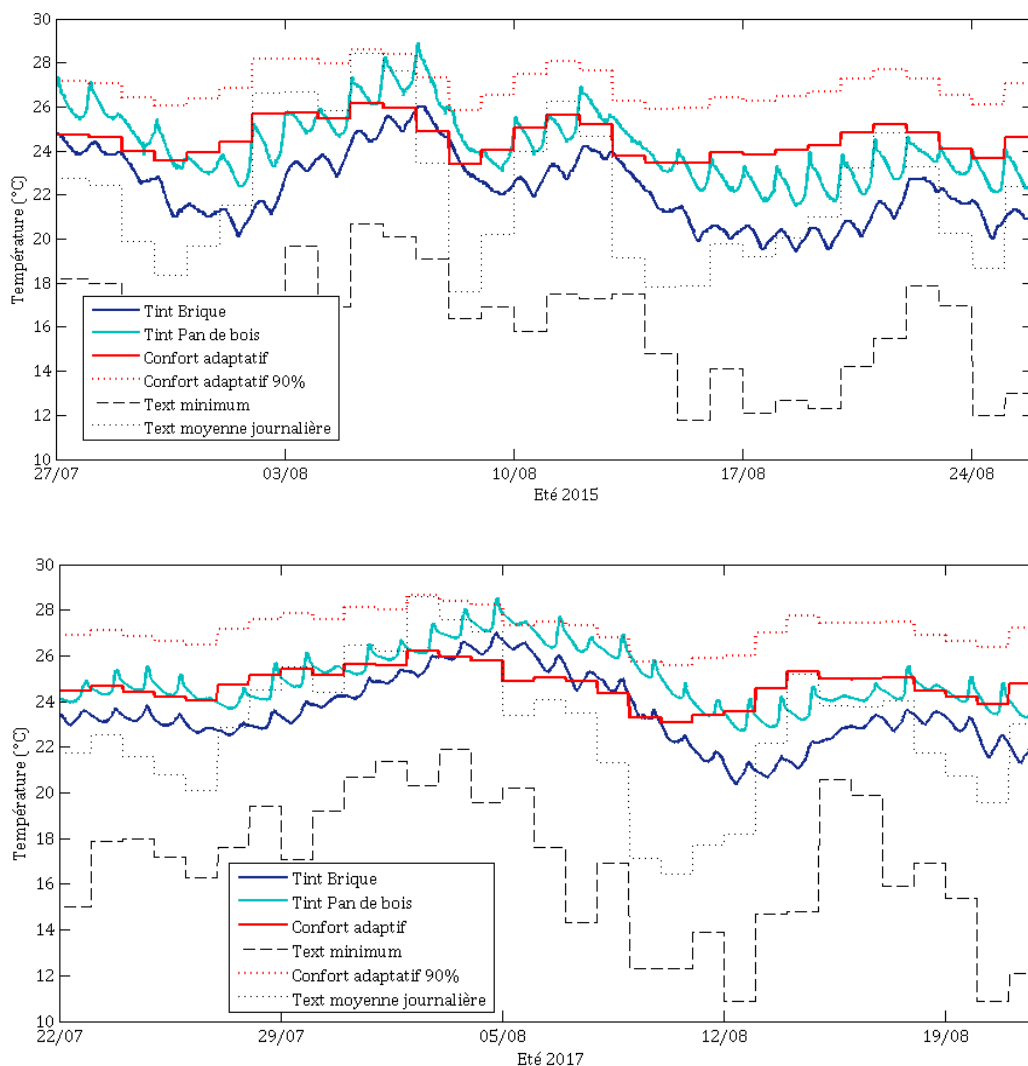


Figure 38: Comparaison du confort d'été avant (2015) et après rénovation (2017)

La norme ASHRAE 55 propose le calcul d'un critère de confort évoluant avec la température effective journalière extérieure et un intervalle plus large, où 90% des occupants sont satisfaits par les critères de confort. Le Tableau 11 présente le nombre d'heures d'inconfort avant et après rénovation selon deux niveaux de satisfaction.

		Pan de bois	Brique
Avant rénovation	100% satisfaits	266h d'inconfort (soit 35% du temps total)	31h (soit 4%)
	90% satisfaits	14.5h (soit 1.9%)	0h
Après rénovation	100% satisfaits	433h (soit 58%)	145h (soit 19%)
	90% satisfaits	31h (soit 4%)	0h

Tableau 11 : Nombre d'heures d'inconfort (et % du temps total) sur un mois d'été avant et après rénovation

Que ce soit avant ou après rénovation, le bâti en brique présente moins d'heures d'inconfort. Le bâti ancien à forte inertie est connu pour son confort d'été.

Dans les deux bâtis, on observe que le nombre d'heures d'inconfort augmentent après rénovation. Une étude des étés 2015 et 2017 présentée Figure 38 apporte des indications sur l'évolution des températures d'air intérieur avant et après rénovation. La température intérieure ne chute plus aussi rapidement lorsque les températures extérieures moyennes diminuent. Cette modification peut être interprétée comme un effet direct de l'isolation, la chaleur emmagasinée à l'intérieur restant piégée. (Maalouf et al. 2014) soulignent que la faible effusivité du matériau chaux-chanvre peut induire un risque de surchauffe estival en réduisant l'inertie d'absorption. (Heberlé 2016) souligne qu'habituellement la rénovation du bâti ancien améliore le confort d'été, mais cette amélioration provient principalement de l'étanchéisation du bâti. En effet, la température extérieure en été est habituellement plus élevée qu'à l'intérieur, tout défaut d'étanchéité introduira de la chaleur dans le bâtiment, ce qui favorisera des surchauffes. Dans notre étude, le changement de menuiseries rendant le bâti plus étanche n'a été réalisé que pour le bâtiment en pan de bois et seulement dans les pièces instrumentées.

Ces résultats permettent d'évaluer le comportement des bâtiments en évolution libre. Ils sont néanmoins à nuancer car, lors de l'utilisation du bâtiment, l'occupant influence fortement les températures intérieures (ventilation, apports internes). Celui-ci possède en effet la capacité de modifier son comportement en fonction du niveau de confort. Les températures intérieures élevées peuvent être modérées par une ventilation naturelle nocturne. La ventilation permet d'éviter le confinement et s'avère être un moyen beaucoup plus efficace pour évacuer les apports internes et solaires que les déperditions thermiques par les parois opaques et vitrées. Le relevé des températures extérieures montre d'ailleurs que celles-ci chutent toujours en dessous des températures intérieures, permettant un rafraîchissement nocturne. Si les plus faibles valeurs d'inconfort du bâti en brique confirment que les bâtiments à parois massives à forte inertie sont intéressants pour le confort estival (Dunster 2004), (C.Diaz, 1994) souligne que les bâtis à faible inertie vont pouvoir répondre plus rapidement aux baisses de température et donc à la ventilation nocturne.

Si cette étude semble montrer que l'ajout d'isolants bio-sourcés diminue légèrement le confort d'été, elle n'apporte pas de réponse quant à l'influence sur le confort d'été d'une rénovation

complète avec une réelle amélioration de l'étanchéité du bâti et une isolation de l'ensemble de l'appartement. De plus, il n'est pas possible de savoir si le confort d'été dans un bâtiment ancien rénové est plus détérioré avec des matériaux isolants bio-sourcés qu'avec des matériaux isolants conventionnels, de même que, contrairement à des simulations, il n'est pas possible lors de mesures d'avoir deux étés identiques. Enfin, en prenant la limite des 90% d'occupants satisfaits, on constate que les heures d'inconfort sont en réalité peu nombreuses pour le bâti en pan de bois et inexistantes pour le bâti en brique.

La sensation de confort est en réalité plus complexe que la simple température de l'air intérieure ou la température opérative. La comparaison des étés 2015 et 2017 met également en avant la diminution des variations journalières après rénovation, ce qui peut être considéré comme une amélioration du confort. Le confort d'été dépend également de l'humidité relative intérieure, parfois jugée inconfortable car trop élevée ou trop faible. Dans ce cas, les matériaux isolants bio-sourcés présentent un avantage grâce à leur capacité à agir comme un tampon hydrique. Le matériau chaux-chanvre utilisé est classé « Excellent » d'après le test du Moisture Buffer.

3.3.4. Etanchéité du bâti

Le bâti ancien est connu pour être très perméable à l'air. En améliorant l'enveloppe extérieure du bâti (parois opaques et parois vitrées), les travaux de rénovation énergétique entraînent fréquemment une étanchéisation à l'air notable. Celle-ci permet de diminuer les déperditions thermiques dues aux infiltrations mais peut également entraîner une détérioration de la qualité de l'air intérieur en cas de sur-étanchéisation du bâti. Sans la mise en place d'une ventilation, l'air intérieur n'est alors plus suffisamment renouvelé pour garantir une bonne qualité de l'air.

Afin d'évaluer ce paramètre, des tests de porte soufflante ont été réalisés avant et après isolation des murs. Les résultats de ces tests permettent d'obtenir le taux de renouvellement d'air (n_{50}) et la perméabilité à l'air (q_{50}) sous une dépression ou surpression de 50Pa. Néanmoins, dans notre cas, les valeurs obtenues ne peuvent être comparées aux valeurs standards q_{50} et n_{50} habituellement délivrées après ces tests car la porte a été installée de façon à ne tester qu'une seule pièce, au vu de l'importante perméabilité du bâti, et non l'ensemble du bâtiment. Le volume pris en compte n'est alors pas uniquement composé de l'enveloppe extérieure. Les résultats pré et post isolation sont néanmoins comparables entre eux. On observe que l'isolation des parois n'a modifié que très légèrement l'étanchéité de la pièce, avec un changement de n_{50} de 18.4 à 17,8 vol/h pour le bâtiment en brique, les tests post rénovation ayant été effectués après l'isolation mais avant le changement de menuiseries.

A titre de comparaison, (Kalamees 2007) donne pour des bâtiments en ventilation naturelle une moyenne de $n_{50} = 11.5$ vol/h.

Le capteur de différence de pression permet également d'appréhender ce phénomène de perméabilité à l'air du bâti. Plus celui-ci sera perméable, plus faible sera le différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur. La figure ci-après présente l'évolution avant et après le changement de menuiserie et l'isolation des parois.

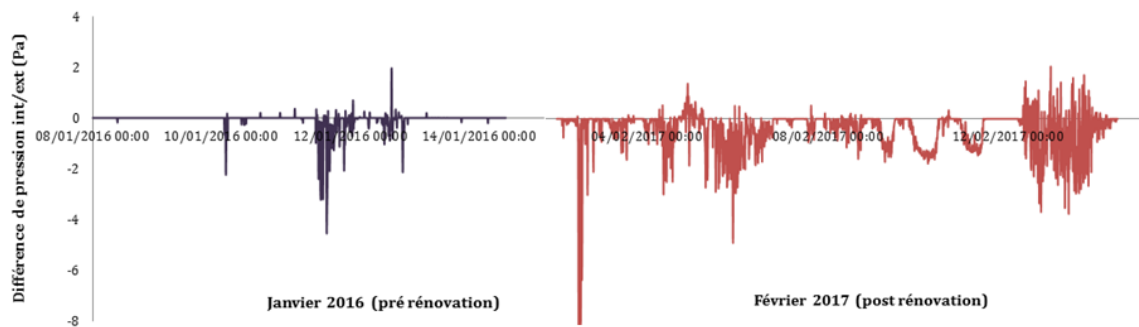


Figure 39: Différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur avant et après rénovation

Même en période de chauffe, la différence de pression est principalement due à des sollicitations dynamiques correspondant au profil de vent. La différence de pression est accentuée suite au changement de menuiseries traduisant une augmentation de l'étanchéité, mais le bâti reste néanmoins très perméable. Cette observation nous amène à négliger par la suite le transfert de vapeur par advection, les pressions variant peu.

3.3.5. Conclusion

Une étude avant et après rénovation a été menée sur deux bâtiments possédant des typologies constructives représentatives du centre ancien cadurcien (brique massive et pan de bois). L'étude à l'échelle de la paroi a mis en avant une amélioration du coefficient de transmission thermique après la mise en place d'une isolation de 15 cm de chaux-chanvre banché. Cet ajout modifie également l'inertie de transmission de la paroi, en augmentant le déphasage et l'amortissement.

A l'échelle du bâtiment, les relevés des ambiances intérieures ont mis en avant un bon confort d'été thermique pour les deux bâtiments avant rénovation. Le matériau chaux-chanvre possède une effusivité faible, qui entraîne une légère augmentation du nombre de jours d'inconfort calculé selon la norme ASHRAE 55. Néanmoins, il faut noter que l'absence d'occupants ne permet pas d'observer l'influence d'une sur-ventilation nocturne pour améliorer le confort d'été. De plus, le changement des menuiseries n'ayant pas pu être réalisé pour les deux bâtiments, la forte perméabilité du bâti dessert le confort d'été de par l'infiltration d'air chaud en provenance de l'extérieur restant plus facilement confiné à l'intérieur suite à l'isolation des parois.

4. Conclusion du chapitre

Cette étude multi-échelles a permis une démarche progressive, en partant de la caractérisation des matériaux à l'étude plus complexe de la paroi et du bâti en climat réel. Certaines spécificités du bâti ancien cadurcien et des matériaux bio-sourcés, telles que la forte capillarité des briques foraines ou la forte hygroscopicité des mélanges chaux-chanvre doivent être pris en compte pour identifier des stratégies de rénovation adaptées. Au-delà d'une meilleure compréhension de la physique du bâti ancien, cette démarche expérimentale est essentielle pour la validation de solutions d'isolation à l'aide de simulation de transferts hygrothermiques. En effet, une caractérisation physique des matériaux de qualité est garante de la fiabilité d'alimentation des modèles hygrothermiques et les mesures réalisées permettront de valider les simulations hygrothermiques réalisées. Celles-ci seront présentées dans les Chapitres 5 et 6.

5. Références

- AECOM. 2012. *Investigation into Overheating in Homes. Literature Review.*
- Amziane, Sofiane, Laurent Arnaud, and Noël Challamel. 2013. *Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes.*
- Amziane, Sofiane and Florence Collet. 2017. *Bio-Aggregates Based Building Materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM.* edited by Springer.
- Arfvidsson, Jesper. 1999. "A New Algorithm to Calculate the Isothermal Moisture Penetration for Periodically Varying Relative Humidity at the Boundary." *Nordic Journal of Building Physics* 2:11.
- Baker, Paul. 2011. "U-Values and Traditional Buildings. In Situ Measurements and Their Comparisons to Calculated Values." *Historic Scotland Technical Paper 10* (January):70.
- Balaras, C. A. 1996. "The Role of Thermal Mass on the Cooling Load of Buildings. An Overview of Computational Methods." *Energy and Buildings* 24(1):1-10.
- de Bruijn, Paulien Brigitte, Knut Håkan Jeppsson, Kenneth Sandin, and Christer Nilsson. 2009. "Mechanical Properties of Lime-Hemp Concrete Containing Shives and Fibres." *Biosystems Engineering* 103(4):474-79.
- Cérézo, Véronique. 2005. "Propriétés Mécaniques, Thermiques et Acoustiques D'un Matériau À Base de Particules Végétales : Approche Expérimentale et Modélisation Théorique." Thèse doctorale. INSA de Lyon.
- Chamoin, Julien. 2013. "Optimisation Des Propriétés (Physiques, Mécaniques et Hydriques) de Bétons de Chanvre Par La Maîtrise de La Formulation." Thèse doctorale. INSA de Rennes.
- Collet-Foucault, Florence. 2004. "Caractérisation Hydrique et Thermique de Matériaux de Génie Civil À Faibles Impacts Environnementaux." Thèse doctorale. INSA de Rennes.
- Collet, Florence and Sylvie Pretot. 2014. "Thermal Conductivity of Hemp Concretes : Variation with Formulation , Density and Water Content." *Construction and Building Materials* 65:612-19.
- De Dear, Richard and G. .. Brager. 1998. "Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference." *ASHRAE* 104.
- Dubois, Samuel, Arnaud Evrard, and Frédéric Lebeau. 2014. "Modeling the Dynamic Hygrothermal Behavior of Biobased Construction Materials." *Journal of Building Physics* 21.
- Dunster, Bill. 2004. *UK Housing and Climate Change Heavyweight vs . Lightweight Construction.*
- Evrard, A. 2008. "Transient Hygrothermal Behaviour of Lime-Hemp Materials." PhD thesis. Université de Louvain.
- Evrard, A. and A. De Herde. 2005. "Bioclimatic Envelopes Made of Lime and Hemp Concrete." Pp. 1-6 in *Proceeding of CISBAT.*
- Glé, P., E. Gourdon, and L. Arnaud. 2011. "Acoustical Properties of Materials Made of Vegetable Particles with Several Scales of Porosity." *Applied Acoustics* 72:249-59.
- Heberlé, Elodie. 2016. *Synthèse Bibliographique Des Études Sur La Rénovation Thermique Du Bâti Ancien À L'aide de Matériaux Isolants Biosourcés.*

- ISO 12572. 2016. *Hygrothermal Performance of Building Materials and Products - Determination of Water Vapour Transmission Properties.*
- ISO 9869-1. 2014. *Thermal Insulation - Building Elements - Insitu Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance; Part 1: Heat Flow Meter Method.*
- Kalamees, Targo. 2007. "Air Tightness and Air Leakages of New Lightweight Single-Family Detached Houses in Estonia." *Building and Environment* 42:2369–77.
- Künzel, Hartwig. 1995. "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One - and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters ." Fraunhofer Institute of Building Physics.
- Latif, Eshrar, Mike Lawrence, Andy Shea, and Pete Walker. 2015. "Moisture Buffer Potential of Experimental Wall Assemblies Incorporating Formulated Hemp-Lime." *Building and Environment* 93:199–209.
- Maalouf, C., A. D. Tran Le, S. B. Umurigirwa, M. Lachi, and O. Douzane. 2014. "Study of Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope under Summer Conditions in France." *Energy & Buildings* 77:48–57.
- Mcgregor, Fionn, Andrew Heath, Enrico Fodde, and Andy Shea. 2014. "Conditions Affecting the Moisture Buffering Measurement Performed on Compressed Earth Blocks." *Building and Environment* 75:11–18.
- Munaretto, Fabio. 2014. "Etude de L'influence de L'inertie Thermique Sur Les Performances Énergétiques Des Bâtiments." Thèse doctorale. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- NF EN ISO 12751. 2000. *Performance Hygrométrique Des Matériaux et Produits Pour Le Bâtiment – Détermination Des Propriétés de Sorption Hygroscopique.*
- Rode, Carsten. 2005. *Moisture Buffering of Building Materials.*
- Samri, Driss. 2008. "Analyse Physique et Caractérisation Hygrothermique Des Matériaux de Construction : Approche Expérimentale et Modélisation Numérique." Thèse doctorale. ENTPE.
- Scheffler, Gregor. 2008. "Validation of Hygrothermal Material Modelling Under Consideration of the Hysteresis of Moisture Storage." PhD Thesis. Dresden University of Technology.
- Sun, Chuan, Shuiming Shu, Guozhong Ding, Xiaoqing Zhang, and Xinghua Hu. 2013. "Investigation of Time Lags and Decrement Factors for Different Building Outside Temperatures." *Energy & Buildings* 61:1–7.
- Walker, R. and S. Pavia. 2014. "Moisture Transfer and Thermal Properties of Hemp – Lime Concretes." *Construction and Building Materials* 64:270–73.

CHAPITRE 4

Influence de la morphologie urbaine

1. Introduction.....	78
2. Caractérisation de la morphologie et de la climatologie urbaine	78
2.1. Morphologie urbaine.....	78
2.2. Modification des conditions aux limites par le microclimat urbain	78
2.2.1. Modification du flux radiatif par le milieu urbain	79
2.2.2. Ecoulement d'air en milieu urbain.....	82
2.3. Définition d'indicateurs	86
2.3.1. Outil SIG	86
2.3.2. Indicateurs de morphologie urbaine	87
3. Méthodologie associée et validation des outils numériques utilisés.....	91
3.1. Analyse en composantes principales.....	91
3.2. Association EnergyPlus-ArcGIS	92
3.2.1. Description du logiciel et choix des caractéristiques de simulation.....	92
3.2.2. Comparaison simulation et dispositif expérimental	94
4. Résultats et analyses.....	97
4.1. Etude du tissu urbain	97
4.2. Résultats.....	98
4.2.1. Analyse de la dispersion des individus	98
4.2.2. Analyse des variables de la morphologie urbaine.....	99
4.2.3. Réduction de l'étude à un îlot.....	102
5. Conclusion	104
6. Références	105

1. Introduction

Dans le centre de Cahors, les bâtiments sont situés dans un environnement urbain très dense, d'époque médiévale. La morphologie urbaine des centres anciens possède certaines particularités provoquant la création d'un microclimat spécifique ne pouvant être négligé. Par l'étude des formes bâties à l'échelle urbaine, nous cherchons à comprendre comment la modification des conditions aux limites extérieures par l'environnement urbain influence le comportement hygrothermique de la paroi.

2. Caractérisation de la morphologie et de la climatologie urbaine

2.1. Morphologie urbaine

Le développement d'une ville s'insère dans un contexte, à la fois environnemental, socio-économique et socio-culturel, dont découle l'organisation de ses formes et sa matérialité. Au cours des siècles, la morphologie urbaine n'a eu de cesse d'évoluer, que ce soit en continuité avec l'époque précédente ou marquée par des ruptures (Lévy 2005).

Face aux récents bouleversements dans l'organisation spatiale de la ville, l'étude de la morphologie urbaine connaît un renouveau, amenant de nouvelles problématiques à l'interface de différentes disciplines : la fragmentation en quartier et l'étalement urbain soulèvent la question du lien social ; la mobilité croissante et l'étalement interrogent la soutenabilité énergétique de ces nouvelles organisations urbaines.

Dans le domaine de l'énergétique, la prise de conscience de l'impact de la forme urbaine a peu à peu engendré depuis 10-15 ans le passage d'une modélisation du bâti seul à un bâti intégré dans son environnement urbain. Nommés « Urban Building Energy Modelling » (UBEM), ces modèles cherchent à déterminer les consommations énergétiques des bâtis, mais ont également des objectifs variés, tels que l'optimisation des formes urbaines pour chercher des typologies plus soutenables (diminution de l'îlot de chaleur urbain (Arnfield 2003), recherche d'une architecture plus passive, optimisation de l'éclairage naturel disponible (Miguet 2000)), l'étude de l'implantation des filières énergétiques locales et renouvelables (potentiel solaire urbain pour l'utilisation du solaire thermique ou panneaux photovoltaïques, réseaux de chaleur (Mertz 2016)), la modélisation du trafic, ou encore la dispersion des polluants (Lateb et al. 2016).

Dans le cas d'une étude à l'échelle de la paroi, la morphologie urbaine va principalement influencer sur les conditions aux limites extérieures.

2.2. Modification des conditions aux limites par le microclimat urbain

Dans les simulations hygrothermiques d'une paroi, les influences du climat et de l'orientation de la paroi ont déjà été étudiées, mais rares sont les études qui prennent en compte la modification des conditions aux limites extérieures due à l'environnement urbain. Or, l'exactitude des conditions aux limites est souvent aussi critique que la modélisation des transferts (Delgado et al. 2013).

Le micro climat urbain peut fortement affecter les conditions aux limites (Dorer et al. 2013), spécialement dans le cas d'un centre médiéval comme Cahors, où la densité de bâti est particulièrement élevée.

La morphologie urbaine est un paramètre dominant dans la formation d'un micro climat urbain (Matzarakis and Mayer 1988) et si la climatologie urbaine est une science récente, l'observation et la prise en compte de l'influence des formes bâties sur le climat sont, elles, ancestrales (Colombert et al. 2012).

Les caractéristiques physiques et morphologiques d'un environnement ont une influence sur le climat observé. Dans cet environnement, les propriétés radiatives, thermiques, hydriques et aérodynamiques de ce dernier vont régir la façon dont l'énergie reçue est répartie (Oke 1987) modifiant les variables climatiques pour créer un micro climat urbain. L'environnement urbain, par la géométrie de son tissu urbain et sa matérialité, modifie principalement le flux radiatif courtes et grandes longueurs d'ondes ainsi que les écoulements d'air.

Le micro climat urbain peut être défini selon plusieurs échelles spatiales. (Oke 1987) en définit quatre pour l'étude des phénomènes climatiques : l'échelle macro (> 100 km), la méso-échelle (10 km - 200 km), l'échelle locale ou urbaine (100 m - 50 km) et l'échelle micro (1 cm - 1 km).

2.2.1. Modification du flux radiatif par le milieu urbain

a) Calculer l'énergie incidente en provenance du ciel

A l'échelle de la paroi, nous nous plaçons à l'échelle micro pour déterminer le flux radiatif échangé avec la paroi. Pour cela, il convient tout d'abord d'avoir un modèle fiable permettant de déterminer le flux radiatif descendant. Ce terme différencie les flux à courtes longueurs d'ondes (CLO) d'une part, correspondant au rayonnement solaire (0,15 μm - 3,0 μm), et les flux à grandes longueurs d'ondes (GLO) d'autre part, correspondant au rayonnement infrarouge (3,0 μm - 100 μm) (Oke 1987).

La partie GLO descendante correspond au rayonnement émis par les particules en suspension dans l'atmosphère (comme par exemple des gouttelettes d'eau, des poussières). L'énergie émise est fonction de la température d'air et peut être calculée via la loi de Stefan-Boltzmann :

$$GLO = \varepsilon_{\text{atm}} \sigma T_{\text{atm}}^4 \quad (11)$$

Avec ε_{atm} (-) l'émissivité moyenne de l'atmosphère,
 σ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) la constante de Stefan-Boltzmann,
 T_{atm} (K) la température moyenne de l'atmosphère.

Le rayonnement CLO descendant intègre deux composantes principales : le rayonnement direct, qui provient du soleil, et le rayonnement diffus, qui provient du ciel.

La modélisation du rayonnement solaire direct et diffus peut être plus ou moins fine. En milieu urbain, la forme et la densité de la ville affectent la pénétration du rayonnement solaire en obstruant les rayons directs du soleil et en limitant la partie visible du ciel. Pour évaluer la disponibilité du rayonnement solaire, il faut donc modéliser l'interaction entre les rayons du soleil et la géométrie du contexte urbain déterminant la partie du ciel visible (Compagnon 2004).

b) Les modèles de ciel

Les modèles de ciel ont pour but de distribuer le rayonnement diffus sur la voûte céleste. La distribution de la radiance sur la voûte céleste dépend de la position du soleil pour un ciel sans nuage ou partiellement nuageux. En général, la radiance de la voûte céleste est plus importante dans le voisinage du soleil et sur l'horizon. Ces deux régions sont notées comme auréole du soleil (en anglais : circumsolar) et éclat de l'horizon.

Le modèle de ciel anisotrope en trois composantes (Figure 40) développé par (Perez et al. 1990) est aujourd'hui largement utilisé et a été validé empiriquement en plusieurs emplacements (Loutzenhiser et al. 2007). Ce modèle a été implanté dans plusieurs codes de simulation thermique des bâtiments dont EnergyPlus (Crawley et al. 2001).

Aujourd'hui, des modèles plus fins se développent en décomposant la voûte céleste en facettes ce qui permet de mesurer la distribution spatiale des luminances du ciel (développé pour la première fois par (Tregenza 1987) et utilisé dans les logiciels Radiance ou Solene). A un niveau encore plus fin, la concentration en polluants dans la sous-couche atmosphérique urbaine peut également être prise en compte car elle entraîne une diminution de l'énergie solaire incidente (Bozonnet 2005).

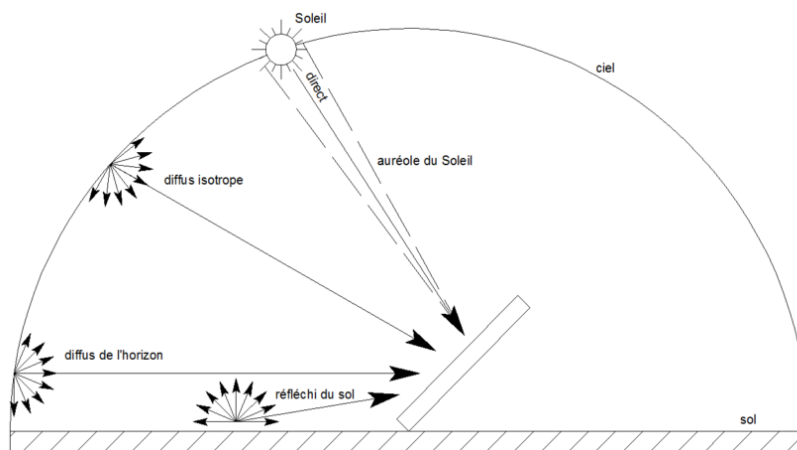


Figure 40: Rayonnement direct, diffus et réfléchi au sol d'après (Duffie and Beckman 2013)

c) Calcul des inter-réflexions permettant de déterminer l'éclairement diffus dû à l'environnement

Le rayonnement solaire CLO qui, atteignant le tissu urbain, est en partie réfléchi par le sol et par les parois des bâtiments, représente un phénomène non négligeable en milieu urbain (Bozonnet 2005).

Selon les modèles, la prise en compte des bâtiments voisins est modélisée de façon différente.

Algorithme de calcul

Souvent ces derniers sont uniquement modélisés sous forme de masques solaires, et les inter-réflexions entre bâtiments ne sont pas considérées (ex : Pléiades+COMFIE). Les algorithmes pouvant gérer le calcul de la propagation du rayonnement solaire entre la source et les surfaces d'une géométrie, puis les inter-réflexions entre ces surfaces peuvent être classées sous deux familles : la radiativité et le lancer de rayon.

EnergyPlus, grâce à l'option « avec réflexions », intègre un calcul précis des apports solaires via la méthode de lancer de rayons, ou Ray-Tracing (Figure 41). Le calcul prend en compte non seulement le flux global incident qui provient du soleil mais aussi les inter-réflexions entre le bâtiment étudié et son environnement urbain (bâtiments voisins, sol...). Le logiciel Solène lui, prend en compte ces inter-réflexions grâce à la méthode des radiosités (Bozonnet 2005).

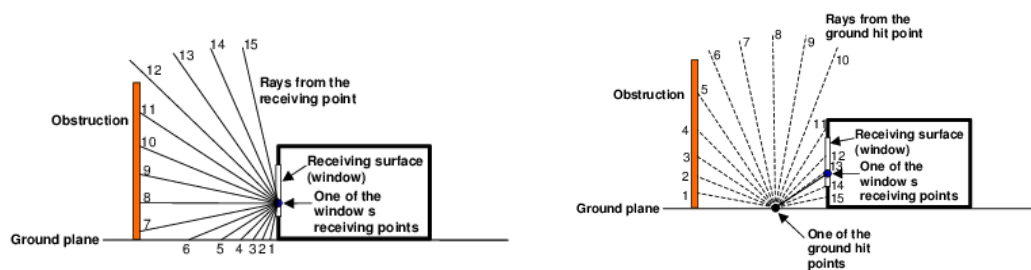


Figure 41 : Méthode du lancer de rayons utilisée dans EnergyPlus

Caractérisation photométrique des matériaux

La description précise des propriétés photométriques des surfaces est essentielle pour pouvoir déterminer correctement la distribution du rayonnement solaire.

La plupart des revêtements utilisés dans la construction se comportent comme des surfaces qui peuvent être considérées comme parfaitement diffuses. De telles surfaces réfléchissent la lumière dans toutes les directions et l'intensité du rayonnement réfléchi varie suivant le cosinus de l'angle sortant, mesuré par rapport à la direction normale (loi de Lambert). Pour ces surfaces, la distribution du rayonnement réfléchi est identique quelle que soit l'incidence du rayonnement.

Les propriétés photométriques dépendent non seulement du matériau, mais aussi de la texture de sa surface. La plupart des logiciels considèrent toutes les surfaces du modèle comme parfaitement diffuses pour calculer la distribution de la lumière. Certains intègrent toutefois la possibilité de définir la réflexion spéculaire de certains matériaux.

La mauvaise prise compte de la variation de la radiance des différentes surfaces extérieures constitue une importante source d'erreur dans les modèles urbains selon (Robinson 2011) particulièrement dans le cas d'un environnement avec d'importantes surfaces vitrées. Dans EnergyPlus, le coefficient de réflexion de chaque surface peut alors être défini manuellement, ainsi que le type de réflexion (spéculaire ou diffuse).

Dans l'environnement urbain, ce n'est pas seulement le coefficient de réflexion, mais également la capacité de stockage du matériau, qui influence le bilan radiatif, car celui-ci réémettra dans l'infrarouge (3,0 μm - 100 μm), c'est-à-dire des radiations GLO.

d) Emissions GLO

Des radiations GLO sont émises et reçues par la façade extérieure. Les radiations GLO qui atteignent la paroi sont la somme des radiations émises par la voûte céleste, celles émises par le sol et celles émises par les masques environnants. Par nuit de ciel clair, les radiations émises par la voûte céleste sont plus faibles que celles émises par la paroi, entraînant une perte de chaleur de la paroi par radiation et une chute de la température de surface parfois en dessous de la température de rosée de l'air. Ce phénomène est appelé « undercooling » et peut provoquer de la

condensation de surface (Barreira and de Freitas 2013). Le tissu urbain, par sa géométrie, modifie les radiations émises et reçues par la paroi.

Rares voire inexistantes sont les modèles pouvant réaliser à la fois une étude poussée du bilan radiatif extérieur et une étude hygrothermique avancée du bâtiment ou de la paroi. Cela est souvent obtenu par couplage. (Miller et al. 2015) couple par exemple CitySim, capable de réaliser un bilan radiatif complet à l'échelle urbaine à la fois en courtes et grandes longueurs d'ondes, mais dont le modèle thermique utilisé pour chaque bâtiment est simple et repose sur une analogie avec un circuit électrique Résistance-Capacité, à EnergyPlus, plus complet dans l'étude des consommations énergétiques des bâtiments.

Dans EnergyPlus, la balance radiative GLO est calculée comme la somme des radiations en provenance du sol, de la voûte céleste et de l'air. Les radiations en provenance des bâtiments adjacents sont ajoutées aux radiations en provenance du sol, en considérant que la température de surface (bâtiment et sol) est à une température uniforme avec celle de l'air avec une émissivité de 0.9. Les obstructions extérieures diminuent le facteur de vue du ciel, calculé à partir de 144 points sur le dôme de la voûte céleste.

$$Q_{GLO} = h_{r,sol} (T_{surf} - T_{sol}) + h_{r,ciel} (T_{surf} - T_{ciel}) + h_{r,air} (T_{surf} - T_{air}) \quad (12)$$

$$h_{r,variable} = \frac{\epsilon \sigma F_{variable} (T_{surf}^4 - T_{variable}^4)}{T_{surf} - T_{variable}} \quad (13)$$

avec ϵ l'émissivité (-) et $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ kg.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ la constante de Stefan Boltzmann.

$$F_{sol} = \frac{(1 - \cos\Phi)}{2} + F_{obs-ciel} \quad (14)$$

$$F_{ciel} = \beta \left(\frac{1 + \cos\Phi}{2} - F_{obs-ciel} \right) \quad (15)$$

$$F_{air} = (1 - \beta) \left(\frac{1 + \cos\Phi}{2} - F_{obs-ciel} \right) \quad (16)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{(1 + \cos\Phi)}{2}} \quad (17)$$

avec $F_{variable}$ (-) facteur de vue et Φ (radian) l'inclinaison de la paroi selon (Walton 1983).

2.2.2. Écoulement d'air en milieu urbain

Le tissu urbain modifie les écoulements d'air par rapport aux zones dégagées. L'influence du type de terrain (plan d'eau, campagne, centre-ville) est décrit par un paramètre appelé rugosité. A l'échelle méso-climatique, le vent à la proximité de la surface terrestre adopte un profil vertical logarithmique décrit par Oke en fonction de l'altitude z d'après l'équation (18).

$$u(z) = \frac{u^*}{k} * \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) \quad (18)$$

Avec u^* (m.s^{-1}) la vitesse de frottement, k (-) la constante de von Karman, z (m) l'altitude à laquelle le calcul est effectué, z_d (m) la hauteur de déplacement (zero plane displacement en anglais) et z_0 (m) la longueur de rugosité (roughness length en anglais).

La longueur de rugosité z_0 exprime l'effet de la rugosité de la surface terrestre sur le profil de vent. Une correspondance a été établie par (Davenport et al. 2000) entre les valeurs de z_0 , le type

d'écoulement d'air et les caractéristiques de l'environnement d'étude à l'échelle mésoclimatique. Cette étude a abouti à une classification, largement utilisée, de la rugosité effective du terrain (effective terrain roughness class en anglais) (Tableau 12). Celle-ci souligne que les faibles valeurs de z_0 correspondent à des morphologies rurales dégagées tandis que les fortes valeurs de z_0 correspondent à des morphologies urbaines denses.

Classe de rugosité	Longueur de rugosité	Description
1	0.0002	Mer ou lac dégagé (indépendamment de la taille des vagues), estran, plaine couverte de neige, désert sans relief, goudron et béton.
2	0.005	Surface terrestre sans relief, sans obstacles notables et pratiquement sans végétation, par exemple une plage ou un marais.
3	0.03	Paysage présentant une végétation basse (par exemple de l'herbe) et des obstacles isolés, séparés entre eux d'environ 50 fois la hauteur des obstacles (par exemple des pâturages sans brise-vent, un paysage de landes ou de tundra).
4	0.10	Zone naturelle ou cultivée comprenant des plantes ou des cultures de faible hauteur. Zone relativement dégagée présentant des obstacles occasionnels (par exemple des haies de faible hauteur, des bâtiments bas ou des arbres) séparés d'environ 20 fois la hauteur des obstacles.
5	0.25	Zone naturelle ou cultivée comprenant des cultures hautes ou de hauteurs variées, et des obstacles épars, séparés de 12 à 15 fois la hauteur des obstacles pour les objets poreux (par exemple des brise-vent végétaux) ou de 8 à 12 fois la hauteur des obstacles pour les objets solides (par exemple des bâtiments de faible hauteur).
6	0.5	Paysage cultivé de façon intensive présentant de nombreux groupes d'obstacles de taille importante (par exemple de grandes fermes, ou des bosquets) séparés par des espaces dégagés d'environ 8 fois la hauteur des obstacles. Grands végétaux présentant une faible densité spatiale (par exemple un verger ou une jeune forêt). Zone partiellement couverte par des bâtiments bas espacés d'environ 3 à 7 fois la hauteur des bâtiments, et sans grands arbres.
7	1.0	Paysage couvert de façon régulière par de grands obstacles de taille similaire, avec des espaces dégagés du même ordre de grandeur que la hauteur des obstacles (par exemple une forêt régulière à maturité). Zone densément bâtie sans variation importante du point de vue de la hauteur de bâtiments.
8	> 2	Centre ville alternant bâtiments hauts et bâtiments bas. Grandes forêts comprenant des arbres de tailles variées et des clairières.

Tableau 12 : Classification de la rugosité effective du terrain, d'après (Davenport et al. 2000)

À l'échelle d'un bâtiment, l'écoulement du vent crée différentes zones de surpression, de dépression, de décollement et de recirculation. La configuration des rues (orientation, forme des îlots urbains, rue canyon) peut également canaliser l'écoulement d'air, l'accélérer ou le ralentir (Nakamura and Oke 1988). Ces derniers dépendent également de l'effet de buoyancy créé par la configuration des rues canyons, particulièrement compliqué à prendre en compte, le rayonnement solaire sur le sol ou la paroi opposée d'une rue canyon entraînant la création d'une convection naturelle par différence de température entre les surfaces de l'environnement. Lorsque la vitesse de vent est très faible dans les rues canyons, les impacts de l'effet de buoyancy et le régime turbulent alors créé deviennent prédominants (Ahmad, Khare, and Chaudhry 2005).

Selon les échelles étudiées, différents modèles existent pour représenter de façon plus ou moins simplifiée l'interaction entre le milieu urbain et les écoulements d'air. Les modèles sur les écoulements d'air découlent d'études empiriques en soufflerie sur des modèles réduits de bâtiments, d'études à l'échelle 1 sur un bâtiment particulier ou sont construits à partir des équations de la thermodynamique.

A l'échelle du bâti, une des approches fréquemment utilisée est celle des modèles de CFD (Computational Fluid Dynamic). Le haut degré de précision des données d'entrée nécessaires aux modèles CFD entraîne des temps de calcul élevés. Pour cette raison, ils fournissent des résultats sur une durée allant d'un à plusieurs jours au maximum. (EnviMet, Solène Code Saturne).

Pour des calculs sur des échelles de temps plus longues, soit une approximation est réalisée à partir de calculs CFD sur quelques jours et ensuite appliquée sous forme de coefficient, soit l'échelle spatiale choisie est méso-climatique.

Le calcul de profil du vent dans EnergyPlus est réalisé à l'échelle méso-climatique, à travers les tables de profil de rugosité.

A l'échelle de la paroi, pour des calculs hygrothermiques pertinents, le profil du vent est un paramètre essentiel car il modifie le coefficient de convection thermique et hydrique ainsi que le taux d'humidification de la paroi lors d'évènements pluvieux.

a) Modification du coefficient de convection thermique et hydrique

L'effet global de cette modification de l'écoulement de l'air est la réduction des échanges thermiques par convection entre l'air et les surfaces urbaines (Oke 1987). Les échanges par flux convectif sont un problème complexe, directement lié aux écoulements d'air à proximité de la paroi.

Le flux convectif est obtenu grâce à un coefficient de convection dans la plupart des modèles thermiques. Selon le coefficient choisi, basé sur différentes corrélations et la plupart du temps issu de données empiriques, les transferts thermiques au sein de la paroi peuvent être modifiés de façon significative (Mirsadeghi et al. 2013).

(Evins, Allegrini, and Moonen 2014) ont par exemple utilisé un émulateur entre EnergyPlus et des calculs CFD afin de réduire l'erreur des calculs de coefficients de convection.

Les écoulements d'air modifient également le coefficient d'échange de vapeur d'eau à la surface. Dépendant principalement du phénomène convectif, celui-ci est déterminé par analogie, dite de Lewis, avec le coefficient de convection de chaleur. La différence de pression de vapeur est utilisée comme potentiel moteur.

$$\beta_v = \frac{h_c}{R_v \cdot T \cdot \rho_{air} \cdot c_{air}} \cdot Le^{-\frac{3}{4}} \quad (19)$$

Avec h_c ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) le coefficient de transfert thermique par convection, R_v ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$) la constante des gaz parfait, T (K) la température, ρ_{air} (kg/m^3) la masse volumique de l'air

Le nombre de Lewis Le est défini comme le rapport de la diffusivité thermique a ($m^2 \cdot s^{-1}$) à la diffusivité de vapeur dans l'air D_{air} ($m^2 \cdot s^{-1}$) :

$$Le = \frac{a}{D_{air}} = 0.85 \quad (20)$$

Le logiciel de simulation hygrothermique Delphin 5, utilisé par la suite, propose un coefficient convectif de masse dépendant la vitesse de l'air (applicable en conditions aux limites de Cauchy) :

$$j_{diff}^{mv} = \beta(v) \cdot (p_v^{surf} - p_v^{air}) \quad (21)$$

avec $\beta(v) = \beta_0 + k_{slope} * v^{k_{ext}}$
 k_{slope} (s/m²) et k_{ext} (-)
 β_0 pour $v=0$ m/s

Les coefficients convectifs de surface dépendent de la structure des pores et de la rugosité de la façade extérieure (Defraeye, Blocken, and Carmeliet 2010).

b) La pluie battante

Sous certains climats, la pluie est la source principale d'humidité et de dégradations des matériaux dans un environnement urbain (Derome et al. 2017). De plus, lors de l'évaluation du risque de dommage après isolation par l'intérieur, la pluie est un facteur crucial et devrait systématiquement être prise en compte dans les simulations hygrothermiques (Abdul Hamid and Wallentén 2017) notamment à cause de la réduction de la capacité de séchage de la paroi après isolation.

Une paroi, même pour des géométries très simplifiées ne sera pas exposée à la pluie de façon homogène (Bert Blocken and Carmeliet 2002). L'exposition de la paroi à la pluie dépend de la vitesse et de la direction du vent, ainsi que de l'intensité de la pluie battante, ce qui explique que le milieu urbain, par la géométrie et l'orientation du bâtiment ainsi que celles des masques environnants, impacte directement le « risque d'humidification de la paroi » (B Blocken and Carmeliet 2004), en créant des façades plus ou moins exposées au vent et à la pluie battante.

L'influence de l'environnement urbain sur la distribution de la pluie battante est encore peu ou mal prise en compte. Pour le moment, l'influence mutuelle des bâtiments entre eux est considérée de façon simplifiée grâce à d'un facteur de réduction appelé « facteur d'obstruction » dans la norme européenne (ISO 15927-3 2009) (Tableau 13).

Distance entre la façade et l'obstruction	Facteur d'obstruction O
4-8	0.2
8-15	0.3
15-25	0.4
25-40	0.5
40-60	0.6
60-80	0.7
80-100	0.8
100-120	0.9
>120	1

Tableau 13 : Facteur d'obstruction proposé par la norme européenne EN ISO 15927-3

Néanmoins, (B. Blocken et al. 2009) soulignent les limites de ce facteur d'obstruction ne prenant en compte que les effets de réduction, sans considérer les possibilités d'augmentation locale de l'exposition à la pluie battante créée par l'influence mutuelle de deux bâtiments avec l'apparition d'un vortex (Figure 42).

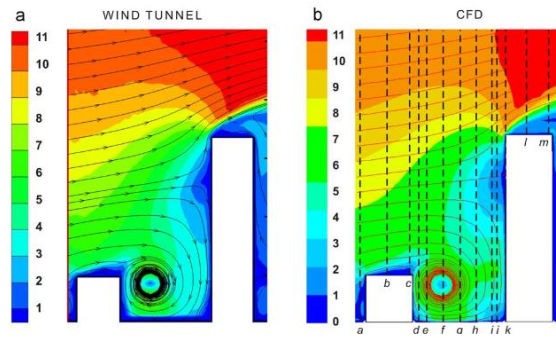


Figure 42 : Influence mutuelle de deux bâtiments sur le profil de vent et donc la quantité de pluie battante issue de (B. Blocken et al. 2009)

Dans notre cas, la distance entre la façade et l’obstruction est pour la majorité des bâtiments du centre ancien inférieur à 8m, soit un facteur d’obstruction de 0.2.

De même, la géométrie urbaine impactera la capacité de séchage de la paroi après un évènement pluvieux, selon l’accès aux différentes radiations ainsi que selon le profil de l’écoulement d’air à proximité de la paroi, modifiant les coefficients de convection massique et de chaleur de surface.

La quantité d’eau absorbée par la paroi après un évènement pluvieux présente de fortes disparités selon les modèles utilisés (Freitas, Barreira, and Freitas 2013).

Il existe principalement trois méthodes pour mesurer la quantité d’eau liquide absorbée par la paroi : l’instrumentation de la paroi, les méthodes/formules semi-empiriques et les méthodes numériques basées sur la CFD.

Dans DELPHIN 5, on considère une saturation immédiate du matériau en surface.

Le modèle offre deux possibilités pour prendre en compte la pluie. Soit l’utilisateur fixe une densité de flux liquide reçu g_{pluie} qu’il aura calculé ou mesuré au préalable. Soit le modèle calcule une densité de flux normal à la surface $g_{pluie,N}$ ($kg.m^{-2}.s^{-1}$).

$$g_{pluie,N} = k_{vent} * k_{pluie} * g_{pluie,H} \quad (22)$$

Où k_{vent} (-) le coefficient dépendant de l’orientation de la paroi et de la vitesse et de la direction du vent, k_{pluie} (-) le coefficient de protection du mur à la pluie et $g_{pluie,N}$ ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) la densité de pluie sur le plan horizontal.

Le calcul de la densité de flux normal à la surface est basé sur les travaux de thèse de (Bert Blocken and Carmeliet 2002) qui proposent des catch ratios η dépendant de la vitesse du vent et de l’intensité de la pluie.

Ce flux d’eau liquide génère également un flux enthalpique.

2.3. Définition d’indicateurs

2.3.1. Outil SIG

Parmi les outils aujourd’hui incontournables des études à l’échelle urbaine se trouvent les outils de Système d’Information Géographique (SIG) dont l’utilisation et l’accessibilité ont augmenté ces dernières années. Les outils SIG permettent d’acquérir des données géographiques, de stocker et combiner des informations de différentes natures, et d’en cartographier l’analyse

spatiale. Cette dernière spécificité en fait un outil majeur en matière de communication et de concertation autour des enjeux des projets d'aménagement (Dubus, Helle, and Masson-Vincent 2010).

Devenu un outil de planification urbaine pour les mairies ou communautés d'agglomération, l'outil SIG est utilisé en recherche en combinant les fichiers de formes au LIDAR data ou aux hauteurs de bâtiment et permet de générer des modèles de villes extrudés aussi appelé 2.5D (Reinhart and Cerezo Davila 2016). Il permet alors grâce aux données de géométrie urbaine le calcul d'indicateurs de morphologie ou encore d'être utilisé comme base de données pour différents outils de simulations des phénomènes physiques urbains.

2.3.2. Indicateurs de morphologie urbaine

Les indicateurs de morphologie urbaine permettent de décrire simplement le tissu urbain. L'objectif est de pouvoir comparer différents éléments urbains que ce soit à l'échelle de la paroi, de la rue ou d'un quartier. A l'échelle de la rue, cette simplification propose le concept de rue canyon ou canyon urbain introduit par (Oke 1987). Ce concept correspond à une rue d'une longueur infinie bordée de part et d'autre par une rangée de bâtiments.

La majorité des indicateurs résultent d'un calcul géométrique plus ou moins complexe et sont obtenus grâce aux données disponibles dans ArcGIS pour certains, et pour d'autres calculés à l'aide de logiciels complémentaires. L'ensemble des indicateurs sont résumés dans le Tableau 14.

a) Indicateurs morphologiques à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier

▪ Compacité

L'indicateur de compacité évalue la surface de l'enveloppe extérieure du bâtiment qui est exposée aux effets climatiques extérieurs.

▪ Contiguïté

La contiguïté traduit entre autres le taux de mitoyenneté entre deux bâtiments. Une contiguïté élevée est spécifique des centres anciens. D'après (L. Adolphe 2001), la contiguïté urbaine va permettre de réduire les pertes thermiques mais va également jouer sur l'éclairage naturel.

▪ Densité

La densité construite ou densité bâtie correspond au rapport de la surface de plancher construite à la surface au sol. Ainsi, la densité n'exprime pas la même réalité selon l'échelle considérée (Bonhomme 2013) :

- à l'échelle du quartier, la densité permet de mesurer la relation espace privé / espace public (densité brute) ;
- à l'échelle de l'îlot, le périmètre est limité par l'espace public, la densité caractérise donc plus la morphologie urbaine (densité nette) ;
- à l'échelle de la parcelle, on parle de coefficient d'occupation du sol (COS). Cet indicateur est celui des règlements d'urbanismes. Il est notamment utilisé dans les plans locaux d'urbanisme pour définir un «droit à bâtir» maximal sur une parcelle.

Notons cependant que des formes urbaines très différentes peuvent avoir des densités comparables, la densité doit donc être évaluée en même temps que d'autres critères (coefficient d'emprise au sol, hauteur des bâtiments).

Ces indicateurs apportent des informations quant à la caractéristique globale d'un quartier. Le comportement thermique d'un bâtiment peut être fortement influencé par son environnement immédiat, qui se traduit entre autres par la densité, la contigüité et la compacité. Si ces indicateurs ont fréquemment été corrélés pour étudier leur relation avec la consommation énergétique du bâti, lorsque l'on s'intéresse à la climatologie urbaine, d'autres indicateurs, se plaçant à une autre échelle sont utilisés.

b) Indicateurs surfaciques et à l'échelle de la rue

La morphologie tridimensionnelle est en partie responsable de la modification du flux radiatif et de la modification des profils de vent. Effet de masque solaire, piégeage radiatif, diminution de la proportion de ciel visible sont autant de caractéristiques que les indicateurs urbains essayent de traduire.

- Rapport d'aspect

Il donne une information morphologique concernant la section du canyon urbain.

Dans le cas d'un canyon parfait, il se définit de la façon suivante :

$$AR = H/W \quad (23)$$

Avec H (m) la hauteur des bâtiments de part et d'autre de la rue, et W (m) la largeur de la rue.

Dans le cas d'une rue où la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue varient, des valeurs moyennes de h et W sont calculées. À l'échelle de l'îlot ou du quartier, nous proposons le calcul de rapport d'aspect suivant :

$$\frac{S_{ext}}{S_a - \sum S_{sol}} \quad (24)$$

Avec $S_{vertical}$ (m^2) la somme de toutes les surfaces verticales de la zone de calcul, S_a (m^2) l'aire de la zone de calcul et $\sum S_{sol}$ (m^2) la somme de toutes les zones occupées par des bâtiments dans la zone de calcul.

- Facteur de Vue du Ciel

Le Facteur de Vue du Ciel, noté FVC, représente la proportion de ciel visible en un point particulier du canyon urbain ce qui correspond à l'angle solide sous lequel est vu le ciel depuis ce point. Cela exprime le ratio entre les radiations reçues par une surface plane et celle des radiations en provenance de la voûte céleste (Watson & Johnson 1987). C'est une grandeur adimensionnelle comprise entre 0 et 1, 1 correspondant au cas d'une surface plane sans obstacle où les radiations émises émettent librement vers le ciel (Brown, Grimmond, and Ratti 2001). Pour des parois verticales, le FVC maximal est de 0.5.

Le facteur de vue du ciel est fréquemment utilisé pour un point d'observation placé au niveau du sol d'une rue canyon. Il peut également être placé au niveau de la paroi d'un bâtiment.

Dans les analyses de morphologies urbaines, le FVC devient un paramètre incontournable des analyses de potentiel solaire et de lumière disponible (Ratti, Raydan, and Steemers 2003). Plus la ville est dense, plus le FVC est faible et plus l'ensoleillement est réduit (Luc Adolphe 2002).

Le FVC est un important paramètre pour décrire les rayonnements GLO, car en milieu urbain le flux radiatif ascendant sera limité de par la morphologie tridimensionnelle de la ville.

Le calcul du FVC en milieu urbain peut s'effectuer selon plusieurs approches (photographies fish-eyes, différentes équations selon les données géométriques) (Brown, Grimmond, and Ratti 2001).

Dans le cas présent, le facteur de vue du ciel a été calculé de façon automatique pour chaque paroi du quartier étudié en utilisant un algorithme implémenté dans le logiciel EnergyPlus.

- Orientation de la paroi

Cet indicateur informe sur l'existence d'orientations privilégiées, avec 0° pour le Nord et 180° pour le Sud.

- Hauteur moyenne des bâtiments

La hauteur moyenne des bâtiments et la dispersion de ces hauteurs influencent le profil aérodynamique au sein du milieu urbain.

- Durée d'ensoleillement (analyse de la fraction d'irradiation), (h/an)

Cet indicateur représente la durée pendant laquelle la paroi extérieure reçoit des radiations solaires directes (non réfléchies) par ciel clair. Il permet de décrire un cas idéal de rayonnement, indépendamment des conditions climatiques locales. Il est calculé à l'aide du logiciel EnergyPlus 8.6.

- Irradiation solaire globale annuelle (kWh/m^2 pour un an)

L'éclairement solaire est le flux énergétique issu du rayonnement solaire incident reçu par unité de surface exprimé en watts par mètre carré (W/m^2).

L'irradiation solaire est la quantité d'énergie solaire horaire issue du rayonnement solaire incident reçu par unité de surface, exprimée usuellement en Watt-heures par mètre carré (Wh/m^2) ou en Joules par mètre carré (J/m^2) selon le système international d'unités.

A l'échelle de la France métropolitaine, l'irradiation globale horizontale annuelle varie de 1100 kWh/m^2 dans le nord à près de 1700 kWh/m^2 dans le sud. Cet indicateur est calculé à l'aide du logiciel EnergyPlus 8.6.

Tableau 14: Récapitulatif des indicateurs utilisés

Indicateurs morphologiques à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier	
Compacité	Compacité d'un bâtiment : $\frac{S_{ext} + S_{toit}}{(Volume\ du\ bâtiment)^{2/3}}$ A l'échelle du quartier, on fait une moyenne des compacités des bâtiments pondérées par la surface au sol des bâtiments : $\frac{\sum Compacité_{bat,i} * S_{sol,i}}{\sum S_{sol,i}}$
Contiguïté	La contiguïté d'un bâtiment est calculée comme la surface de murs mitoyens sur la surface de murs totale: $\frac{S_{mitoyen}}{S_{sol}}$ A l'échelle du quartier: $\frac{\sum Contiguïté_{bat,i} * S_{sol,i}}{\sum S_{sol,i}}$
Densité nette	La densité nette du bâtiment se définit comme sa surface de plancher divisée par sa surface au sol: $\frac{S_{plancher}}{S_{sol}}$ A l'échelle du quartier : $\frac{\sum Densité_{bat,i} * S_{sol,i}}{\sum S_{sol,i}}$ Cet indicateur correspond dans notre cas au nombre d'étages d'un bâtiment est sera utilisé comme tel.
Densité brute	La densité brute se calcule sur la superficie étudiée: $\frac{S_{sol}}{S_a}$
Indicateurs à l'échelle de la paroi ou de la rue/décrivant la paroi ou la rue ?	
Rapport d'aspect	A l'échelle de la rue : $\frac{Hauteur\ du\ bâti}{Largeur\ de\ rue}$ A l'échelle du quartier : $\frac{S_{ext}}{S_a - \sum S_{sol}}$
Orientation	Calcul de l'angle de la paroi par rapport au Nord = 0°.
Durée d'ensoleillement	Calcul à l'aide d'EnergyPlus
Irradiation annuelle	Calcul à l'aide d'EnergyPlus

$S_{mitoyen}$ (m²) représente la surface de parois mitoyennes du bâtiment,

S_{sol} (m²) l'emprise d'un bâtiment

S_{ext} (m²) la surface verticale de l'enveloppe qui englobe le bâtiment.

S_a (m²) l'aire de la zone de calcul

3. Méthodologie associée et validation des outils numériques utilisés

A travers l'étude du tissu urbain, nous cherchons à savoir si l'ensemble des bâtis forme un ensemble homogène ou s'il existe différents types de typologie de bâti qu'il faudra traiter de façon séparée. L'objectif est d'obtenir une définition de notre ensemble ainsi que les indicateurs représentatifs de cet ensemble. Pour cela, nous nous aiderons d'un outil statistique, l'analyse en composantes principales.

Nous souhaitons également savoir comment prendre en compte les modifications des conditions aux limites engendrées par le tissu urbain. A cette fin, une association entre les logiciels ArcGIS et EnergyPlus a été réalisée et la confrontation entre l'instrumentation in-situ et la simulation permet d'en mesurer la pertinence.

3.1. Analyse en composantes principales

L'analyse de l'ensemble des bâtiments du centre ancien, ou encore de l'ensemble des parois extérieures engendre un nombre important d'individus dépendant de plusieurs variables.

L'analyse en composantes principales (ACP) représente un outil pertinent pour le traitement d'un grand nombre de données définies par plusieurs variables. Cette technique appartient aux techniques factorielles de réduction de dimension.

L'ACP permet d'exprimer les variables dans un espace de dimension réduit, c'est-à-dire de passer d'un espace à n composantes à seulement p composantes principales. En effet, le traitement et la représentation graphique des données de dimension supérieure à 2 gagnent rapidement en complexité.

Mathématiquement cela représente un changement de base, en passant d'une représentation dans la base canonique des variables initiales à une représentation dans la base des facteurs définis par les vecteurs propres de la matrice des corrélations.

La distance euclidienne permet de calculer la distance entre les individus.

$$d^2(i_1, i_2) = \sum_{j=1}^p (x_{i_1j} - x_{i_2j})^2 \quad (25)$$

Avec cette distance, toutes les variables jouent le même rôle. Le coefficient de relation linéaire r permet d'évaluer la corrélation entre les variables.

$$r(j_1, j_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i1j} \cdot x_{i2j} \quad (26)$$

Dans le cas d'un problème avec une dimension $p > 2$, l'ACP crée des composantes principales sur lesquelles seront indiquées en pourcentage de représentativité des variables projetées. Ces composantes sont calculées par la combinaison linéaire des variables originales dont la variance est la plus grande. Les individus sont alors représentés par deux vecteurs ou composantes principales (composante 1 et 2).

Ces composantes principales vont permettre de réaliser les graphiques désirés dans cet espace de petite dimension en déformant le moins possible la configuration globale des individus selon l'ensemble des variables initiales.

C'est l'interprétation de ces graphiques qui permettra de comprendre la structure des données analysées.

L'analyse des données est abordée principalement grâce à deux interprétations graphiques :

- les individus sont projetés dans le nouvel ensemble et cette projection permet d'aborder le voisinage entre les individus (par exemple Figure 43 (gauche), des groupes d'individus se dessinent selon la première composante principale) ;
- les variables sont tracées dans le nouvel espace et cela permet d'appréhender la corrélation existant entre les variables (par exemple Figure 44, les variables a et b sont corrélées, et anti-corrélées avec c selon la première composante principale, d dépend de la seconde composante principale).

Dans les figures suivantes, les deux types d'analyse graphique sont illustrés avec une ACP normée (centrée et réduite) à deux dimensions.

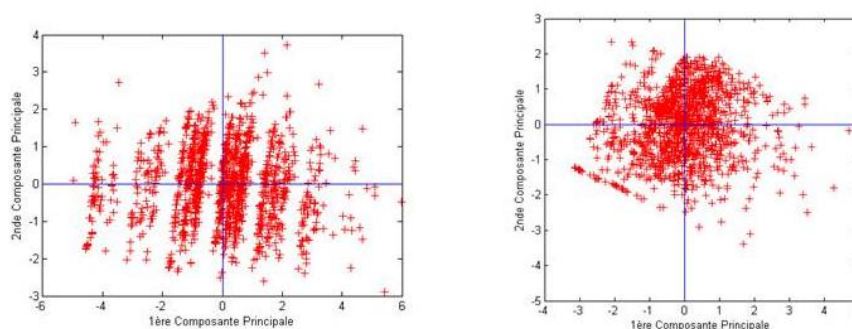


Figure 43: Groupe d'individus hétérogène (gauche), groupe d'individus homogène (droite)

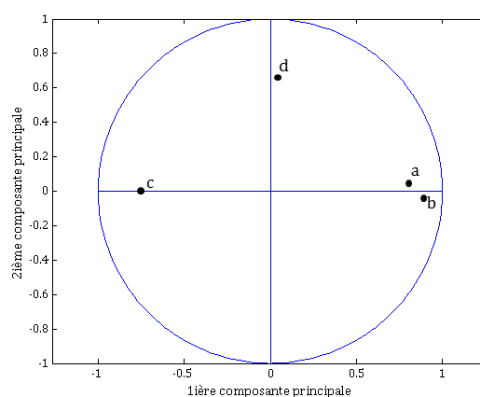


Figure 44: Illustration de la corrélation entre les variables

3.2. Association EnergyPlus-ArcGIS

3.2.1. Description du logiciel et choix des caractéristiques de simulation

EnergyPlus est un logiciel en libre accès, développé par l'US Department of Energy et régulièrement implémenté par différents membres de la communauté scientifique grâce à la disponibilité du code source. EnergyPlus possède un modèle d'échange radiatif (CLO, GLO et

inter-réflexions) relativement développé prenant en compte les bâtiments adjacents et une possibilité de simuler finement chaque bâtiment avec une rapidité de calcul pour chaque simulation, ce qui correspond aux besoins de notre étude.

Comme présenté précédemment, la morphologie du milieu urbain modifie les conditions aux limites extérieures des modèles thermiques et hygrothermiques, d'où la nécessité de détailler la géométrie des bâtiments adjacents pour obtenir des résultats cohérents.

Cette géométrie est obtenue à partir des données issues de Systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Dans les données SIG, les ensembles bâtis sont représentés par des polygones auxquels sont attribués des hauteurs. Les typologies de toits ne sont donc pas disponibles et chaque toit est considéré comme plat.

Les bâtiments sont étudiés un par un, avec pour chaque cas, les bâtiments environnants considérés comme des masques dans un rayon de 45m (voir Figure 45).

Afin de gagner en temps de calcul, les toits, n'influençant pas l'accès au rayonnement solaire, car plats, ne sont pas pris en compte pour les masques.

Chaque bâtiment est divisé en plusieurs étages, de 2.7m chacun, permettant ainsi une étude par niveau. Les parois vitrées sont représentées en termes de pourcentage vitré par façade (15%) selon une étude de terrain.

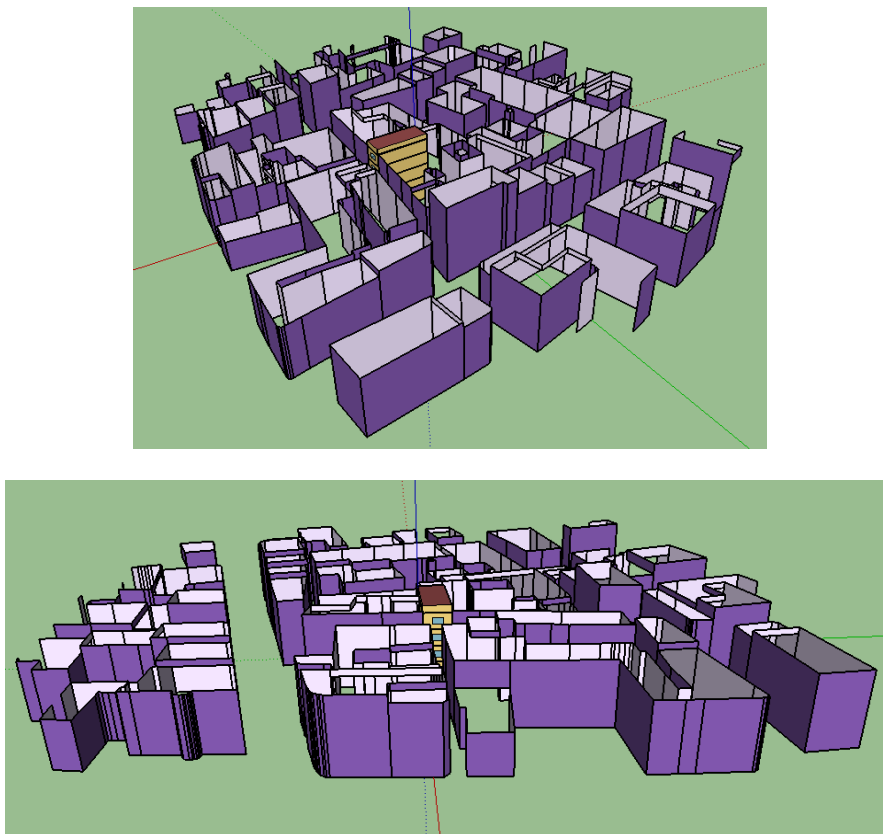


Figure 45: Bâtiment étudié et son environnement urbain défini comme masque dans E+ (interface SketchUp)

La simulation avec EnergyPlus permet d'obtenir la température de surface de chaque paroi extérieure. Cette température de surface sera par la suite utilisée comme température

équivalente en tant que condition aux limites de type Dirichlet. Le détail sera donné au Chapitre 5.

3.2.2. Comparaison simulation et dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été présenté au Chapitre 3. Les données issues des simulations sont calculées avec les fichiers météorologiques des années 2015 et 2016 de la station Cahors Le Montat fournis par Météo France.

a) Comparaison du rayonnement solaire incident à la façade

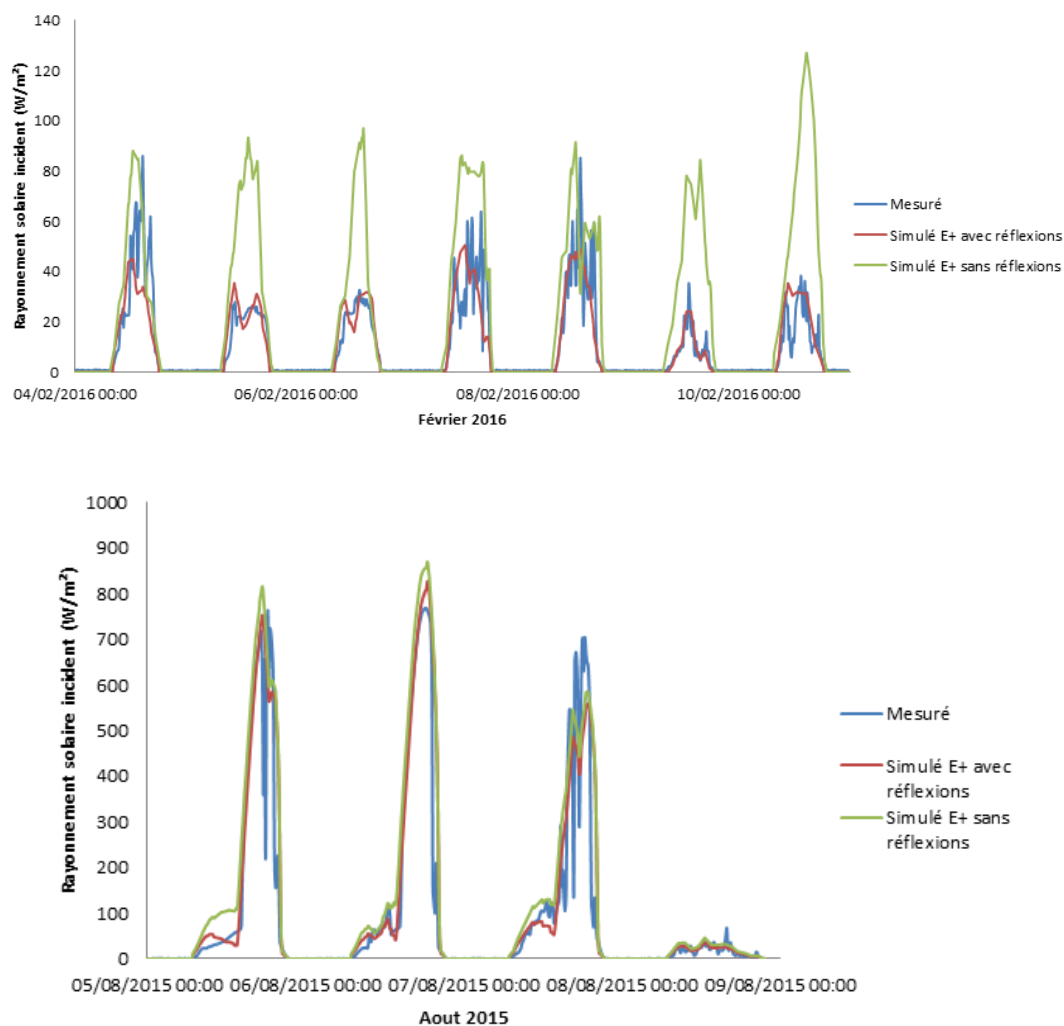


Figure 46: Comparaison des irradiations normales à la paroi mesurée et simulée avec et sans réflexions, en hiver (haut) et en été (bas)

La Figure 46 présente la comparaison entre les résultats issus de la simulation avec EnergyPlus et les données expérimentales. Pour la même paroi, deux cas de simulations sont analysés : avec et sans réflexions. En hiver comme en été, la simulation avec réflexions présente une meilleure corrélation avec les valeurs expérimentales. Lorsque l'option « avec réflexions » n'est pas activée dans EnergyPlus, le sol est considéré comme non-obstrué, l'écart entre les deux cas simulés est donc principalement dû à la réflexion du rayonnement direct et diffus sur le sol environnant. La différence est d'autant plus marquée en hiver, car le sol n'est alors en réalité presque jamais éclairé.

La différence entre les valeurs mesurées et simulées est illustrée par l'écart quadratique moyen E :

$$E^2 = \frac{1}{n} \sum_i^n (\Phi_{i,mesuré} - \Phi_{i,simulé})^2 \quad (27)$$

	Février		Août	
	Avec réflexions	Sans réflexion	Avec réflexions	Sans réflexion
E (W/m ²)	7.7	26	76.9	85.1

Au vu des écarts quadratiques moyens entre le flux solaire mesuré et calculé, les simulations seront donc par la suite réalisées avec l'option « avec réflexions ».

b) Comparaison de la température extérieure de surface

La température de surface est un paramètre physique plus complexe, car il dépend des différents types de radiation, de la convection et de la conduction à travers la paroi.

Parmi les différents coefficients de convection proposés par EnergyPlus, nous travaillerons avec le modèle TARP (Thermal Analysis Research Program) (Walton 1983) prenant en compte la rugosité de la paroi, la convection naturelle et forcée, la vitesse et la direction du vent (U.S. Department of Energy 2016).

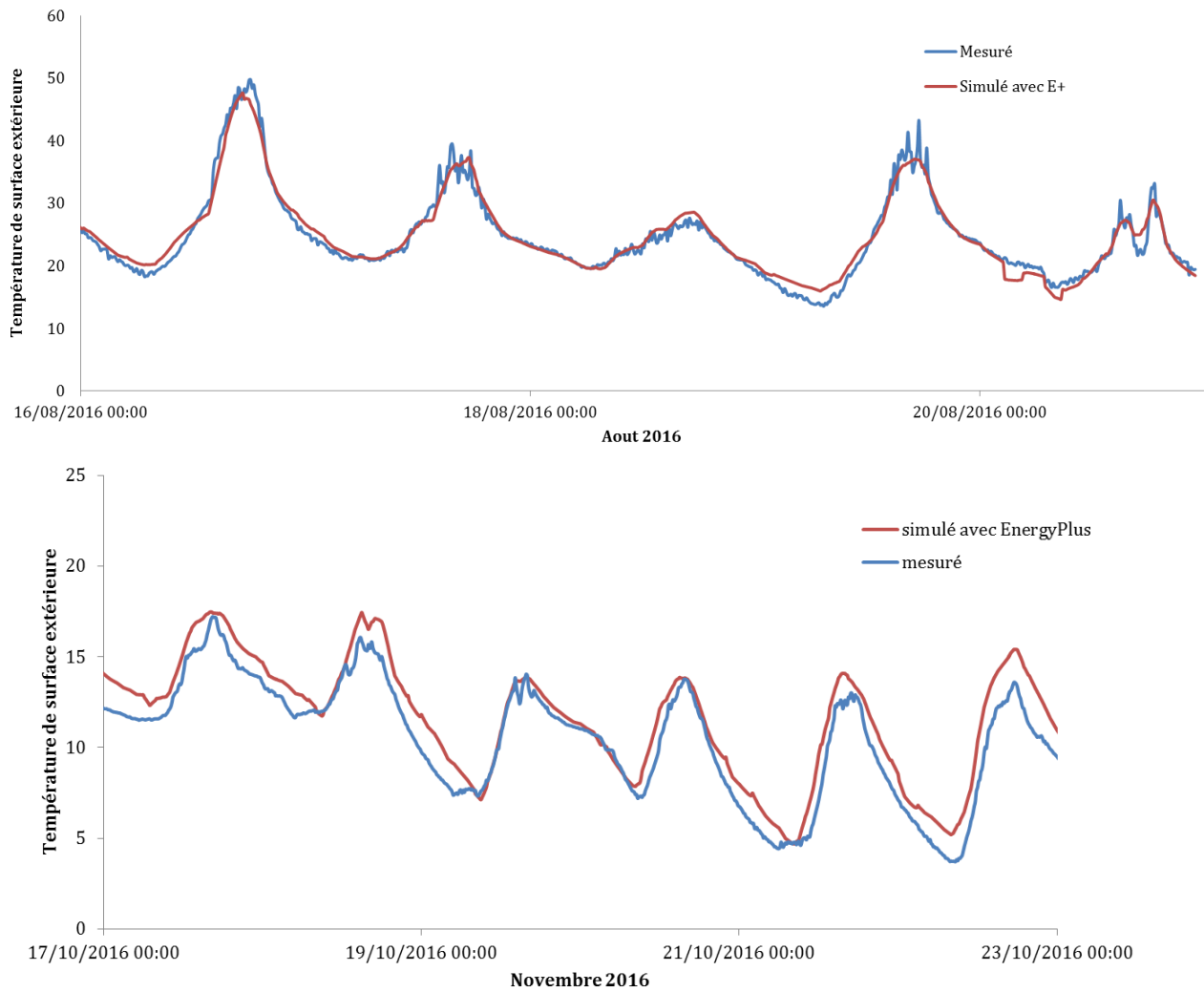


Figure 47: Comparaison des températures de surface mesurées et simulées

La corrélation entre les données mesurées et simulées est cohérente pour la température de surface (Figure 47). Les écarts sont entre autres dus au pas de temps, de 10 minutes pour les données mesurées et d'une heure pour la simulation.

A nouveau, la différence entre les valeurs mesurées et simulées est définie par l'écart quadratique moyen :

$$E^2 = \frac{1}{n} \sum_i^n (T_{i,mesuré} - T_{i,simulé})^2 \quad (28)$$

	Août	Novembre
E (°C)	1.41	1.31

La différence plus élevée pour le mois d'août s'explique par la quantité de rayonnement direct plus importante à cette période de l'année atteignant la paroi, pouvant modifier rapidement la température extérieure de surface.

EnergyPlus semble donc un outil pertinent pour obtenir les conditions aux limites extérieures des parois étudiées dans le centre ancien.

4. Résultats et analyses

4.1. Etude du tissu urbain

Notre étude se focalise sur le centre ancien de la ville de Cahors. Sa morphologie particulière est le résultat de la superposition de différentes strates historiques.

Les premières traces d'un tissu urbain remontent à l'époque romaine, où l'agglomération occupait presque toute la presqu'île formée par le méandre du Lot. Les changements majeurs qui mènent la ville antique à la cité du Moyen Age, ont eu lieu au cours du V^e et VI^e siècle, fixant pour longtemps les grandes lignes de sa structure urbaine, mais gardant néanmoins une trame de voirie relativement régulière, comme héritage de la cité antique (Scellès 1999).

La ville est désormais enclose dans un rempart, aujourd'hui disparu, mais marqué par le boulevard Gambetta qui traverse l'agglomération. C'est au XII^e siècle, que Cahors connaît son apogée et une forte densification intra-muros, s'intégrant comme d'autres villes à l'un des mouvements d'urbanisation les plus massifs qui arrivent en Europe entre le X^e et le XIII^e siècle (Duby, Chédeville, and Rossiaud 1980).



Figure 48: Vue cavalière de la ville au 17^{ième} siècle, dite de « Tassin » (1634), bibliothèque de la ville de Cahors

La guerre de Cent Ans, suivi des famines, de la peste et de l'augmentation des impôts met fin au rayonnement de Cahors comme capitale du Quercy (Scellès 1999). Fin XIV^e, on estime que la ville a perdu la moitié de ses habitants. Depuis, en l'absence d'une économie florissante, on s'est contenté pendant des siècles, de réparer, réaménager, remodeler à l'économie les bâtiments légués par le Moyen Age. Au XIX^{ième}, en plein courant hygiéniste haussmannien qui correspond à une rupture dans l'organisation du tissu urbain de nombreuses villes françaises (Salat 2011), Cahors ne connaît par manque de budget que quelques percées, ne modifiant que légèrement le tissu urbain du centre ancien.

1987, avec la mise en place du Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur, fige l'architecture du centre ancien. Dorénavant, toutes modifications des bâtiments appartenant au périmètre considéré comme sauvegardé devront répondre aux exigences définies par le code d'urbanisme.

4.2. Résultats

4.2.1. Analyse de la dispersion des individus

Afin d'étudier s'il existe des groupements d'individus au sein des parois ou des bâtiments, nous réalisons une ACP sur les variables (Orientation, FVC, Ensoleillement, Irradiation, Etage) pour les parois et (Compacité, Densité nette, Contiguïté) pour les bâtiments.

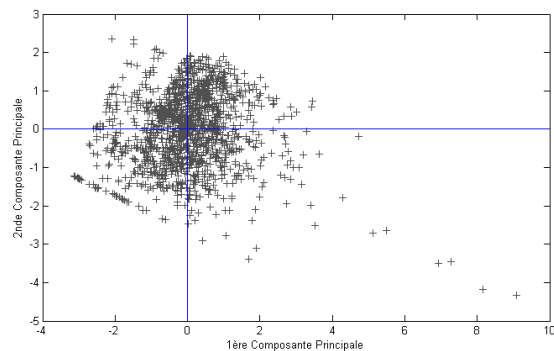


Figure 49 : Représentation des individus « bâtiments » selon les deux composantes principales

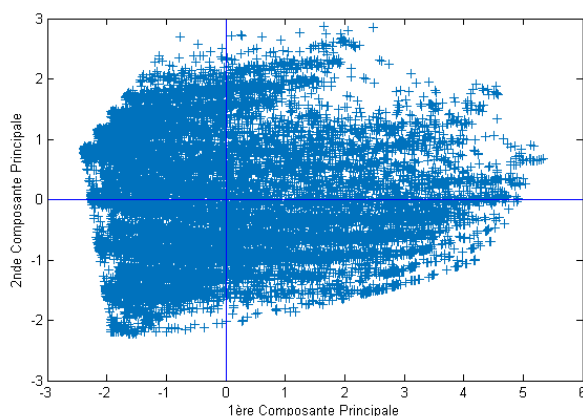


Figure 50: Représentation des individus "parois" selon les deux composantes principales

Sur la Figure 49 nous observons que l'ensemble des individus forme un ensemble homogène, les seuls individus se détachant de la masse représentent des bâtiments classés au cadastre comme des églises, tour ou donjons c'est-à-dire ne servant pas à du logement.

Les individus du deuxième graphique (Figure 50) représentent les différentes parois du centre ancien. A nouveau, l'ensemble des individus forme un ensemble homogène.

Cette observation nous permettra par la suite de réduire l'étude à un seul îlot au lieu du centre ancien tout entier. De plus l'homogénéité des individus nous permet d'utiliser des indicateurs au niveau de l'échelle du quartier pour définir le centre ancien (Figure 51).

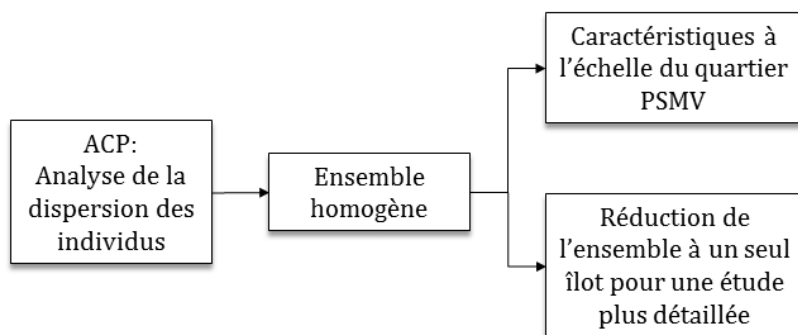


Figure 51: Analyse de la dispersion des individus de l'ACP



4.2.2. Analyse des variables de la morphologie urbaine

a) Etude des bâtiments à l'échelle du quartier

L'homogénéité des bâtiments nous permet d'utiliser des indicateurs à l'échelle du quartier pour décrire le centre ancien. La géométrie réelle des rues, avec les différentes hauteurs de bâtiments, rend difficile l'utilisation du rapport d'aspect à l'échelle de la rue.

La comparaison avec le centre ancien d'Annecy permet de confronter les indicateurs morphologiques obtenus à Cahors à ceux d'un autre quartier médiéval (Tableau 15).

Tableau 15: Comparaison des indicateurs morphologiques de deux quartiers possédant un bâti médiéval

	Cahors (PSMV)	Annecy (médiéval)
Géométrie du bâti		
Densité brute	0.589	0.55
Densité nette	3.93	4.42
Rapport d'aspect H/W	4.2	3.13
Contigüité	0.424	0.45
Compacité	5.99	3.87

Comme d'autres centres médiévaux, le bâti cadurcien est particulièrement compact et contigu. Ce type de bâti présente sa part d'avantages et d'inconvénients. Un bâti compact et contigu possède moins de surfaces déperditives et permet de réduire les consommations de chauffage, mais la part importante d'ombres portées réduit l'accès au solaire passif. Concernant les besoins de climatisation, ces morphologies vont favoriser le piégeage radiatif, la mauvaise circulation du vent, mais la présence de nombreux masques environnants diminue l'accès au rayonnement solaire (Bonhomme 2013).

(Marciotto, Oliveira, and Hanna 2010) soulignent que le rapport d'aspect est l'un des indicateurs les plus importants concernant la modification des flux radiatifs et indiquent que la nuit la température a tendance à être plus élevée dans les rues canyons à cause du piégeage radiatif, mais que cet effet s'inverse à partir d'un rapport d'aspect de 4.

Le fait que nous négligeons les radiations GLO émises par les bâtiments en utilisant EnergyPlus n'est donc pas tout à fait représentatif mais acceptable au vu du rapport d'aspect obtenu.

a) Etude des parois

En étudiant les variables à l'échelle de la paroi, l'ACP nous permet d'obtenir les corrélations existant entre les différents indicateurs.

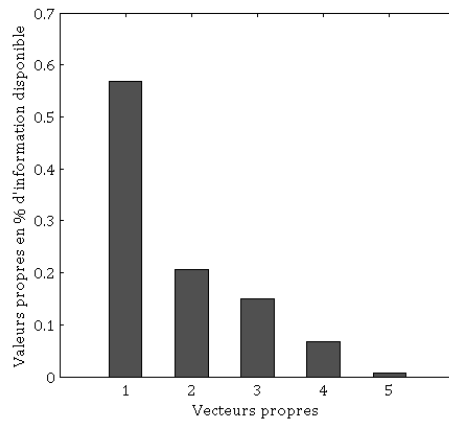


Figure 52: Disponibilité de l'information portée par les composantes principales

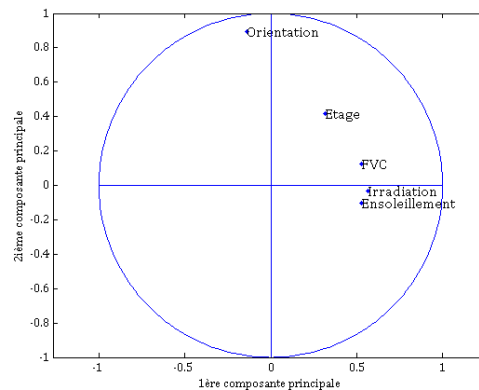


Figure 53: Variables selon les composantes principales

Le graphique Figure 53 nous permet d'observer la corrélation existant entre les variables FVC, Irradiation et Ensoleillement. L'orientation, bien qu'en réalité corrélée à l'ensoleillement, s'exprime au sein de la 2^{ème} composante principale.

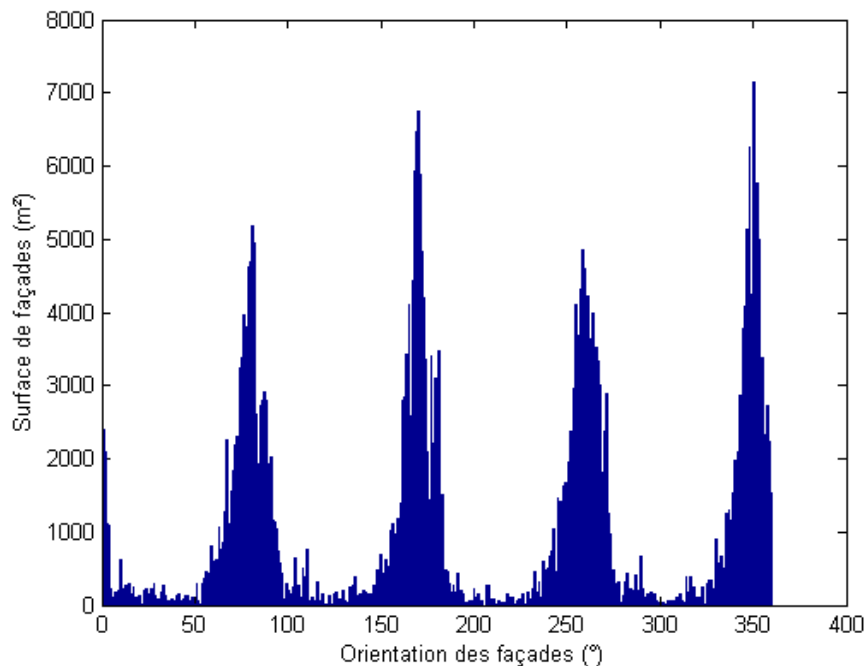


Figure 54: Surface cumulée de façades selon l'orientation

L'histogramme de la Figure 54, illustre clairement quatre orientations principales selon les axes Nord-Sud et Est-Ouest, qui se dégagent dans le centre ancien de Cahors. Alors que de nombreuses villes médiévales possèdent une organisation de tissu urbain appelée organique, sans trame régulière, à Cahors, ce sont les fondements des plans romains orthogonaux qui ressortent. En effet, chaque ville romaine était orientée selon le cardo (axe Nord-Sud) et le decumanus (axe Est Ouest) (Salat 2011).

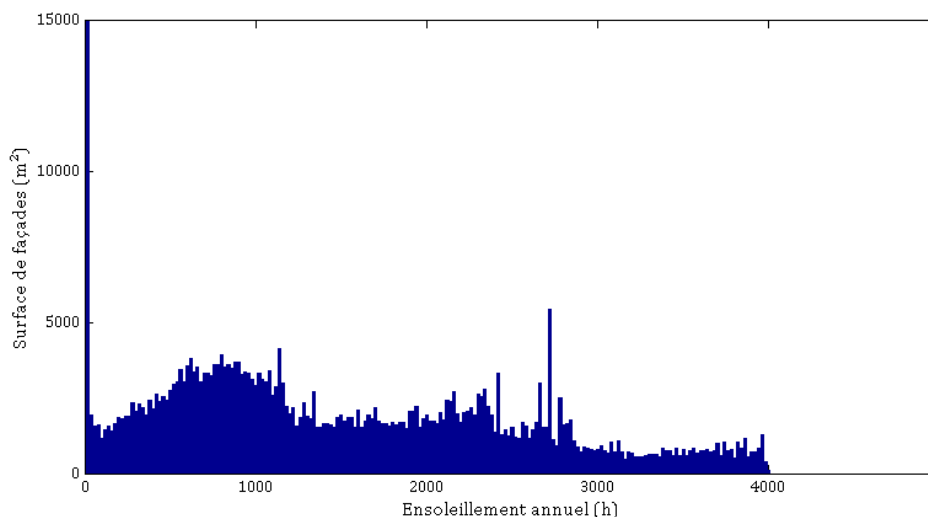


Figure 55: Durée d'ensoleillement annuelle en surface cumulée

La durée d'ensoleillement annuelle reçue par les parois évolue entre 0 et 3990 heures (Figure 55). Rappelons que cet indicateur ne prend en compte que le rayonnement solaire direct. A Cahors, les effets d'ombres portées sont tels qu'un nombre important de façades ne reçoit jamais de rayonnement solaire direct.

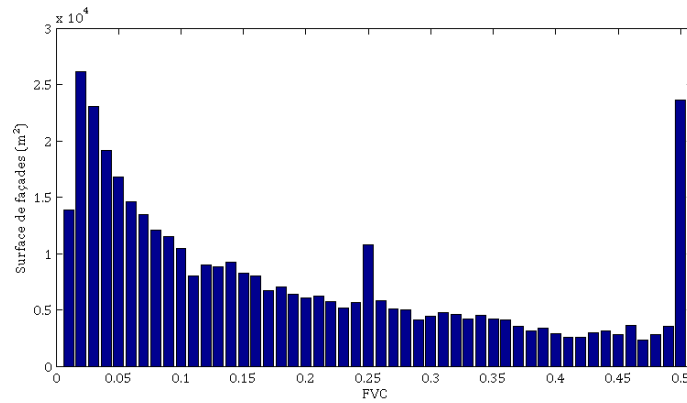


Figure 56: FVC des façades du centre ancien exprimé en surface cumulée

La superficie de façades dont le FVC est inférieur ou égale à 0.1 est de 44.7%, pour les rez-de-chaussée, cela s'élève à 68,6%. La superficie élevée de façades dont le FVC est égal à 0.5 représente majoritairement les bords du centre ancien (Figure 56).

Peu d'auteurs utilisent le FVC à l'échelle de la paroi. Afin d'avoir un facteur de comparaison, nous réalisons entre rapport d'aspect et FVC les calculs sur différentes largeurs de rue canyon avec un rapport Hauteur/Longueur de rue égal à 1 et le point dont est pris l'angle solide est situé au centre de la rue à différentes hauteurs de paroi (Figure 57).

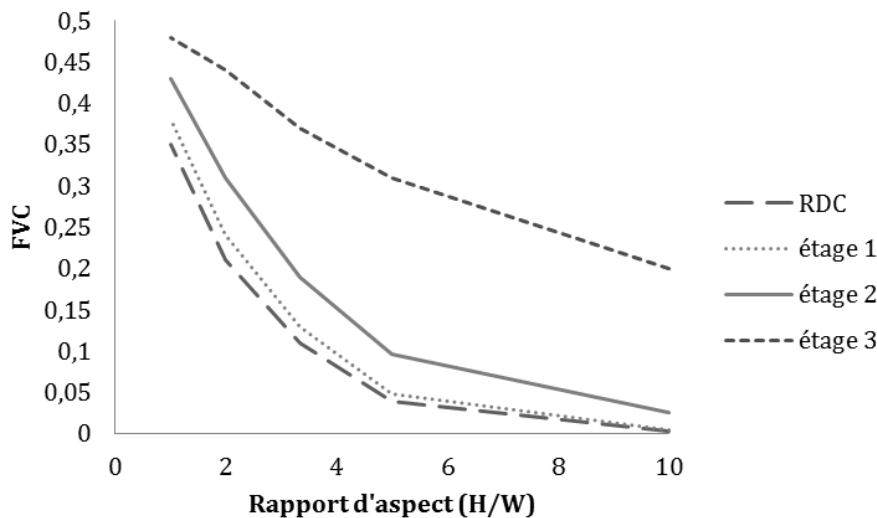


Figure 57: Relation entre le rapport d'aspect et le FVC

La Figure 57 nous montre qu'à l'échelle de la paroi, le FVC est fortement dépendant de la hauteur du point d'étude sur la paroi et que la dispersion des valeurs selon l'étage varie avec le rapport d'aspect.

4.2.3. Réduction de l'étude à un îlot

L'homogénéité des individus nous autorise à réduire notre étude. Afin de savoir si l'îlot que nous allons étudier est bien représentatif du centre ancien nous allons vérifier si la dispersion des valeurs est identique à celle de l'ensemble des individus. De plus, l'ACP ayant montré que l'ensoleillement, l'irradiation et le FVC portaient les mêmes informations, nous pouvons donc vérifier la dispersion des valeurs sur seulement l'un de ces trois indicateurs. L'îlot choisi pour l'étude est l'îlot Chico Mendès, où se trouve les bâtiments que nous avons instrumentés.

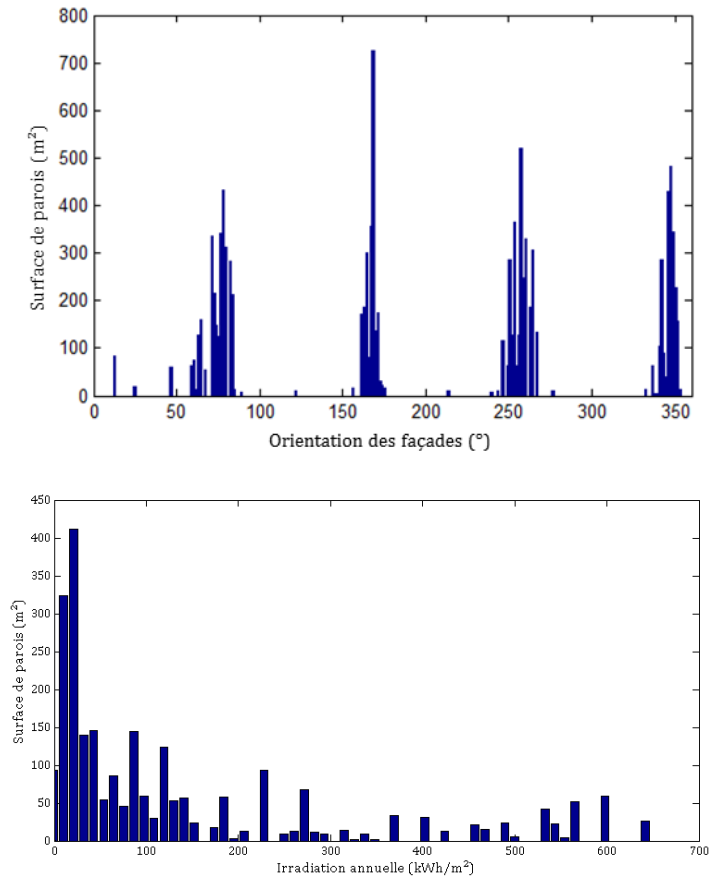


Figure 58: Dispersion des variables orientation et irradiation annuelle de l'îlot Chico Mendès

L'îlot possède bien les mêmes orientations principales. Par contre étant situé au milieu du centre historique et bordé par d'autres îlots, l'irradiation annuelle maximale ne dépasse pas 650kWh/m^2 alors que cette valeur atteint 1040kWh/m^2 sur certaines parois sud du centre ancien (Figure 58 et Figure 59).



Figure 59: Potentiel d'ensoleillement annuel des façades extérieures situées au RDC du centre ancien et de l'îlot représentatif, cartographié à l'aide d'ArcGIS

5. Conclusion

Le centre de Cahors possède un bâti particulièrement compact et contigu, il serait donc désapproprié de traiter les parois comme appartenant à un environnement sans masque environnant.

La comparaison entre le logiciel EnergyPlus avec l'algorithme « avec réflexions » et les mesures expérimentales a montré la justesse du modèle concernant les radiations solaires atteignant la façade. Ce dernier peut donc être utilisé pour offrir des conditions aux limites représentatives au niveau radiatif. Concernant le profil de vent, aucune mesure expérimentale n'a été réalisée, cette valeur sera donc utilisée par la suite avec précaution, en utilisant une échelle méso-climatique.

L'Analyse en Composantes Principales a mis en avant l'homogénéité des indicateurs dans le centre urbain, où aucune typologie de bâti particulière ne se démarque. Il est donc possible, de réduire l'étude numérique à un seul îlot représentatif, afin de diminuer les temps de calculs. Au préalable, il a été vérifié que la distribution des valeurs des indicateurs morphologiques était similaire pour l'îlot choisi et pour le centre ancien dans sa globalité. Le travail sur un îlot représentatif permet de passer d'une étude numérique contenant 1400 bâtiments et plus de 30000 parois à seulement 44 bâtiments et 800 parois.

6. Références

- Abdul Hamid, Akram and Petter Wallentén. 2017. "Hygrothermal Assessment of Internally Added Thermal Insulation on External Brick Walls in Swedish Multifamily Buildings." *Building and Environment* 123:351–62.
- Adolphe, Luc. 2001. "A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities." *Environment and Planning B: Planning and Design* 28(2):183–200.
- Adolphe, Luc. 2002. *SAGACités. Vers Un Système d'Aide À La Gestion Des Ambiances Urbaines*.
- Ahmad, K., M. Khare, and K. K. Chaudhry. 2005. "Wind Tunnel Simulation Studies on Dispersion at Urban Street Canyons and Intersections - A Review." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93(9):697–717.
- Arnfield, A. John. 2003. "Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island." *International Journal of Climatology* 23(1):1–26.
- Barreira, Eva and Vasco P. de Freitas. 2013. "Experimental Study of the Hygrothermal Behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)." *Building and Environment* 63:31–39.
- Blocken, B. and J. Carmeliet. 2004. "A Review of Wind-Driven Rain Research in Building Science." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92(13):1079–1130.
- Blocken, B., G. Dezsö, J. van Beeck, and J. Carmeliet. 2009. "The Mutual Influence of Two Buildings on Their Wind-Driven Rain Exposure and Comments on the Obstruction Factor." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97(5–6):180–96.
- Blocken, Bert and Jan Carmeliet. 2002. "Spatial and Temporal Distribution of Driving Rain on a Low-Rise Building." *Wind and Structures, An International Journal* 5(5):441–62.
- Bonhomme, Marion. 2013. "Contribution À La Génération de Bases de Données Multi-Scalaire et Évolutives Pour Une Approche Pluridisciplinaire de L'énergie Urbaine." Thèse doctorale. INSA de Toulouse.
- Bozonnet, Emmanuel. 2005. "Impact Des Microclimats Urbains Sur La Demandé Energétique Des Bâtiments - Cas de La Rue Canyon." Thèse doctorale. Université de la Rochelle.
- Brown, Michael J., Sue Grimmond, and Carlo Ratti. 2001. "Comparison of Methodologies for Computing Sky View Factor in Urban Environments." *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics* 6.
- Colombert, M., J.L. Salagnac, D. Morand, and Y. Diab. 2012. "Le Climat et La Ville : La Nécessité D'une Recherche Croisant Les Disciplines." *Vertigo* Hors-série: 0–17.
- Compagnon, R. 2004. "Solar and Daylight Availability in the Urban Fabric." *Energy and Buildings* 36(4):321–28.
- Crawley, Drury B. et al. 2001. "EnergyPlus: Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program." *Energy and Buildings* 33(4):319–31.
- Davenport, Ag, Sue Grimmond, Tim R. Oke, and Jon Wieringa. 2000. "Estimating the Roughness of Cities and Sheltered Country." *AMS 12th Conference on Applied Climatology* (August):96–99.

- Defraeye, Thijs, Bert Blocken, and Jan Carmeliet. 2010. "Convective Heat Transfer Coefficients for Exterior Building Surfaces : Existing Correlations and CFD Modelling." 32(0):1–20.
- Delgado, João M. P. Q., Eva Barreira, Nuno M. M. Ramos, and Vasco Peixoto de Freitas. 2013. *Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics*.
- Derome, Dominique, Aytaç Kubilay, Thijs Defraeye, Bert Blocken, and Jan Carmeliet. 2017. "Ten Questions Concerning Modeling of Wind-Driven Rain in the Built Environment." *Building and Environment* 114:495–506.
- Dorer, Viktor et al. 2013. "Modelling the Urban Microclimate and Its Impact on the Energy Demand of Buildings and Building Clusters." Pp. 3483–89 in *13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28*.
- Dubus, Nathalie, Cécile Helle, and Michelle Masson-Vincent. 2010. "De La Gouvernance À La Géogouvernance : De Nouveaux Outils Pour Une Démocratie LOCALE Renouvelée." *L'Espace Politique* 1:23.
- Duby, Georges, André Chédeville, and Jacques Rossiaud. 1980. *Histoire de La France Urbaine, Tome 2 : La Ville Médiévale*. Le Seuil. Paris.
- Duffie, John A. and William A. Beckman. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes Solar Engineering*. edited by Wiley.
- Evins, Ralph, Jonas Allegrini, and Peter Moonen. 2014. "Emulating Site-Specific Wind Flow Information for Use in Building Energy Simulations." *Building Simulation and Optimization (BSO 2014), London, UK*.
- Freitas, S. S. de, E. Barreira, and V. P. de Freitas. 2013. "Quantification of Wind-Driven Rain and Evaluation of Façade Humidification." *Proceedings of the 2nd Central European Symposium on Building Physics (CESBP 2013)* 775–82.
- ISO 15927-3. 2009. *Hygrothermal Performance of Buildings - Calculation and Presentation of Climatic Data -- Part 3: Calculation of a Driving Rain Index for Vertical Surfaces from Hourly Wind and Rain Data*.
- Lateb, M. et al. 2016. "On the Use of Numerical Modelling for near-Field Pollutant Dispersion in Urban Environments - A Review." *Environmental Pollution* 208:271–83.
- Lévy, Albert. 2005. "Formes Urbaines et Significations : Revisiter La Morphologie Urbaine." *Espaces et Sociétés* 122(4):25.
- Loutzenhiser, P. G. et al. 2007. "Empirical Validation of Models to Compute Solar Irradiance on Inclined Surfaces for Building Energy Simulation." *Solar Energy* 81(2):254–67.
- Marciotto, Edson R., Amauri P. Oliveira, and Steven R. Hanna. 2010. "Modeling Study of the Aspect Ratio Influence on Urban Canopy Energy Fluxes with a Modified Wall-Canyon Energy Budget Scheme." *Building and Environment* 45(11):2497–2505.
- Matzarakis, Andreas and Helmut Mayer. 1988. "Dependence of Urban Climate on Urban Morphology." *Screen* 277–82.
- Mertz, Théophile. 2016. "Optimisation Simultanée de La Configuration et Du Dimensionnement Des Réseaux de Chaleur Urbains." Thèse doctorale. Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- Miguet, Francis. 2000. "Paramètres Physiques Des Ambiances Architecturales : Un Modèle

- Numérique Pour La Simulation de La Lumière Naturelle Dans Le Projet Urbain." Thèse doctorale. Université de Nantes.
- Miller, Clayton, Daren Thomas, Jérôme Kämpf, and Arno Schlueter. 2015. "Long Wave Radiation Exchange for Urban Scale Modelling within a Co-Simulation Environment." *Proceedings of CISBAT 2015* (September):871-76.
- Mirsadeghi, M., D. Cóstola, B. Blocken, and J. L. M. Hensen. 2013. "Review of External Convective Heat Transfer Coefficient Models in Building Energy Simulation Programs: Implementation and Uncertainty." *Applied Thermal Engineering* 56(1-2):134-51.
- Nakamura, Y. and T. R. Oke. 1988. "Wind, Temperature and Stability Conditions in an East-West Oriented Urban Canyon." *Atmospheric Environment* 22(12):2691-2700.
- Oke, T. R. 1987. *Boundary Layer Climates*. 2nd ed. edited by Routledge.
- Perez, Richard, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky, and Ronald Stewart. 1990. "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance." *Solar Energy* 44(5):271-89.
- Ratti, Carlo, Dana Raydan, and Koen Steemers. 2003. "Building Form and Environmental Performance : Archetypes , Analysis and an Arid Climate." *Energy and Buildings* 35:49-59.
- Reinhart, Christoph F. and Carlos Cerezo Davila. 2016. "Urban Building Energy Modeling - A Review of a Nascent Field." *Building and Environment* 97:196-202.
- Robinson, Darren. 2011. *Computer Modelling for Sustainable Urban Design: Physical Principles, Methods and Applications*.
- Salat, Serge. 2011. "City and Forms, On Sustainable Urbanism."
- Scellès, Maurice. 1999. *Cahors, Ville et Architecture Civile Au Moyen Âge*.
- Tregenza, P. .. 1987. "Subdivision of the Sky Hemisphere for Luminance Measurements." *Lighting Research Technologie* 19.
- U.S. Department of Energy. 2016. "Engineering Reference, EnergyPlus™ Version 8.6 Documentation." (c):1723.
- Walton, George N. 1983. "Thermal Analysis Research Program Reference Manual." *U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards* 277.

CHAPITRE 5

Transferts de chaleur et de masse

1. Introduction.....	110
2. Transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux	110
2.1. Mécanismes de transfert d'humidité et de stockage dans les matériaux poreux	112
2.1.1. Transfert de vapeur d'eau et d'eau liquide.....	112
2.1.2. Stockage d'humidité.....	114
2.2. Mécanismes de transfert de chaleur.....	114
3. Sélection d'un outil de simulation hygrothermique.....	115
3.1. Présentation du modèle DELPHIN 5.....	115
3.2. Validation et vérification du modèle	115
3.2.1. Validation à l'aide des benchmarks	115
3.2.2. Vérification en comparant avec les dispositifs expérimentaux	116
4. Cas d'étude: Caractéristiques des parois.....	118
4.1. Description des parois.....	118
4.2. Présentation des matériaux	118
4.2.1. Matériaux de la paroi existante.....	118
4.2.2. Matériaux d'isolation.....	119
4.3. Hypothèses du modèle et choix de simplification.....	120
4.4. Conditions aux limites	121
4.4.1. Conditions aux limites intérieures.....	121
4.4.2. Conditions aux limites extérieures	121
4.5. Configurations étudiées	122
5. Résultats et discussion.....	123
5.1. Comparaison des configurations [REF] et [RAD.M]	123
5.2. Comparaison des configurations [RAD.M] et [F.OBST].....	124
5.3. Comparaison des configurations [WDR_ville] et [WDR_fact3]	125
5.4. Influence du coefficient de convection massique [COEF.M]	126
5.5. Comparaison de chacune des configurations pour la paroi Ouest.....	126
6. Conclusion	127
7. Références	129

1. Introduction

L'enveloppe d'un bâtiment correspond à l'interface entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur ; elle est le siège de transferts de chaleur, d'humidité, et d'air.

Une intégration plus réaliste de la paroi à son environnement intérieur comme extérieur est un thème de recherche de plus en plus exploré. Cette intégration est fréquemment obtenue par couplage de différents modèles. Côté intérieur, les modèles HAM (Heat Air and Moisture) sont couplés à une simulation du bâtiment entier (Grau and Rode 2005; Qin et al. 2011) afin d'obtenir des conditions intérieures plus réalistes. Côté extérieur comme présenté au chapitre précédent, des modèles de rayonnements et/ou CFD sont couplés afin de représenter plus fidèlement l'environnement urbain. Sont recherchés aussi bien l'influence de l'environnement sur la paroi que celle de la paroi sur l'environnement (refroidissement évaporatif du milieu urbain, formation d'îlot de chaleur) (Saneinejad et al. 2012).

Pour résumer, l'étude du comportement hygrothermique d'une paroi nécessite aussi bien l'utilisation d'un modèle de transfert couplé adapté, que celle de conditions aux limites représentatives. Dans ce Chapitre, nous nous intéresserons tout d'abord au modèle HAM du logiciel Delphin et sa pertinence pour modéliser une paroi composée de matériaux fortement capillaires et/ou hygroscopiques. Puis seront présentés les résultats d'un couplage non conservatif entre les logiciels EnergyPlus et Delphin dans différentes configurations pour juger de l'importance de prendre en considération l'environnement urbain avoisinant.

2. Transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux

Il n'existe pas une unique façon de décrire les transferts de chaleur et de masse au sein d'un matériau poreux. L'équation mathématique de conservation va dépendre des potentiels moteurs choisis et des hypothèses de simplification.

Le paragraphe suivant propose une rapide description des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux et se focalise sur les équations proposées par le modèle Delphin 5 que nous utilisons dans cette étude.

La plupart des auteurs en Physique du Bâtiment s'appuient sur les équations de conservation de masse et d'énergie dont les principes thermodynamiques en milieu poreux ont été définis par (Luikov 1975; De Vries 1958). Ces modèles macroscopiques, qui permettent de relier les forces thermodynamiques à des coefficients de transport, ont servi de référence pour des modèles développés plus tard (Grunewald 1997; H. M. Künzl and Kiessl 1996; Mendes, Philippi, and Lamberts 2002; Pedersen 1990). En effet, de nombreux travaux s'appuient sur une description des lois de transfert à l'échelle microscopique pour les transposer à l'échelle macroscopique. Même si, comme vu Chapitre 3, la majorité des propriétés hygrothermiques dépend de la porosité (tortuosité, distribution de taille de pores), cette approximation est justifiée car la détermination des propriétés d'un matériau repose sur la mesure de grandeurs macroscopiques résultant de la combinaison de phénomènes à l'échelle microscopique.

Les transferts HAM sont régis par des lois de conservation écrites sous la forme d'équations aux dérivées partielles. Dans ce formalisme, on utilise l'approximation des milieux continus : les propriétés sont moyennées sur des Volumes Élémentaires Représentatifs (VER) représentant le

milieu poreux à l'échelle macroscopique. Cette approche présente donc l'avantage de ne pas nécessiter une description exacte de la configuration des pores (distribution de tailles de pores, tortuosité), difficile à obtenir de façon précise.

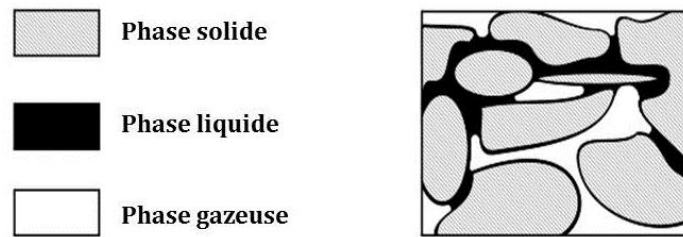


Figure 60: Section d'un Volume Élémentaire Représentatif (VER) contenant les trois phases

La forme générale d'une équation de conservation s'écrit de la façon suivante :

$$\frac{\partial \text{Stockage}}{\partial t} = \nabla \cdot q_A + s \quad (29)$$

avec q_A la densité de flux relative à la quantité A et s un terme source.

En se plaçant à l'échelle du VER, l'équation traduit la variation temporelle d'une quantité A , lorsqu'un flux q_A entre dans le volume, plus un terme source s , le flux étant généré par une différence de densité entre deux VER.

L'ensemble des transferts de masse et de chaleur et leur potentiel moteur sont résumés dans le tableau suivant. Selon les modèles, certains phénomènes sont négligés ou pris en compte de façon simplifiée. Les paragraphes suivants présentent plus en détail les mécanismes de transfert les plus communs, en particulier ceux utilisés dans le logiciel Delphin 5.

TRANSFERT	MECANISME	FORCE MOTRICE
Transfert de chaleur	Conduction	Différentiel de température (de part et d'autre d'un solide)
	Rayonnement	Différentiel de température (entre deux surfaces)
	Convection	Pression totale, différence de masse volumique
	Flux enthalpique	Diffusion de vapeur avec changement d'état et transport liquide avec changement de température
Transfert d'eau sous forme vapeur	Diffusion de gaz	Pression de vapeur
	Transport moléculaire	Pression de vapeur
	Diffusion en solution	Pression de vapeur
	Convection/advection	Gradient de pression totale
Transport d'eau sous forme liquide	Transport capillaire	Succion capillaire
	Diffusion de surface	Humidité relative
	Drainage	Gravité
	Flux hydraulique	Pression différentielle totale
	Electrocinétique	Champ électrique
	Osmose	Concentration d'ions

Tableau 16 : Mécanismes de transport de chaleur et d'humidité et leur potentiel moteur d'après (H. Künzl 1995)

2.1. Mécanismes de transfert d'humidité et de stockage dans les matériaux poreux

2.1.1. Transfert de vapeur d'eau et d'eau liquide

Au sein d'un matériau poreux, à l'échelle microscopique, l'humidité peut être transportée sous forme de vapeur par diffusion et sous forme liquide par capillarité.

La diffusion de vapeur d'eau est décrite par la loi de Fick, selon la perméabilité à la vapeur du matériau D_v .

$$g_{diff} = -D_v(\phi) \nabla p_v(T, \phi) \quad (30)$$

Avec $D_v(\phi) = \frac{D_{v,air}}{\mu(\phi)}$, μ le facteur de résistance à la vapeur d'eau (-), $D_{v,air}$ la perméabilité à la vapeur de l'air (kg.m-1.s-1.Pa-1), étant habituellement définie selon l'équation de (Schirmer 1938)

Cette relation exprime la densité de flux diffusif de vapeur g_{diff} (kg/s) en fonction du gradient de pression partielle de vapeur d'eau Δp_v (Pa) (lui-même fonction de la température T (K) et l'humidité relative Φ (-)). La diffusion de vapeur dans le matériau est influencée par la structure poreuse du matériau et la quantité d'eau présente. La dépendance entre le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur et la teneur en eau s'explique par la réduction de l'espace disponible au fur et à mesure du remplissage des pores.

Les différents domaines hygriques caractéristiques des milieux poreux ont déjà été présentés Chapitre 3. Dans le domaine hygroscopique, le transfert d'humidité est en fait une combinaison de diffusion de vapeur dans les pores, de transfert d'eau liquide par diffusion de surface, qui selon (Krus 1996) apparaît bien avant que la condensation capillaire ne se produise, et d'un transfert par capillarité dans les plus petits pores remplis d'eau.

Néanmoins le phénomène de diffusion de vapeur reste prépondérant. Le transfert global est décrit par un phénomène de diffusion régi par la loi de Fick. La perméabilité à la vapeur tend vers zéro à partir de $\phi = 0.95$ à 0.98 , selon les modèles, lorsque la majorité des pores est remplie d'eau.

Dans le domaine de condensation capillaire ($0.95 \leq \phi \leq 1$), l'humidité est transportée majoritairement par capillarité. La capacité d'un matériau poreux à absorber l'eau liquide dépend donc notamment de la taille de ses pores.

A l'échelle microscopique, l'eau due à la condensation capillaire dans les pores se déplace sous l'effet d'un gradient de pression de liquide capillaire. Le débit massique q_l (kg.s⁻¹) d'un écoulement laminaire au sein d'un pore cylindrique de rayon r (m) est décrit par la loi de Poiseuille :

$$q_l = -\rho_l \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\delta P_l}{\delta x} \quad (31)$$

avec η la viscosité dynamique (N.s.m⁻²) et P_l la pression liquide capillaire (Pa)

Si l'on se place à l'échelle du pore, l'équilibre entre les phases liquide et vapeur est décrit par la loi de Kelvin. Cette loi relie la pression de succion P_{suc} (Pa) à la température T (K) et l'humidité relative Φ (-) en faisant l'hypothèse d'un réseau de pores cylindriques :

$$P_{suc}(\phi) = \frac{\rho_w \cdot R}{M_w} \cdot T \cdot \ln \phi \quad (32)$$

Avec ρ_w la masse volumique de l'eau (g/cm³), R la constante des gaz parfaits (8.31 J.K⁻¹.mol⁻¹), M_w la masse molaire de l'eau (g/mol)

A l'échelle macroscopique, le flux d'eau liquide peut être exprimé par la loi de Darcy. Le terme de gravité est fréquemment négligé au vu de la taille de pores de la majorité des matériaux du génie civil et la pression de succion est considérée comme le seul potentiel moteur, selon une approche conductive en fonction de K_l la conductivité liquide du matériau en (s).

Selon les modèles, le flux d'eau liquide est également exprimé en prenant la teneur en eau ou l'humidité comme potentiel moteur, selon une approche diffusive en fonction de la diffusivité hygrique du matériau en (m²/s).

Parmi les modèles HAM les plus connus, différents potentiels moteurs sont utilisés : nous pourrions citer la teneur en eau pour le modèle de (H. M. Künzl and Kiessl 1996), la pression capillaire pour (Janssen, Blocken, and Carmeliet 2007) et l'humidité relative pour (Tariku, Kumaran, and Fazio 2010).

Chaque potentiel moteur présente des limites. Dans le cas des parois multicouches, la variation de la teneur en humidité utilisée dans le modèle de (De Vries and Philip 1957) présente l'inconvénient de générer une discontinuité entre les différents matériaux qui composent la paroi. Le gradient d'humidité relative ne présente pas cet inconvénient, mais sa définition à travers l'isotherme de sorption présente des limites, car la représentation du domaine super-hygroscopique est alors très limitée (Nicolai 2007).

Dans le logiciel Delphin, le gradient de pression capillaire est donc préféré. Le choix de ce potentiel permet au modèle de converger plus rapidement (Janssen 2014) et de travailler avec la courbe de stockage d'humidité $\theta_l = \theta_l(p_c)$. La définition de cette courbe et son dimensionnement à partir des données expérimentales sont décrits par (A. G. Scheffler, Grunewald, and Häupl n.d.).

Pour modéliser le transfert d'eau liquide dans des matériaux, les deux approches fréquemment utilisées dans les modèles sont donc l'approche diffusive (33) et l'approche conductive (34). Chacune de ces approches ayant ses limites, le logiciel Delphin propose les deux.

$$j_k^{m_l} = -D_l \cdot \frac{\partial m_{w+v}}{\partial x} \quad \text{avec } D_l = D_l(\theta_l) \quad (33)$$

$$j_k^{m_l} = -K_l \cdot \frac{\partial p_l}{\partial x} \quad \text{avec } K_l = K_l(\theta_l) \quad (34)$$

Avec D_l la diffusivité liquide (m²/s), K_l la conductivité liquide (s), p_l la pression liquide (Pa) et θ_l la teneur en eau (m³/m³)

Afin de s'affranchir de la dépendance du maillage, les coefficients de transport sont transformés en potentiel de Kirchhoff ψ (Arfvidsson 1999).

$$j_k^{m_l} = -\frac{\partial \psi_l}{\partial x} \quad \text{avec } \psi_l = \psi_l(\theta_l) \quad (35)$$

Concernant les autres mécanismes de transfert de masse sous forme liquide présentés Tableau 16, les phénomènes liés au drainage, flux hydraulique, électrocinétique et osmose sont tous négligés, car ce sont des phénomènes rares ou analysés dans des cas particuliers dans le domaine du bâtiment.

2.1.2. Stockage d'humidité

Les matériaux poreux comme ceux du bâti ancien ou les isolants bio-sourcés ont la capacité de stocker de l'humidité dans des quantités non négligeables. La teneur en humidité du matériau permet d'évaluer la capacité du matériau à stocker de l'eau en son sein. Cette fonction de stockage peut s'exprimer de différentes façons selon les modèles, soit en fonction de la pression capillaire p_c , soit en fonction de l'humidité relative φ . Dans le deuxième cas, la fonction de stockage se rapporte à une isotherme de sorption (Figure 61).

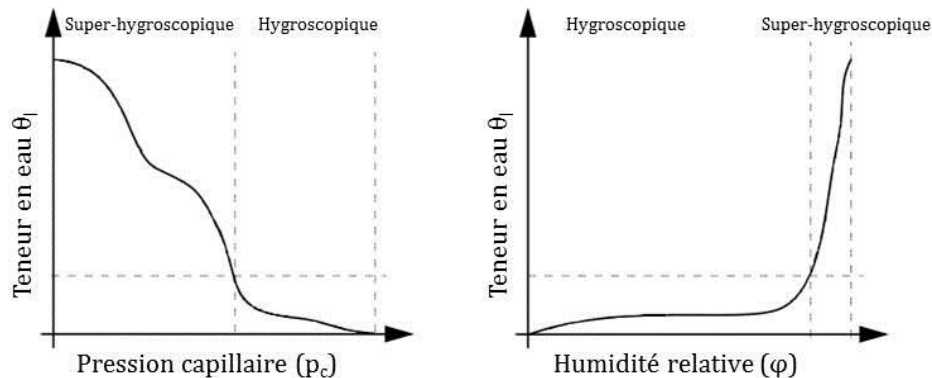


Figure 61 : Fonction de stockage d'humidité : dépendant de la pression capillaire (gauche), dépendant de l'humidité relative telle une isotherme de sorption (droite)

2.2. Mécanismes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur à travers la paroi est déterminé par plusieurs flux. Tous, sauf un, dépendent du transfert de masse qui transporte également de l'énergie. Les transferts par convection et rayonnement sont considérés comme des phénomènes de surface (échange entre l'air et la paroi) (H. Künzle 1995).

Parmi ces mécanismes, seront pris en compte :

- la conduction générée par un gradient de température ;
- le changement de phase de l'eau lié au phénomène d'évaporation-condensation ;
- le transport enthalpique de chaleur par chaleur sensible ;
- le transport enthalpique de chaleur dû au phénomène de sorption.

Le seul flux indépendant est le flux dû à la conduction de chaleur $j_{k,diff}$ (W/m^2). Il est proportionnel au gradient de température et est décrit par la loi de Fourier :

$$j_{k,diff}^Q = -\lambda(w, T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x_k} \quad (36)$$

Avec λ la conductivité thermique en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Selon le type de matériau et la précision du modèle, la conductivité thermique λ peut être fonction de la température et de la teneur en eau, bien que dans la gamme de température utilisée dans la physique du bâtiment, cette dépendance soit négligeable (G. Scheffler 2008).

Comme vu dans le Chapitre 2, la dépendance entre les propriétés des matériaux et la teneur en eau est essentielle pour une simulation fiable des matériaux fortement hygroscopiques.

3. Sélection d'un outil de simulation hygrothermique

3.1. Présentation du modèle DELPHIN 5

Le programme Delphin 5 (Coupled Heat, Air, Moisture and Pollutant Simulation in Building Envelope Systems) a été co-développé de 2004 à 2006 par les universités BEESL/Syracuse University (U.S.A) et Institute for Building Climatology/University of Technology Dresden (TUD) (Allemagne) (Nicolai, Grunewald, and Zhang 2007). Les simulations présentées par la suite ont été réalisées sur la version Delphin 5.8, développée en 2013-2014.

Delphin 5 résout les équations de transferts par la méthode des éléments finis. Les potentiels moteurs utilisés sont le gradient de pression de vapeur P_v (Pa), de pression de gaz P_g (Pa) lors de la prise en compte du phénomène d'advection, la température T (K) et le gradient de pression capillaire (Pa).

Comme présenté au Chapitre 3, dans notre étude, les différences de pression intérieur/extérieur sont relativement faibles dues à la faible étanchéité du bâti ancien, les phénomènes d'advection sont donc négligés.

Les équations de conservation de transfert de chaleur (37) et de masse (38) utilisées sont les suivantes :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left(\lambda \nabla T + K_l (\nabla p_l + \rho_l \cdot g) \cdot c_{p,l} + L_v \cdot \frac{D_{v,air}}{\mu \cdot R_v \cdot T} \cdot f(\theta_g) \cdot \nabla p_v \right) \quad (37)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \left(K_l (\nabla p_l + \rho_l \cdot g) + \frac{D_{v,air}}{\mu \cdot R_v \cdot T} \cdot f(\theta_g) \cdot \nabla p_v \right) \quad (38)$$

Avec $\rho \cdot c_p$ la capacité thermique du matériau humide ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$), K_l le coefficient de conductivité de l'eau liquide (s), p_l la pression liquide (Pa), $c_{p,l}$ la capacité thermique massique de l'eau ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), L_v la chaleur latente de changement d'état ($J \cdot kg^{-1}$), $D_{v,air}$ la perméabilité à l'air ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), $R_v = 461.89 J/kgK$, la constante de vapeur d'eau, p_v la pression de vapeur, w la teneur en humidité (kg/m^3)

$f(\theta_g)$ est une fonction spécifique du matériau, dépendant de la fraction volumique en eau et de la porosité avec $\theta_g = \theta_{por} - \theta_l$.

θ_l fraction volumique d'eau liquide dans le matériau (m^3/m^3) et θ_{por} la porosité du matériau (m^3/m^3)

$\rho_l \cdot g$ représente la gravité qui est ici négligée.

Dans Delphin 5, la conductivité thermique λ est définie comme fonction de la teneur en eau, soit selon la relation linéaire proposée par le modèle (équation (39)), soit en étant définie par l'utilisateur.

$$\begin{aligned} \lambda(\theta_l) &= \lambda_{sec} & \text{si } \theta_l \leq \theta_{80} \\ \lambda(\theta_l) &= \lambda_{sec} + (\theta_l - \theta_{80}) * 0.56 & \text{si } \theta_l \geq \theta_{80} \end{aligned} \quad (39)$$

3.2. Validation et vérification du modèle

3.2.1. Validation à l'aide des benchmarks

Le modèle Delphin 5 a été validé plusieurs fois à l'aide de benchmarks et à travers différents projets de recherches alliant mesures in-situ et simulations hygrothermiques, les détails des validations sont présentés dans (Sontag, Nicolai, and Vogelsang 2013). On citera le Benchmark

HAMSTAD de 1 à 5 (étude des transferts de chaleur, d'air et de masse), la norme EN 15026 :2007 (études des transferts de chaleur et de masse), la norme EN 10211 :2007 (sensibilité du maillage), le test IBK séchage et mouillage (transfert de chaleur et d'humidité focalisé sur le transport capillaire à des teneurs en eau de faibles à moyennes).

La simulation hygrothermique des matériaux bio-sourcés présente plusieurs points critiques. Afin de vérifier que le modèle Delphin est pertinent pour la simulation de notre paroi, nous comparons les valeurs obtenues lors de nos mesures et les valeurs simulées.

3.2.2. Vérification en comparant avec les dispositifs expérimentaux

a) Moisture Buffer Value test (MBV)

Le test du MBV permet d'évaluer la réponse dynamique d'un matériau à des cycles de charge et de décharge en humidité. Les paramètres du dispositif expérimental sont détaillés Chapitre 3. Ici, les caractéristiques hygrothermiques du matériau chaux-chanvre CC1 ont été implémentées dans le logiciel Delphin.

Les valeurs présentées Figure 62 comparent les variations entre les 6^{ème} et 9^{ème} cycles du test. On observe une variation quasi constante entre la charge et la décharge pour la simulation (environ 85g/m²) alors que celle-ci varie entre 115g/m² et 100g/m² du côté expérimental. Ces résultats ne sont pas surprenants, comme souligné par (Berger et al. 2017), il est fréquent que les simulations sous-estiment le procédé d'adsorption et surestiment celui de désorption. Ces différences peuvent être expliquées par la non-prise en compte du phénomène d'hystérésis.

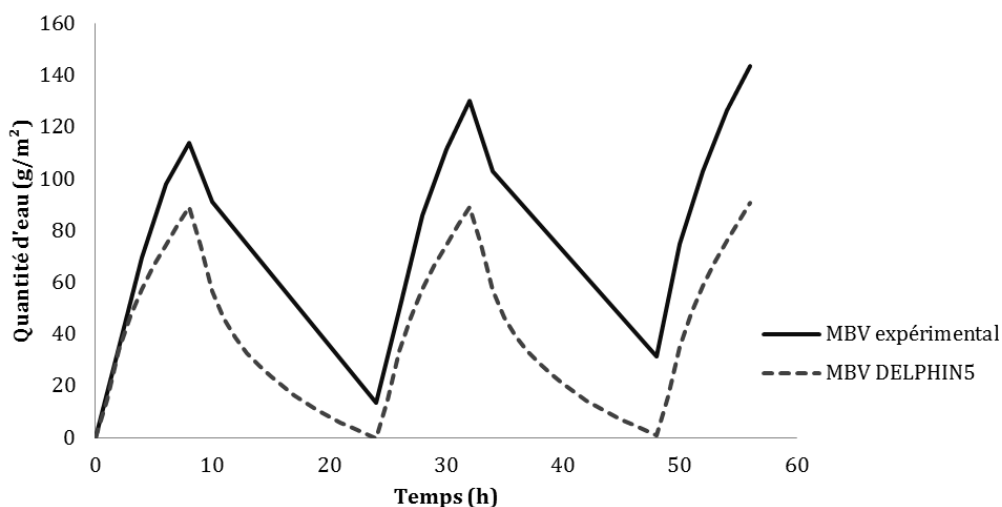


Figure 62 : Comparaison des variations massiques lors du test MBV (modélisé et expérimental)

b) Instrumentation in-situ

Les configurations des parois instrumentées in-situ après rénovation sont simulées avec Delphin5.

Les conditions aux limites ne correspondant pas exactement, la comparaison ne peut donc se faire au pas de temps horaire. Néanmoins, l'amplitude et la moyenne des températures et des humidités relatives intérieures et extérieures étant similaires, au vu de la vitesse des transferts hydriques, la comparaison est cohérente et permet d'obtenir un ordre de grandeur.

Nous comparons les moyennes mensuelles des humidités relatives mesurées et simulées des mois de juillet, août, septembre et octobre 2017 pour les trois parois à l'emplacement du capteur, soit à une profondeur de 5cm de la surface intérieure (Tableau 17).

	Moyenne mensuelle des humidités relatives à 5cm de la surface intérieure (%)					
	Pan de bois (1)		Pan de bois (2)		Brique	
	Mesuré	Simulé	Mesuré	Simulé	Mesuré	Simulé
Juillet	68.06	65.00	65.83	63.02	*	68,51
Août	67.85	63.61	65.01	61.83	*	66,83
Septembre	74.65	70.91	70.62	69.89	76.83	67,26
Octobre	77.49	74.48	72.31	73.76	79.82	68,47

* le chaux-chanvre appliqué à la paroi brique n'a terminé sa phase de séchage qu'à partir de septembre 2017, les valeurs obtenues en juillet et août ne sont donc pas représentatives.

Tableau 17 : Comparaison des humidités relatives mesurées et simulées

Pour chaque paroi, les valeurs mesurées sont légèrement supérieures aux valeurs simulées. La tendance globale est identique, avec une reprise d'humidité pour les mois de septembre et octobre.

Cette comparaison manque de précision, les conditions aux limites étant différentes. Elle permet uniquement d'observer que les tranches d'humidité relative dans laquelle évolue le matériau chaux-chanvre à cette profondeur de paroi sont similaires pour la simulation et l'instrumentation in-situ.

4. Cas d'étude: Caractéristiques des parois

Dans cette partie sont présentées les configurations des parois avec une isolation thermique par l'intérieur qui feront l'objet d'analyses dans le chapitre 6, ainsi que les matériaux les constituant, les conditions aux limites et paramètres choisis, et enfin les configurations étudiées.

4.1. Description des parois

Comme mentionné dans le Chapitre 3, les typologies de parois existant à Cahors sont principalement les murs de pierre calcaire, les murs de briques massives, les murs en « tout-venant » (mélange de pierre et de brique) ainsi que les façades à pan de bois dont le remplissage est composé soit de briques, soit de tuff.

Notre étude numérique porte uniquement sur deux typologies, largement représentées dans le centre ancien : les façades à pan de bois remplissage brique et les façades de brique massive. Ce choix a été confirmé par les travaux réalisés par l'équipe Patrimoine de la Mairie de Cahors.

Les configurations, détaillées dans la Figure 63, représentent une paroi isolée par l'intérieur soit à l'aide d'un isolant écologique, le chaux-chanvre, soit à l'aide d'un isolant traditionnel, la laine minérale.

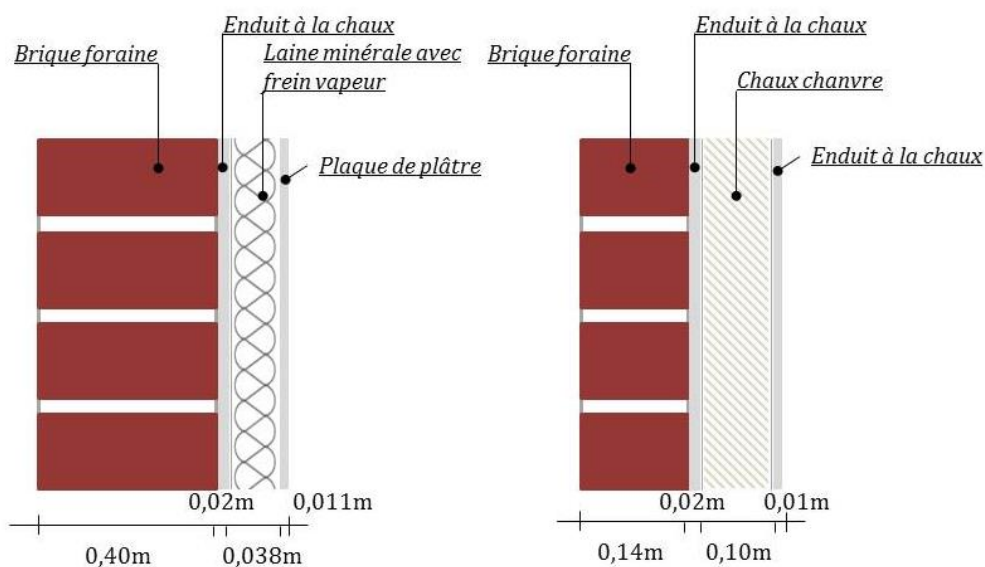


Figure 63 : (a) Mur brique configuration laine de verre, (b) Mur pan de bois configuration chaux-chanvre

Les 800 parois des 44 bâtiments de l'ilot représentatif sont simulées, avec pour chaque paroi, les deux typologies constructives combinées aux deux systèmes isolants.

4.2. Présentation des matériaux

4.2.1. Matériaux de la paroi existante

Les parois existantes sont composées de briques foraines recouvertes en intérieur par deux centimètres d'enduit à la chaux aérienne, ceci étant l'un des traitements de finition d'usage dans de nombreux appartements à Cahors.

Comme présenté au Chapitre 3, différentes briques cadurciennes ont été caractérisées au cours de cette thèse. Les résultats de la caractérisation servent de données d'entrée du modèle Delphin 5.

Afin de limiter le nombre de simulation, seule une des briques caractérisées sera utilisée dans les simulations. Nous choisissons de nous placer dans le scénario le plus défavorable, c'est-à-dire la brique dont les propriétés favorisent l'avancée du front d'humidité vers l'intérieur de la paroi.

Selon (Vereecken et al. 2015), le transport de masse à travers la paroi est facilité par deux caractéristiques hygriques : le coefficient d'absorption capillaire, A_{cap} (kg/(m²s)) et la capacité de stockage d'eau capillaire, θ_{cap} (kg/m³).

Un coefficient d'absorption capillaire élevé facilite l'adsorption d'eau après un évènement pluvieux et plus la capacité de stockage capillaire sera élevée, plus la quantité d'eau présente dans le matériau sera importante. E.Vereecken propose un ratio ($A_{cap}/(\theta_{cap}.d)$) appelé facteur de pénétration d'humidité, (avec d l'épaisseur de la paroi) qui caractérise la facilité du front d'humidité à se déplacer vers la paroi intérieure chauffée. Plus ce facteur est élevé, plus le risque de transfert de masse vers l'intérieur de la paroi sera élevé. D'après le Tableau 18, la brique présentant les caractéristiques les plus défavorables est celle du 16^{ième} siècle et sera utilisée dans les simulations. Face aux singularités existant dans la paroi dues à la forte hétérogénéité des parois anciennes, le choix de travailler avec le cas le plus défavorable paraît judicieux pour assurer la durabilité de la paroi.

	Brique 16 ^{ième} siècle	Brique 18 ^{ième} siècle
Coefficient d'absorption capillaire, A_{cap} (kg/(m ² s))	0.282	0.115
Capacité de stockage d'eau capillaire, θ_{cap} (kg/m ³)	275.6	248.2
A_{cap}/θ_{cap}	$1.023 \cdot 10^{-3}$	$0.433 \cdot 10^{-3}$

Tableau 18 : Propriétés hygriques des briques influençant le front de pénétration d'humidité

L'enduit de finition est un enduit à la chaux aérienne dont les caractéristiques proviennent de la base de données du logiciel Delphin 5.

4.2.2. Matériaux d'isolation

Afin de pouvoir comparer deux cas d'isolation thermique par l'intérieur, deux configurations sont étudiées :

- une isolation classique avec une couche de laine minérale superposée d'une plaque de plâtre, qui est encore aujourd'hui le système le plus fréquemment rencontré. Cet isolant est revêtu d'un surfacage Kraft, comme pour la majorité des laines minérales rencontrées dans le commerce,

- une isolation à base d'un matériau bio-sourcé, le chaux-chanvre banché, permettant ainsi de comparer les résultats de la caractérisation et de l'instrumentation in-situ à ceux des simulations numériques.

Le Tableau 19 résume les caractéristiques hygrothermiques principales des différents matériaux utilisés pour la simulation.

	Mesuré au laboratoire		Base de données matériaux du logiciel DELPHIN 5		
	Brique 16 ^{ième}	Chaux chanvre	Laine de roche [1]/papier Kraft	Plaque de plâtre	Enduit chaux
Masse volumique (kg/m ³)	1616	440	37/120	850	1650
Conductivité thermique sèche (W/(K.m))	0.49	0.07	0.04/0.42	0.20	0.67
Capacité thermique (J/(kgK))	800	1000	840/1500	850	840
Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (-)	9	6.5	1/3000	10	8.9
Coefficient de capillarité (kg.m ⁻² .s ^{-0.5})	0.28	0.196	0/1.10 ⁻⁵	0.27	0.22

[1] (Gnip, Sigitas, and Keršulis 2006)

Tableau 19 : Propriétés thermiques et hygriques des matériaux utilisés dans le logiciel Delphin 5

4.3. Hypothèses du modèle et choix de simplification

Bien que la façade soit en réalité composée d'un ensemble maçonné brique et mortier de chaux, les calculs hygrothermiques seront réalisés sur une paroi considérée comme homogène. Dans une paroi maçonnée, les propriétés des matériaux diffèrent et le contact entre eux n'est jamais parfait. Dans notre cas, le mortier de chaux aérienne et la brique présentant des propriétés hygriques relativement similaires, l'approche est alors simplifiée à des transferts 1D permettant de réduire significativement le temps de calcul de chaque simulation. L'initialisation de la température et de l'humidité relative sont respectivement 20°C et 80 HR%, nous n'étudions donc pas les 6 premiers mois afin de s'affranchir des effets des paramètres d'initialisation.

Les modélisations sont donc réalisées sur des configurations de parois en 1D sur lesquelles on applique les hypothèses suivantes :

- les matériaux utilisés sont considérés comme isotropes (l'anisotropie peut être simulée avec la version Delphin 6) ;
- les phénomènes de remontée capillaire sont négligés, même si le logiciel Delphin 5 offre la possibilité de prendre ce phénomène en compte ;

- l'effet de l'hystérésis est négligé ainsi que la gravité ;
- les conditions aux limites sont appliquées sur les surfaces intérieure et extérieure de manière uniforme (i.e. pas de gradient de température lié à la hauteur de la paroi) ; les conditions sur la surface supérieure et inférieure sont adiabatiques concernant le flux de chaleur et de zéro flux concernant le flux de masse ;
- aux interfaces entre deux matériaux, le contact est considéré comme parfait, aucune résistance de contact n'est prise en considération ;
- parmi les propriétés thermiques du matériau, seule la conductivité thermique est affectée par la teneur en humidité, les autres propriétés restent constantes.

4.4. Conditions aux limites

4.4.1. Conditions aux limites intérieures

Le choix des conditions hygrothermiques à l'intérieur du local impacte fortement les résultats. Les conditions aux limites intérieures sont définies par les normes (EN 15026: 2007) et (EN13788: 2000).

Dans le cadre de cette étude, l'approche de l'EN 15026 est choisie pour l'évolution de la température d'air intérieur. L'humidité relative intérieure est définie en fonction de la température et de l'humidité relative extérieure selon la norme EN 13788, classe 2 (fort taux d'occupation) pour un climat continental.

4.4.2. Conditions aux limites extérieures

Le Chapitre précédent a confirmé que la morphologie urbaine modifie les différentes radiations environnantes ainsi que le profil de vent à proximité de la façade. Il a par ailleurs été démontré que le logiciel EnergyPlus présentait des résultats recevables pour représenter les radiations reçues par la paroi lorsque celle-ci est intégrée à son environnement urbain. Toutes les influences thermiques extérieures sont donc réunies en une température d'air de surface équivalente obtenue en sortie des simulations d'EnergyPlus. Cette température équivalente est par la suite appliquée en conditions de Dirichlet comme proposé par (Hagentoft 2001) et utilisé dans la littérature par (Qin et al. 2011; Steeman et al. 2010).

Nous appliquons donc une méthode de couplage non conservative entre les deux modèles, les conditions aux limites obtenues par le premier modèle (EnergyPlus) sont appliquées comme conditions aux limites imposées dans le deuxième modèle (Delphin).

La pluie et les échanges massiques sont définis par le logiciel Delphin, tel que présenté Chapitre 4.

La Figure 64 résume les différentes conditions aux limites et les outils permettant de les définir ainsi que de les faire évoluer.

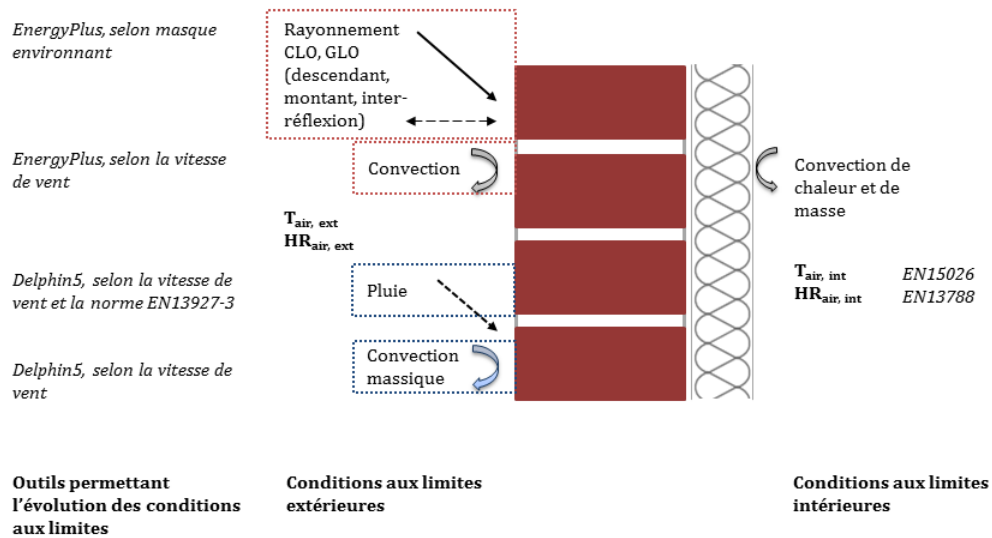


Figure 64: Conditions aux limites et outils utilisés en relation pour les définir et en modifier la magnitude

4.5. Configurations étudiées

L'objectif premier est d'observer l'intérêt de prendre en compte ou non la morphologie urbaine au niveau des conditions aux limites extérieures.

L'étude de la morphologie du centre de Cahors nous permet de focaliser l'étude sur quatre façades représentatives du centre ancien selon les quatre orientations principales de la ville (81°, 169°, 258°, 350°) avec un FVC de 0.02, correspondant par exemple à un deuxième étage dans une rue canyon au rapport d'aspect de $H/W=10$.

Comme vu au Chapitre précédent, la morphologie urbaine influence principalement les radiations reçues par la paroi ainsi que le profil de vent à proximité de la paroi modifiant ainsi le coefficient de convection (chaleur et massique) ainsi que la quantité d'eau liquide reçue par la paroi lors d'évènements pluvieux.

Nous étudions donc plusieurs configurations (Figure 65), où les conditions aux limites extérieures sont d'abord modifiées unes à unes, puis de façon combinée :

- une configuration de référence [REF] : soit une paroi dans un environnement sans masque environnant, avec une rugosité du profil de vent « campagne » qui correspond aux données directement extraites du fichier météorologique extrapolé grâce Météonorm ;
- une configuration de paroi avec des masques environnants appelée [RAD.M], modifiant uniquement les radiations reçues par la paroi, c'est-à-dire les rayonnements GLO et CLO descendants, ainsi que les inter-réflexions ;
- une configuration de paroi avec un facteur d'obstruction de $O=0.2$ pour la pluie battante, selon la norme EN 13927-3, appelée [F.OBST], correspondant à une distance entre 4 et 8m entre la paroi et l'obstruction ;
- deux configurations de paroi soumise à différents profils de vent, modifiant uniquement la pluie battante, correspondant à une réduction (rugosité centre-ville) et à une accélération (facteur 3) du profil de vent, respectivement appelées [WDR_ville] et [WDR_fact3] ;

- une configuration [COEF.M] correspondant à l'utilisation d'un coefficient convectif massique adaptatif selon le profil de vent.

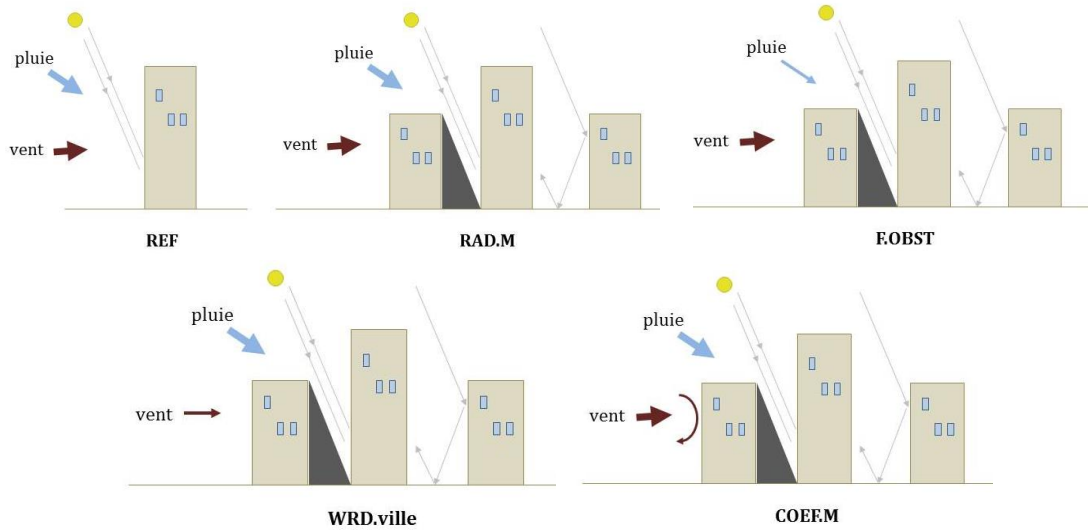


Figure 65 : Schéma des différentes configurations étudiées

5. Résultats et discussion

5.1. Comparaison des configurations [REF] et [RAD.M]

Dans un premier temps, les quatre orientations principales des murs brique et pan de bois sont testées avec et sans masque environnant pour observer l'influence des radiations reçues par la paroi (Figure 66).

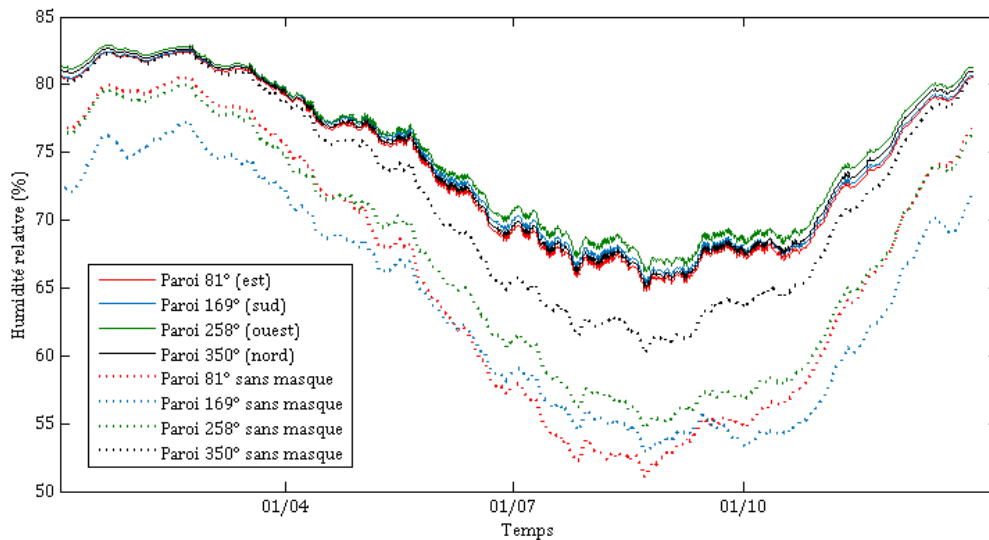


Figure 66 : Humidité relative à l'interface (mur brique/chaux-chanvre), configurations avec et sans masque environnant

Pour chacune des orientations, on observe une différence claire entre la configuration avec masque et la configuration sans masque. Cette différence est particulièrement marquée pour l'orientation sud. La configuration de référence présente donc des résultats d'humidité relative plus faibles pouvant amener à sous-estimer le risque d'humidité élevée entre l'isolant et le mur.

5.2. Comparaison des configurations [RAD.M] et [F.OBST]

Nous nous plaçons à présent dans une configuration avec masque modifiant seulement les radiations solaires et dans cette même configuration en ajoutant un facteur d'obstruction de 0.2, représentant une diminution de la quantité de pluie battante atteignant la paroi (Figure 67).

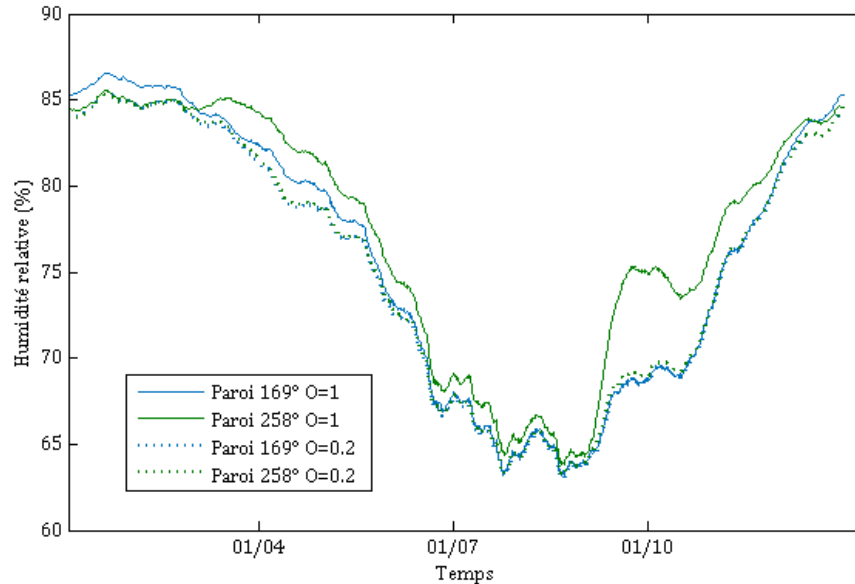


Figure 67 : Humidité relative à l'interface (mur pan de bois/chaux-chanvre), configurations avec un facteur d'obstruction $O=0.2$ et $O=1$ selon la norme EN 13927-3

Lorsque le facteur d'obstruction est appliqué, les variations de l'humidité relative à l'interface sont quasiment similaires pour les deux orientations, soulignant l'influence de la pluie sur le comportement hygrothermique de l'interface pour ce mur à pan de bois.

5.3. Comparaison des configurations [WDR_ville] et [WDR_fact3]

Nous comparons ici deux configurations représentant une réduction et une accélération de la vitesse du vent (Figure 68).

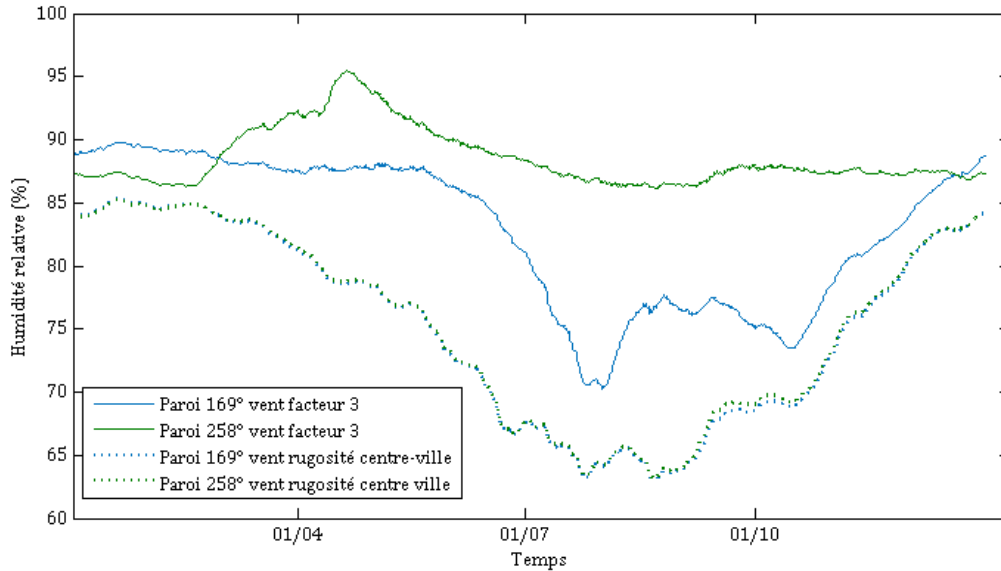


Figure 68 : Humidité relative à l'interface (mur pan de bois/chaux-chanvre), configurations selon différents profils de vents

La vitesse de vent facteur 3 met en exergue la différence entre les deux orientations. La rose des vents présentée Figure 69 est un bon outil pour appréhender les différences de risque de pluie battante entre les parois pour une localisation particulière.

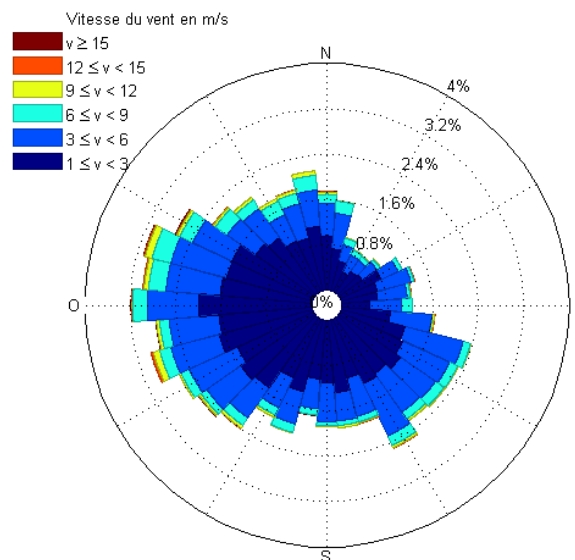


Figure 69 : Rose des vents selon les données du fichier Météonorm pour Cahors

Nous pouvons également observer qu'à l'inverse, la réduction de la vitesse annule les différences entre les deux orientations, les deux parois recevant quasiment la même irradiation solaire, au vu du FVC très faible.

5.4. Influence du coefficient de convection massique [COEF.M]

Nous étudions ici l'influence d'un coefficient de convection massique adaptatif avec la vitesse du vent (Figure 70).

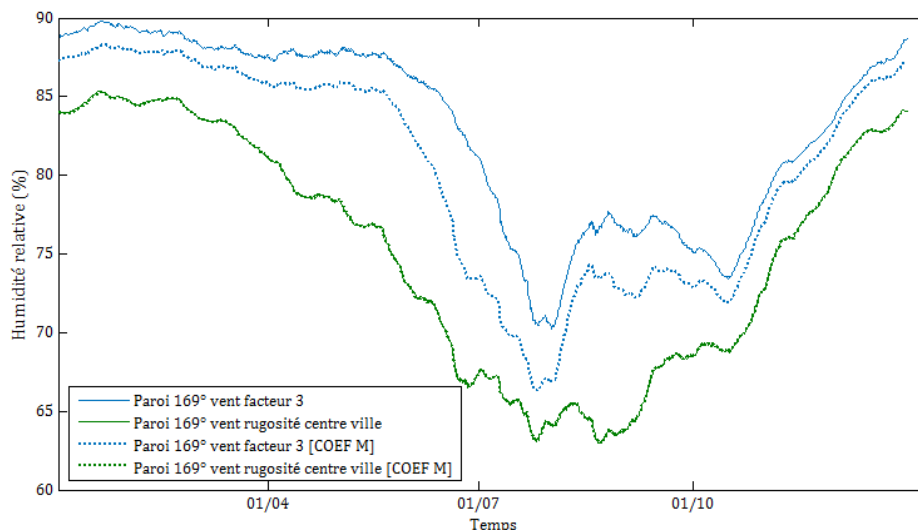


Figure 70: Humidité relative à l'interface (mur pan de bois/chaux-chanvre), configurations avec et sans coefficient convectif adaptatif

La prise en compte de la vitesse du vent au sein du coefficient de convection massique montre que pour des vitesses de vent élevées, celui-ci va contribuer au séchage de la paroi, sans pour autant contrebalancer l'effet de l'augmentation de la quantité de pluie apportée par la pluie battante. Pour des vitesses de vents faibles, l'influence de ce coefficient est négligeable. L'adaptation de l'humidité relative de l'air aux effets du milieu urbain est ici négligée, mais pour des rues très peu ventées et sans rayonnement solaire, l'humidité redescendra plus lentement après des événements pluvieux et pourrait d'autant plus ralentir le séchage de la paroi.

5.5. Comparaison de chacune des configurations pour la paroi Ouest

La Figure 71 regroupe les différentes configurations de paroi testées pour le mur pan de bois orientation 258° (ouest). Chaque paroi est comparée à la configuration de référence selon le nombre d'heures où l'humidité relative à l'interface dépasse 80% (ou 90% si le profil d'humidité dépasse 80% sur l'année entière).

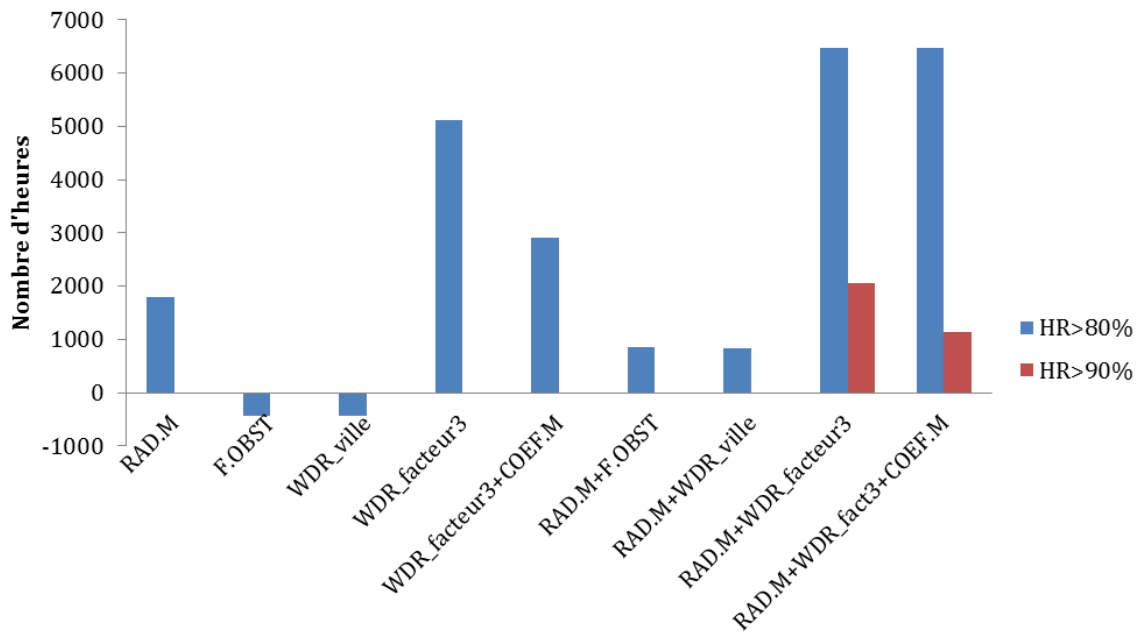


Figure 71: Différence de nombre d'heures où HR>80% entre la configuration de référence (sans masque) et différentes configurations pour la paroi 258° (Ouest), mur pan de bois.

Cet histogramme cumulé permet d'observer rapidement l'influence positive ou négative des différentes configurations. La morphologie urbaine, en modifiant l'accès au rayonnement solaire à un effet négatif, ou, au contraire en réduisant potentiellement la vitesse de vent et en créant des obstructions à la pluie battante peut avoir un effet positif. Néanmoins, cet effet positif ne contrebalance pas dans ce cas d'étude en particulier, les effets de la réduction de l'accès aux rayonnements solaires.

6. Conclusion

Ce chapitre a permis la mise en place et la validation d'une méthodologie permettant de prendre en compte la morphologie urbaine au niveau des conditions aux limites appliquées dans les simulations hygrothermiques de la paroi (Figure 72).

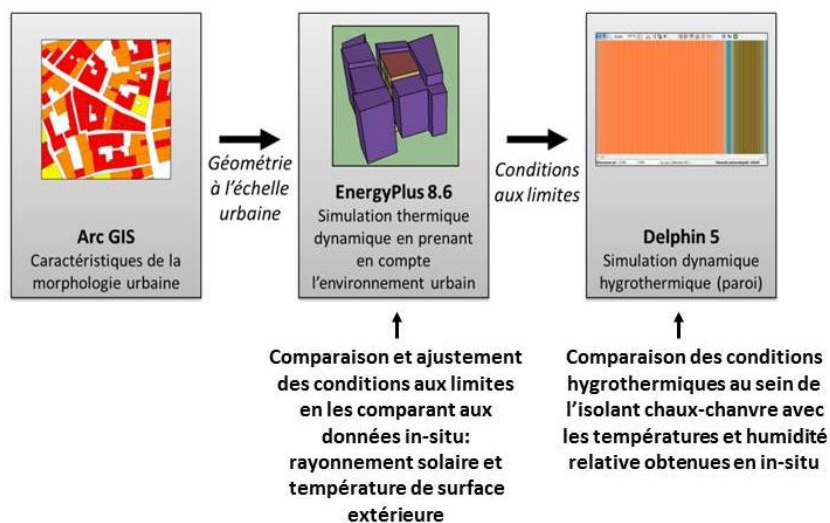


Figure 72: Méthodologie permettant la prise en compte de la morphologie urbaine dans Delphin 5

Grâce à l'étude d'un cas précis, l'influence de la modification des flux radiatifs et du profil de vent par la morphologie urbaine sur la réponse hygrothermique de la paroi a pu être appréhendée.

Plusieurs observations peuvent être mentionnées :

- premièrement, comme souligné par E.Vereecken, dans sa définition du facteur de pénétration d'humidité, l'épaisseur de la paroi est un facteur clé. Les parois en pan de bois étant plus fines, elles sont également plus sensibles aux conditions aux limites extérieures ;
- au niveau des radiations reçues par la paroi, les masques modifient la quantité de radiations reçue par la paroi. Dans ce cas précis, les radiations directes et diffuses descendantes sont diminuées et l'étroitesse de la rue supprime quasiment toutes les inter-réflexions en provenance du sol, supprimant également une large part des inter-réflexions. La réduction de l'accès aux rayonnements solaires augmente l'humidité relative à l'interface ;
- la pluie battante est l'une des sources d'humidité principale en provenance de l'extérieur. La quantité d'eau atteignant la paroi va dépendre des coefficients d'obstruction et d'exposition au vent qui peuvent tous deux être définis en fonction de la morphologie urbaine.

De façon générale, nous pouvons conclure que les conditions aux limites extérieures doivent être soigneusement choisies car elles modifient le comportement hygrothermique de l'interface entre le mur et l'isolant, particulièrement dans le cas de paroi fine telle qu'une typologie pan de bois.

Cette étude étant réalisée pour un cas précis, il est donc intéressant d'avoir une vision plus globale de l'impact de la morphologie urbaine sur le comportement hygrothermique de la paroi. De plus, seule la variation d'humidité relative est ici observée. Sachant que la modification de l'hygrométrie de la paroi peut avoir des conséquences sur la durabilité de la paroi, une étude en différents points de la paroi ainsi que des indicateurs de durabilité sont étudiés Chapitre 6.

7. Références

- Arfvidsson, Jesper. 1999. "A New Algorithm to Calculate the Isothermal Moisture Penetration for Periodically Varying Relative Humidity at the Boundary." *Nordic Journal of Building Physics* 2:11.
- Berger, J., T. Busser, D. Dutykh, and N. Mendes. 2018. "On the Estimation of Moisture Permeability and Advection Coefficients of a Wood Fibre Material Using the Optimal Experiment Design Approach." *Experimental Thermal and Fluid Science* 90:246–59.
- EN13788: 2000. "Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements – Internal Surface Temperature to Avoid Critical Surface Humidity and Interstitial Condensation – Calculation Methods."
- EN 15026: 2007. "EN 15026 : Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements - Assessment of Moisture Transfer by Numerical Simulation." (i):0–90.
- Gnip, Ivan, Vejelis Sigitas, and Vladislovas Keršulis. 2006. "Isotherms of Sorption and Desorption of Water Vapour By Thermal Insulating Mineral Wool Products." 6.
- Grau, Karl (Danish Building Research Institute) and Carsten (Technical University of Denmark) Rode. 2005. *Whole Building Ham Simulation with a Multizone Air Flow Model*.
- Grunewald, John. 1997. "Diffusiver Und Konvektiver Stoff- Und Energietransport in Kapillarporösen Baustoffen." PhD Thesis
- Hagentoft, Carl-Eric. 2001. *Introduction to Building Physics*. Lund: Studentlitteratur.
- Janssen, Hans. 2014. "Simulation Efficiency and Accuracy of Different Moisture Transfer Potentials." *Journal of Building Performance Simulation* 7(5):379–89.
- Janssen, Hans, Bert Blocken, and Jan Carmeliet. 2007. "Conservative Modelling of the Moisture and Heat Transfer in Building Components under Atmospheric Excitation." 50:1128–40.
- Krus, Martin (Fraunhofer-Institut für Bauphysik). 1996. "Moisture Transport and Storage Coefficient of Porous Mineral Building Materials." PhD Thesis
- Künzel, Hartwig. 1995. "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One - and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters ." Fraunhofer Institute of Building Physics.
- Künzel, Hartwig M. and Kurt Kiessl. 1996. "Calculation of Heat and Moisture Transfer in Exposed Building Components." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40(1):159–67.
- Luikov, A. V. 1975. "Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies (Review)." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18(1):1–14.
- Mendes, N., P. C. Philippi, and R. Lamberts. 2002. "A New Mathematical Method to Solve Highly Coupled Equations of Heat and Mass Transfer in Porous Media." 45:509–18.
- Nicolai, Andreas. 2007. "Modeling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Unsaturated Porous Building Materials." PhD Thesis. Syracuse University.
- Nicolai, Andreas, John Grunewald, and Jianshun Jensen Zhang. 2007. "Recent Improvements in HAM Simulation Tools: Delphin 5 / CHAMPS-BES." *Conference Proceedings of 12th Symposium of Building Physics* (January 2016):866–76.

- Pedersen, Carsten Rode. 1990. "Combined Heat and Moisture Transfer in Build Constructions." PhD Thesis. Technical University of Denmark.
- Qin, Menghao, George Walton, Rafik Belarbi, and Francis Allard. 2011. "Simulation of Whole Building Coupled Hygrothermal-Airflow Transfer in Different Climates." *Energy Conversion and Management* 52(2):1470–78.
- Saneinejad, Saba, Peter Moonen, Thijs Defraeye, Dominique Derome, and Jan Carmeliet. 2012. "Coupled CFD, Radiation and Porous Media Transport Model for Evaluating Evaporative Cooling in an Urban Environment." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104–106:455–63.
- Scheffler, Gregor, John Grunewald, and Peter Häupl. n.d. "Calibration of an Engineering Model of Hygrothermal Material Characteristics." 1–18.
- Scheffler, Gregor. 2008. "Validation of Hygrothermal Material Modelling Under Consideration of the Hysteresis of Moisture Storage." PhD Thesis. Dresden University of Technology.
- Schirmer, R. 1938. "Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luftgemischen Und Die Verdampfungsgeschwindigkeit, VDI Beiheft Verfahrenstechnik 2." 170–77.
- Sontag, Luisa, Andreas Nicolai, and Stefan Vogelsang. 2013. "Validierung Der Solverimplementierung Des Hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin." 1–80.
- Steehan, M., A. Janssens, H. J. Steeman, M. Van Belleghem, and M. De Paepe. 2010. "On Coupling 1D Non-Isothermal Heat and Mass Transfer in Porous Materials with a Multizone Building Energy Simulation Model." *Building and Environment* 45(4):865–77.
- Tariku, Fitsum, Kumar Kumaran, and Paul Fazio. 2010. "International Journal of Heat and Mass Transfer Transient Model for Coupled Heat , Air and Moisture Transfer through Multilayered Porous Media." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53(15–16):3035–44.
- Vereecken, Evy, Liesje Van Gelder, Hans Janssen, and Staf Roels. 2015. "Interior Insulation for Wall Retrofitting - A Probabilistic Analysis of Energy Savings and Hygrothermal Risks." *Energy and Buildings* 89:231–44.
- De Vries, D. and J. Philip. 1957. "Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients." *Transactions, American Geophysical Union* 38(2).
- De Vries, D. A. 1958. "Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media." *Transactions, American Geophysical Union* 39(5):909–16.

CHAPITRE 6

Etude de la durabilité de la paroi

1. Introduction.....	132
2. Croissance de moisissures et évaluation du risque.....	132
3. Choix du modèle, de l'indicateur et des paramètres.....	135
3.1. Modèle VTT.....	135
3.2. Choix des différents indicateurs.....	136
4. Résultats et analyse.....	139
4.1. Identifications des variables représentatives.....	139
4.1.1. Etude de la typologie pan de bois.....	140
4.1.2. Etude de la typologie brique.....	142
4.2. Facteur de risques en fonction de l'orientation et de la typologie de paroi.....	143
4.2.1. Etude du facteur de risque à l'interface.....	143
4.2.2. Etude des facteurs de risque M05 et M10B.....	149
4.2.3. Discussion.....	152
4.3. Cartographie des résultats.....	153
5. Conclusion	154
6. Références	156

1. Introduction

La rénovation thermique du bâti historique peut entraîner une rupture de l'équilibre hygrothermique des parois ainsi qu'une modification des ambiances intérieures. En conséquence de ce déséquilibre, des bio-dégradations peuvent apparaître en surface ou à l'interface des matériaux conduisant alors à des désordres d'ordres esthétique, sanitaire voire structurel.

Bien souvent, le simple terme d'isolant à « base de matériaux naturels » porte préjudice aux isolants bio-sourcés car ces matériaux ont la réputation d'être plus facilement soumis à la bio-dégradation. Une étude poussée concernant le risque de croissance de moisissures est menée dans ce Chapitre afin de pouvoir évaluer les facteurs de risque en fonction du matériau d'isolation utilisé (chaux-chanvre ou laine minérale), de l'emplacement de la paroi dans l'environnement urbain, ainsi que de la typologie de paroi (pan de bois ou brique). Nous cherchons ainsi à comprendre où risque de se produire la bio-détérioration et sous quelles conditions. L'identification des causes de ce risque permet d'apporter une réponse adaptée en termes de rénovation thermique sans compromettre la durabilité de la paroi.

2. Croissance de moisissures et évaluation du risque

L'atteinte d'une teneur en eau critique en surface ou à l'interface des matériaux de construction peut avoir un large impact sur la durabilité du bâti (H. Viitanen et al. 2010).

Dans le cadre de notre étude, la question de la durabilité des matériaux est primordiale. Primordiale, car les bâtiments à rénover concernent du patrimoine historique et cela soulève donc des problématiques aussi bien esthétiques que structurelles. En effet, la littérature relève différentes pathologies suite à la modification de l'équilibre hygrothermique : développement de mousses sur les façades extérieures (Barreira and de Freitas 2013), risque de pourrissement des planchers encastrés suite à l'augmentation de la teneur en eau (Guizzardi, Carmeliet, and Derome 2015), apparition d'une condensation interstitielle (Ibrahim et al. 2014) ou difficulté de séchage de l'isolant dans le cas de mise en œuvre à l'état humide, pour n'en citer que quelques-unes.

La croissance de moisissures est l'un des premiers signes d'une dégradation biologique causée par une humidité excessive. Le stade d'apparition de moisissure en lui-même ne présente pas de risque, mais il représente un excellent critère pour valider la performance hygrothermique d'une paroi, car il indique le premier stade d'un excès de teneur en eau conduisant à d'autres types de détérioration.

Une fois que la moisissure s'est développée, des problèmes esthétiques, structurels mais également sanitaires peuvent apparaître car celle-ci peut avoir des conséquences néfastes sur la santé de l'occupant. Le risque de développement d'un asthme ou encore d'allergies est accru lors d'un contact répété à un environnement toxique (ANSES 2016; Edward and Baughman 1996).

La croissance de moisissures est un phénomène complexe devant réunir plusieurs paramètres nécessaires à son apparition et à son développement. La température, l'humidité relative, mais également le type de support (pH, rugosité de la surface, hygroscopicité du matériau) ou les radiations UV sont autant de paramètres influant sur le développement des moisissures

(Schmidt 2006; Hannu Viitanen 2001). La moisissure a besoin d'un minimum de substrat organique pour se développer et colonise facilement les matériaux ligno-cellulosiques, mais elle peut également se développer sur des matériaux synthétiques et à base minérale (Pasanen et al. 2000). De plus, certains matériaux considérés comme résistants à leur état neuf, peuvent accumuler des matières organiques décomposables servant alors de nutriments aux micro-organismes (Grant et al. 1989). La Figure 73 montre l'apparition de dégradations biologiques sur différents supports à base minérale, due au rassemblement de conditions favorables de développement.



Figure 73: Observations de micro-organismes à Cahors : Développement de moisissures sur la surface intérieure du mur à proximité du chaux-chanvre quelques semaines après la pose (gauche). Mousse en partie basse de la façade extérieure (droite).

La durée d'exposition du matériau à des conditions favorables est également l'un des facteurs déterminants à la croissance de moisissures. Plusieurs auteurs (Johansson, Bok, and Ekstrand-tobin 2013; Pasanen et al. 2000) ont comparé des échantillons soumis à une humidité relative constante d'une part et une humidité relative connaissant des fluctuations d'autre part et ont conclu que les fluctuations d'humidité retardaient la croissance de moisissures.

Différents chercheurs ont développé des moyens d'évaluation du risque du développement de moisissures en laboratoire. Lors des tests, les matériaux étudiés sont inoculés par des spores de différentes espèces, puis placés dans des conditions favorables à la multiplication des espèces fongiques.

Il existe différentes approches :

- les études expérimentales réalisées avec des conditions variables dont résultent des cinétiques de croissance et de décroissance des moisissures. Le modèle VTT (Hukka and Viitanen 1999) initialement développé pour deux essences de bois (épicéa et pin) et récemment étendu à d'autres matériaux, cherche à reproduire cette cinétique ;
- les études réalisées avec des conditions constantes. Avec ces conditions, l'outil d'évaluation du risque de germination le plus courant est appelé isopleth. Un isopleth est une limite qui définit les combinaisons de température et d'humidité relative en dessous

de laquelle il n'y a pas germination sur un certain type de substrat. Face à la quantité de substrats et d'espèces fongiques, (Sedlbauer 2001) propose une classification des matériaux pour ne garder que quatre types de substrats (milieu de culture optimal, matériaux biodégradables, matériaux contenant des éléments biodégradables, matériaux non biodégradable sans nutriment). La Figure 74 présente un exemple d'isopleth de différents matériaux bio-sourcés. On observe que la chènevotte, bien qu'organique, est plus résistante que la cellulose ou la paille.

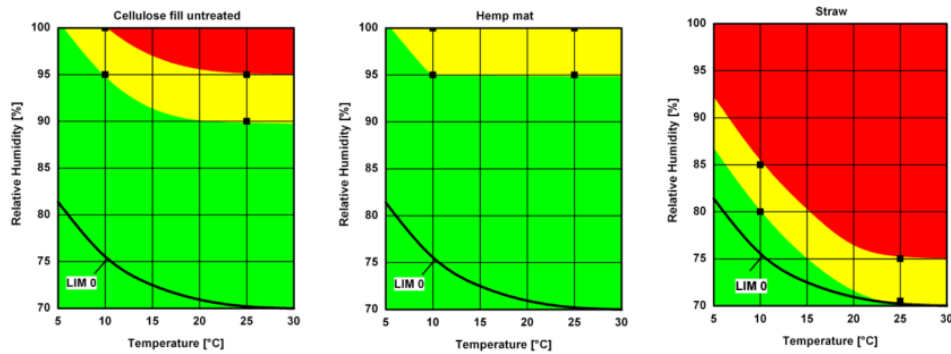


Figure 74: Isopleths de trois matériaux utilisés comme isolant thermique : la cellulose (gauche), la chènevotte (centre) et la paille (droite) selon (Sedlbauer et al. 2011)

Le LIM 0 (Lowest Isopleth for Mould) renseigne la valeur de teneur en eau critique nécessaire à la germination des spores selon le type de support. Sedlbauer a également développé un modèle dynamique de croissance de moisissures basé sur les isopleths. Ce modèle, Bio-hydrothermal est aujourd'hui largement utilisé et implanté dans le logiciel WUFI-Bio.

3. Choix du modèle, de l'indicateur et des paramètres

3.1. Modèle VTT

(Vereecken and Roels 2012) ont dressé un état des lieux des modèles existants de prédiction des dégradations biologiques et en ont conclu que le modèle VTT est le plus approprié pour simuler le développement de moisissures en régime dynamique. La prévision de cette pathologie est définie grâce à l'index de moisissures M qui évolue de 0 à 6 (Tableau 20). Le modèle VTT sera donc retenu pour proposer un indicateur de risques de pathologies. Ce modèle empirique est fonction de la température et de l'humidité relative. Il modélise la croissance et la décroissance de la moisissure.

Tableau 20: Index de moisissures pour la modélisation et les mesures expérimentales

Index	Taux de croissance
0	Pas de croissance, Spores non activées
1	Faible quantité de moisissures détectée uniquement au microscope Germination, initiation de la croissance
2	Plusieurs colonies de moisissures se développant localement (microscope) Moins de 10% de la surface est atteinte (microscope)
3	Début de moisissure détectée visuellement, production de nouvelles spores 10-30% de la surface est atteinte (visuel)
4	Moisissure clairement détectée visuellement 30-70% de la surface est atteinte (visuel)
5	Plus de 70% de la surface est atteinte (visuel)
6	Croissance intense Surface environ 100% couverte

Les matériaux sont classés par catégories de sensibilité au développement fongique. Cette classification permet d'utiliser le modèle pour un grand nombre de matériaux (Figure 75).

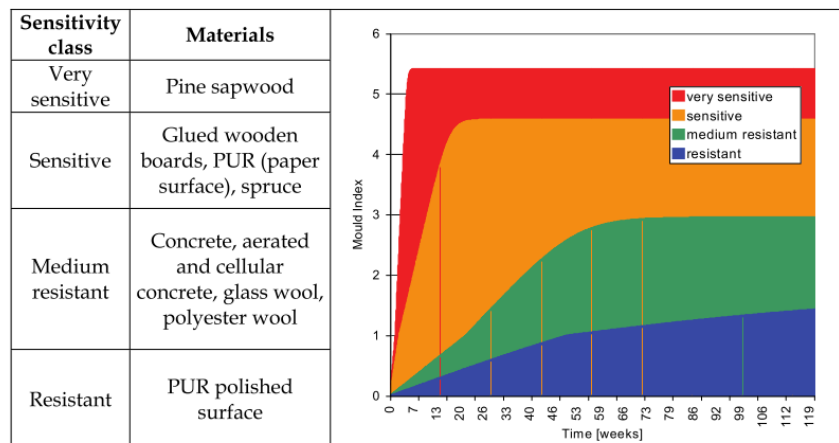


Figure 75 : Croissance de moisissures des différentes classes de matériaux pour des conditions constantes à 97%HR et 22°C selon (Hannu Viitanen, Ojanen, and Peuhkuri 2011)

(Ojanen, Viitanen, and Peuhkuri 2007) soulignent que la décroissance de moisissures initialement implantée dans le modèle pour simuler le retard de croissance dû à la variation d'humidité sur des courtes périodes (quelques jours) semblait être inappropriée pour les variations saisonnières. De plus, (H Viitanen et al. 2015) ont comparé les deux modèles Biohygrothermal et VTT et ont observé qu'en choisissant une cinétique de développement de moisissures sans décroissance, les deux modèles présentaient des résultats similaires.

Nous utiliserons donc le modèle VTT avec une cinétique de décroissance correspondant au coefficient $C_{\text{eff}} = 0.1$, soit « presque aucune décroissance ».

Le modèle VTT modifié et étendu à d'autres matériaux est décrit en détail dans l'article (Hannu Viitanen, Ojanen, and Peuhkuri 2011).

La simulation et l'analyse de différentes parois du centre ancien seront donc réalisées selon la méthodologie suivante présentée Figure 76. La géométrie urbaine du centre de Cahors, définie grâce aux données SIG, permet d'obtenir les masques environnants au sein d'EnergyPlus. Les conditions aux limites extérieures correspondant à chaque bâtiment sont ainsi implantées dans Delphin 5. Suite aux simulations, le risque de développement de pathologies sera étudié pour chaque paroi grâce au modèle de croissance de moisissure VTT.

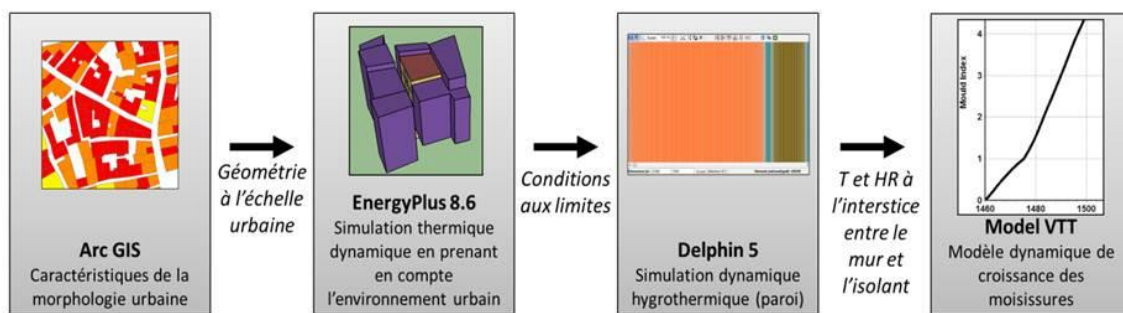


Figure 76: Méthodologie adoptée pour l'évaluation du risque de développement de pathologie des parois

3.2. Choix des différents indicateurs

Les conditions nécessaires au développement de moisissures correspondent à des durées d'exposition suffisantes à des températures et des humidités relatives favorables. Ces paramètres dépendent à la fois des propriétés des matériaux, des conditions extérieures et intérieures, ainsi que parfois de la qualité de la mise en œuvre.

Concernant les conditions intérieures, l'humidité de l'air résulte des effets couplés du comportement de l'habitant, des propriétés hygroscopiques des matériaux des couches intérieures et du climat extérieur. Dans notre étude, nous travaillons avec les mêmes conditions pour chacun des bâtiments, l'unique variation provient des deux matériaux d'isolation utilisés, choisis entre autres car possédant des caractéristiques hygrothermiques très différentes.

Comme montré dans le Chapitre 4, les conditions extérieures dépendent de la morphologie urbaine. Nous choisissons donc les différents indicateurs de morphologie présentés précédemment (Orientation, Ensoleillement, Irradiation, FVC, Etage) et à ceux-ci nous ajoutons la quantité annuelle de pluie battante normale à la paroi (Pluie) exprimée en kg/m^2 ainsi que le potentiel de condensation de surface équivalent (CP) proposé par (Zheng 2004) puis repris par (Barreira and de Freitas 2013).

$$CP = P_v(T_{air}) - P_{v,sat}(T_{surf}) \quad (40)$$

Dans notre étude nous utiliserons l'indicateur CPh, représentant le cumul sur une année des heures durant lesquelles CP est positif, soit la durée potentielle de condensation sur la surface extérieure.

$$CPh = \sum \Delta t_{CP>0} \quad (41)$$

(Barreira and de Freitas 2013) montrent en effet que selon les zones climatiques, la pluie battante n'est pas forcément la source d'humidité principale en provenance de l'extérieur. Pour des climats peu pluvieux, la condensation de surface des parois devient non négligeable. La condensation de surface survient quand la température de surface descend en dessous de la température de rosée. Les nuits de ciel clair, les rayonnements en provenance de la voûte céleste peuvent provoquer une diminution de la température de surface en dessous de celle de l'air. La convection et l'humidité de l'air jouent un rôle clé dans le potentiel de condensation (Aelenei and Henriques 2008), de même que le bilan énergétique de la surface qui est déterminé par les caractéristiques du matériau (capacité thermique, absorptivité, émissivité) et également le facteur de vue du ciel de la paroi déterminé par la morphologie urbaine.

La Figure 77 illustre l'évolution de CPh pour une façade orientée Nord selon l'étage et donc selon le FVC. On observe que le CPh augmente avec l'augmentation du FVC pour cette orientation.

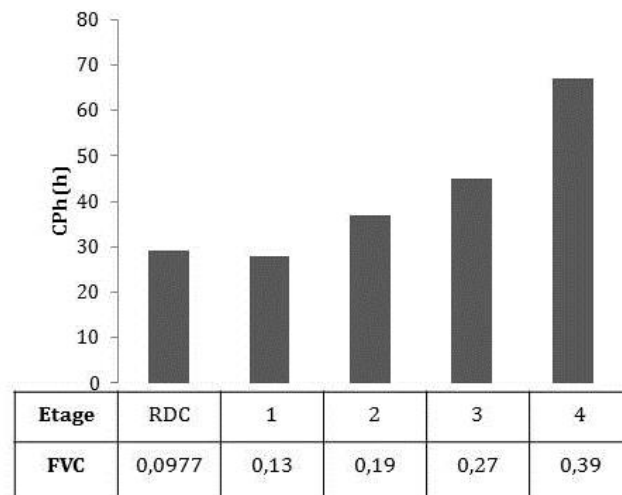


Figure 77: Durée potentielle de condensation annuelle selon l'étage et le FVC (orientation Nord)

Concernant les indicateurs de risque de pathologie, nous utilisons l'index de moisissures M, calculé par le modèle VTT.

Le modèle VTT, comme la plupart des modèles de croissance de moisissures, a initialement été développé pour une étude du risque de moisissures en surface des matériaux et non à l'interface (Marincioni and Altamirano-Medina 2017). En effet, l'absence de convection, de lumière et d'apport en CO₂ à l'interface modifie la cinétique de croissance. De même, les surfaces extérieures présentent également une cinétique différente car les rayonnements UV sont létaux pour plusieurs micro-organismes.

(H Viitanen et al. 2015) ont proposé un système d'évaluation selon le type de surface étudié présenté dans le tableau ci-après. La période d'étude doit être supérieure à un an pour être significative.

Tableau 21: Choix des index critiques selon le type de surface étudiée

	Surface intérieure en contact direct avec l'ambiance intérieure	Surface à l'interface entre deux matériaux, sans contact avec l'air extérieur
Acceptable	$M < 1$	$M < 2$
A surveiller	$1 \leq M < 2$	$2 \leq M < 3$
Non acceptable	$M \geq 2$	$M \geq 3$

Plusieurs classes de matériaux sont proposées en fonction de leur sensibilité à la moisissure. En plus de la nature du matériau, le vieillissement et la présence de poussières modifient également la réponse des matériaux à la biodégradation. (Ojanen et al. 2010) conseillent d'utiliser la classe de sensibilité du matériau le plus sensible, lors de l'étude de l'interface entre deux matériaux.

Les parois existantes du centre de Cahors, au vu du vieillissement des matériaux et du développement de moisissures observé dans les appartements instrumentés, sont considérées comme sensibles.

Bien que l'isopleth présenté Figure 74 ait relevé le chanvre-chanvre (CC) comme relativement résistant à la croissance de moisissures, nous choisissons de le placer comme matériau très sensible. La laine minérale (LM) est considérée comme moyennement résistante.

Le calcul de l'index M débute six mois après le début de la simulation, correspondant à la fin de la période de séchage du matériau chaux-chanvre. Au cours de cette première période, malgré la haute teneur en eau du matériau, l'alcalinité de la chaux avant carbonatation inhibe le développement de moisissures. Afin de pouvoir étudier le risque de pathologie pour chacune des parois, nous utiliserons le maximum atteint par l'index M au cours des trois années de simulations.

Nous utilisons également comme indicateur le nombre de jours au cours de la 3^{ème} année de simulation où l'humidité relative dépasse 80%. La norme ASHRAE 160 préconise d'éviter plus de 30 jours à une HR > 80% (avec $5^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$) pour éviter une dégradation micro-biologique, mais une étude récente montre que ce critère est en réalité trop sévère (Glass et al. 2016). Cet indicateur sera donc uniquement utilisé de manière à comparer les parois entre elles.

L'accumulation d'eau au sein de la structure d'une année sur l'autre est également un indicateur fréquemment utilisé pour évaluer le risque d'apparition de pathologie. Après étude, nous constatons qu'aucune des parois étudiées n'a présenté d'accumulation, cet indicateur n'est donc pas représentatif dans notre cas.

Notre étude se focalise à trois localisations du mur pouvant être sujettes à des risques d'apparition de pathologies. Les surfaces étudiées, présentées Figure 78, concernent uniquement des surfaces n'étant pas en contact direct avec l'air extérieur.

Le point d'étude situé à 5cm de l'isolant est repris des travaux de (Vereecken et al. 2015), il représente l'emplacement des poutres en bois encastrées dans le mur. Cette étude du risque permet d'évaluer, en utilisant une approche 1D, le risque d'apparition de moisissures qui pourrait par la suite engendrer la pourriture des têtes de poutres en bois. Ce point ne donne qu'une évaluation grossière du risque. On suppose de plus une étanchéité à l'air parfaite côté intérieur, le transport d'humidité par convection le long des poutres n'étant pas simulé.

Pour la configuration pan de bois, les localisations 10B et 05 sont confondues. Les épaisseurs entre l'isolant chaux-chanvre et l'isolant laine minérale varient afin d'avoir la même résistance thermique pour les deux configurations.

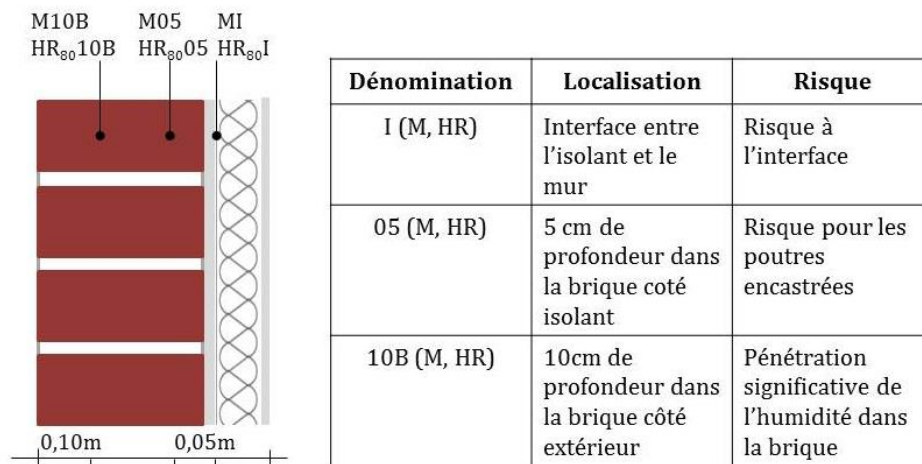


Figure 78 : Localisation des indicateurs de pathologies au sein de la paroi brique

4. Résultats et analyse

L'objectif de cette analyse est de connaître le niveau de corrélation des indicateurs entre eux et d'évaluer l'influence des différentes conditions extérieures sur le risque de développement de moisissures afin de mieux comprendre les phénomènes et de pouvoir extrapoler les résultats obtenus sur un îlot à l'ensemble du centre ancien.

4.1. Identifications des variables représentatives

Les simulations sont réalisées sur toutes les parois extérieures de l'îlot Chico Mendès, permettant ainsi d'étudier le risque de pathologies sur un échantillon de parois représentatif du centre ancien de Cahors (voir Chapitre 4).

Une première analyse ACP est réalisée pour chacune des configurations, afin de connaître la corrélation existant entre les différents indicateurs.

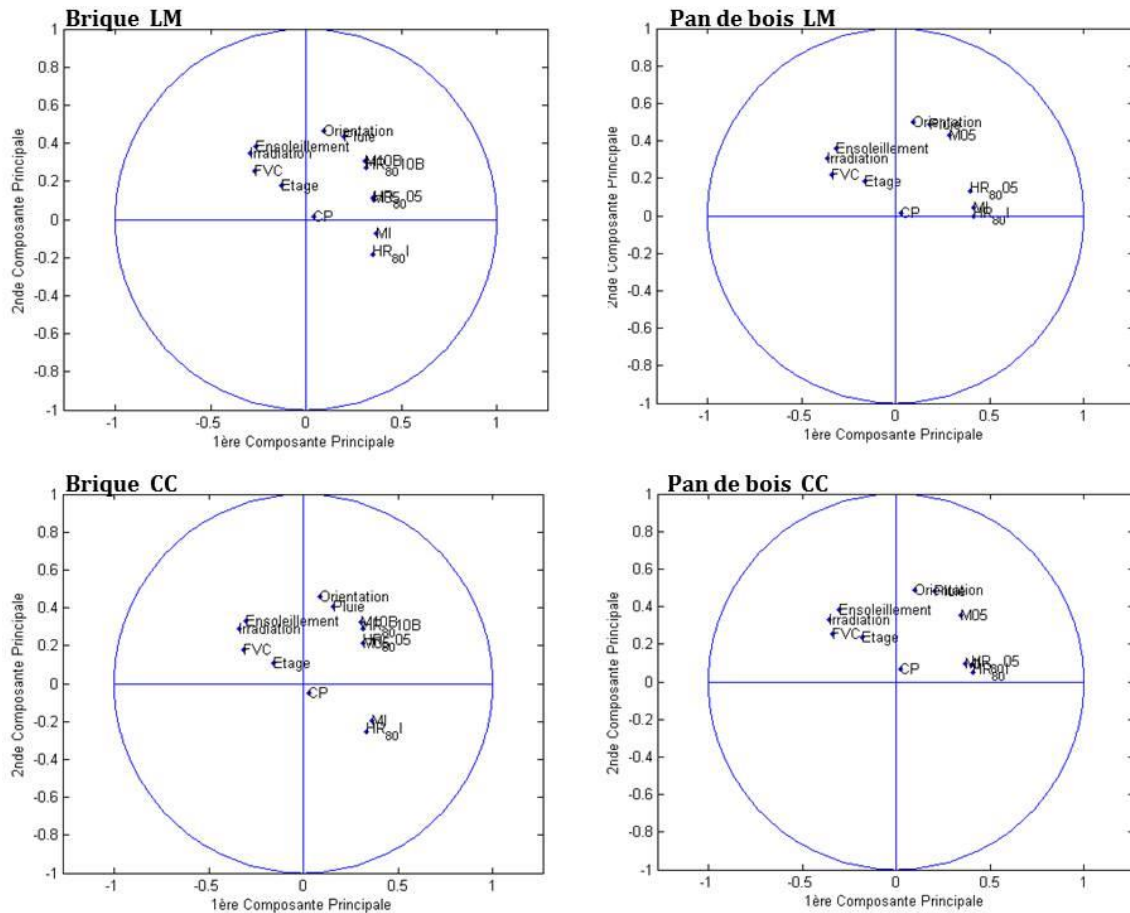


Figure 79 : Etude de la corrélation entre les différents indicateurs

Pour la typologie brique, les indicateurs de risque de pathologie M et HR₈₀ fonctionnent de pair.

Pour la typologie pan de bois, l'indicateur M05 se détache des autres indicateurs, l'étude de celui-ci sera donc menée de façon séparée.

L'ensoleillement, l'irradiation, ainsi que le FVC sont fortement corrélés, de même que la pluie avec l'orientation. Le Potentiel de Condensation (noté CP), semble être une variable peu représentative ou dont l'expression est masquée par les autres variables.

Cependant, cette analyse regroupant tous les indicateurs porte peu d'informations. Nous étudions donc par la suite les indicateurs de risque séparément.

4.1.1. Etude de la typologie pan de bois

Une étude ACP est réalisée pour appréhender la corrélation entre les indicateurs M₁ et M₀₅ et les indicateurs décrivant les conditions extérieures pour la typologie pan de bois. L'étude de la corrélation entre l'indicateur de risque et les conditions extérieures permet également d'évaluer le degré d'incertitude de l'indicateur de risque de pathologie. En effet, comme démontré au Chapitre 5, les conditions extérieures ne présentent pas le même degré d'incertitude, par exemple nous avons pu vérifier la représentativité à l'échelle de la paroi de l'irradiation solaire, contrairement à la pluie battante.

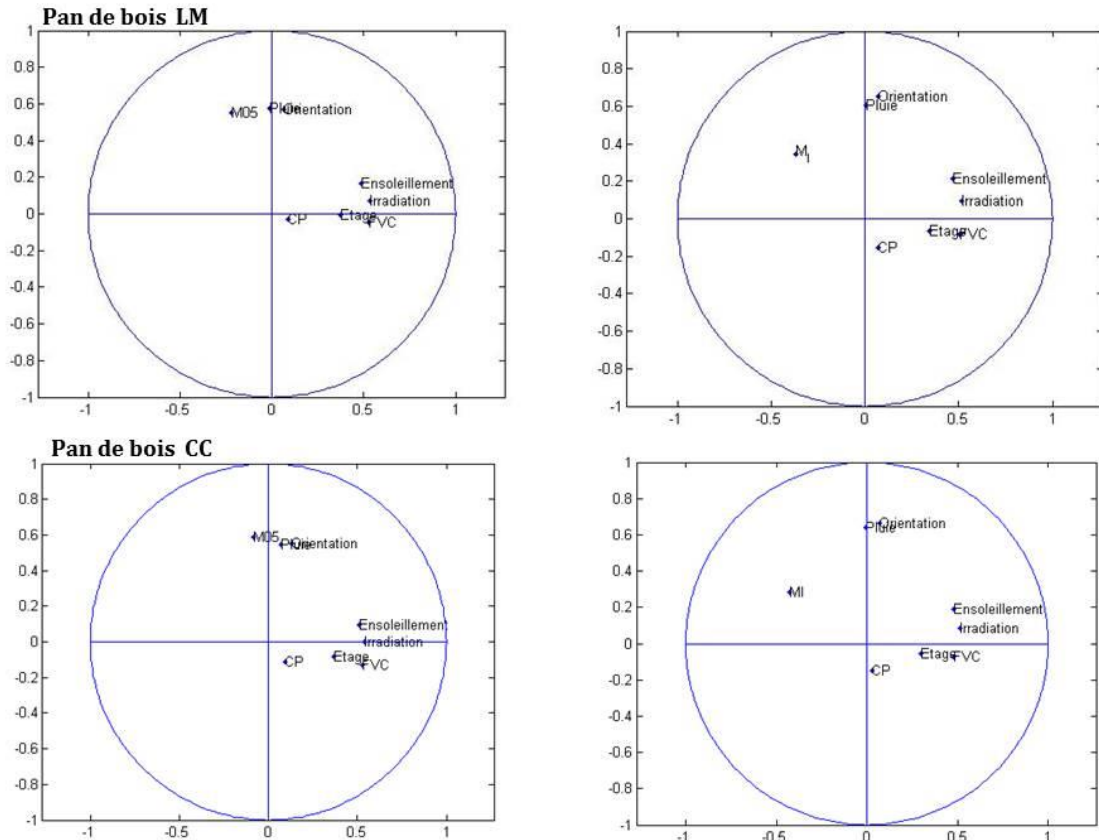


Figure 80: Relations entre M_1 (droite), M_{05} (gauche) et les différents indicateurs pour le pan de bois avec les configurations laine minérale (haut) et chaux-chanvre (bas)

La Figure 80 met en avant une forte corrélation entre l'indicateur M_{05} et la quantité de pluie normale à la paroi pour les deux configurations. L'indicateur M_1 présente à la fois une corrélation avec l'orientation et la pluie et une anti-corrélation avec l'irradiation solaire. Nous pouvons donc en déduire que selon les facteurs de risque étudiés, les influences des conditions extérieures diffèrent.

L'étude des individus projetés dans le nouvel ensemble souligne la présence de groupement selon l'orientation pour les deux configurations et les deux indicateurs de risque (Figure 81). De plus, nous pouvons observer que selon l'orientation, la dispersion des individus en fonction de la première composante (contenant l'irradiation, l'ensoleillement et le FVC) varie.

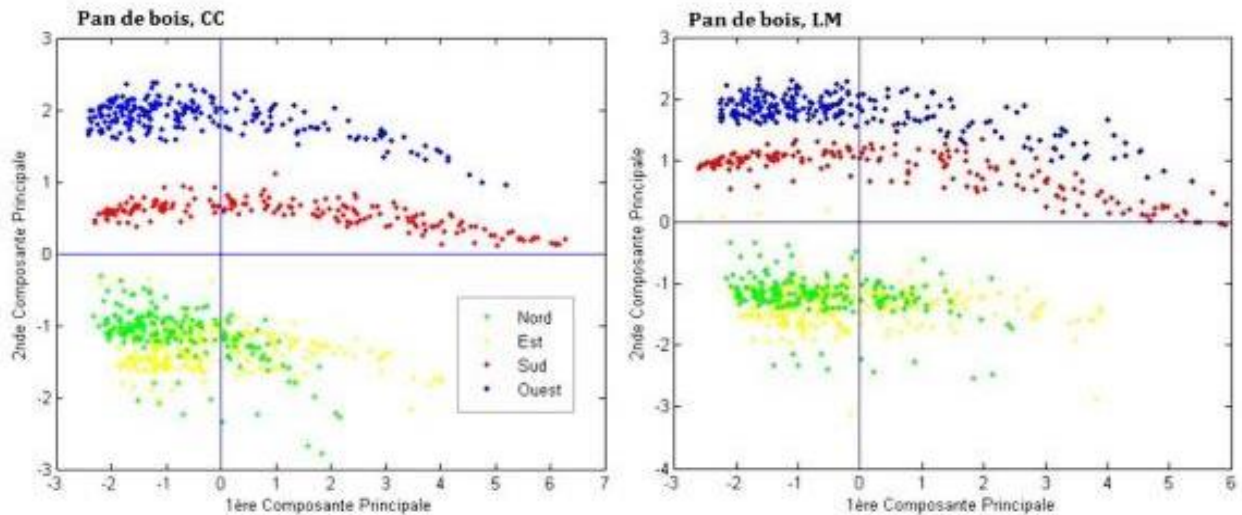


Figure 81: Illustration du groupement des individus selon l'orientation pour la variable MI pour le pan de bois avec les configurations chaux-chanvre (gauche) et laine minérale (droite)

4.1.2. Etude de la typologie brique

Une étude ACP est réalisée de la même façon pour la typologie brique.

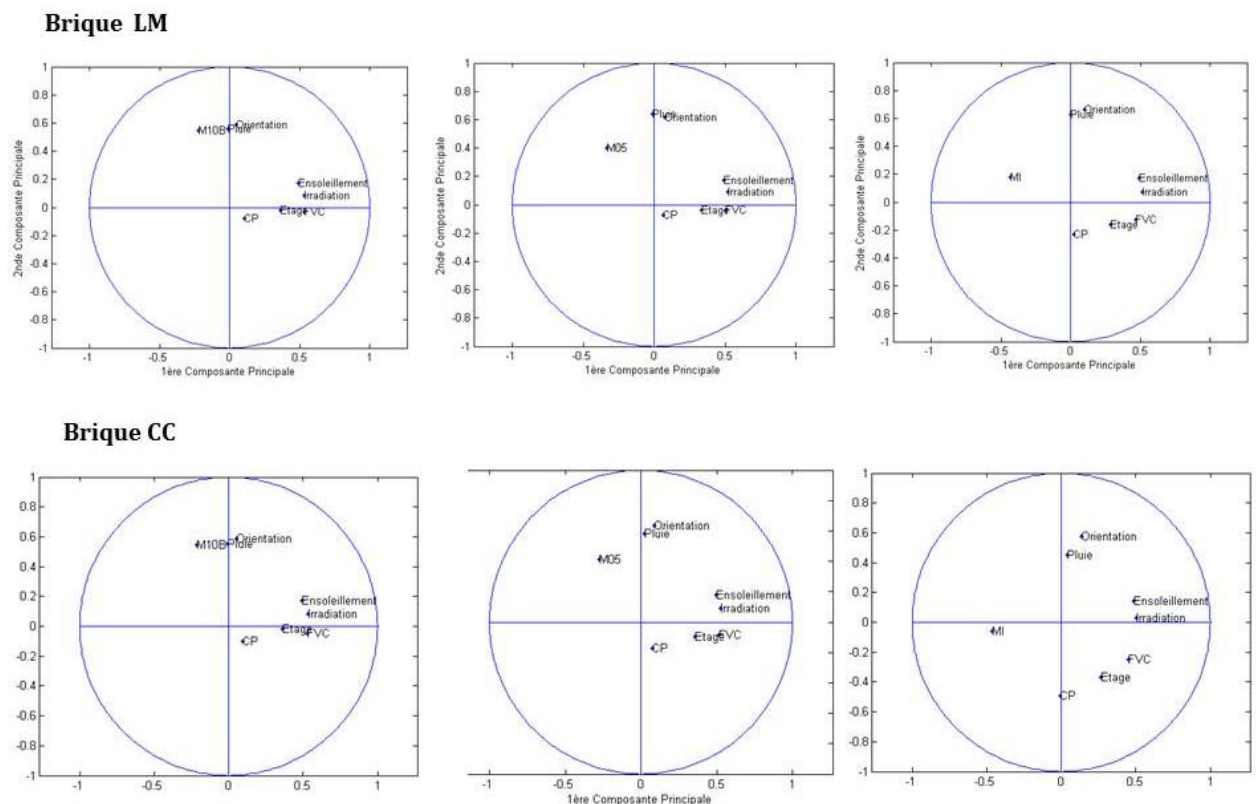


Figure 82: Corrélations entre les indicateurs et M_{10B} (gauche), M_{05} (centre) et M_1 (droite) pour la typologie brique avec les configurations laine minérale (haut) et chaux-chanvre (bas)

Pour rappel, M_{10B} représente l'indicateur de pathologie le plus proche de l'extérieur de la paroi et M_1 , celui à l'interface entre la paroi et l'isolant. Les indicateurs illustrés Figure 82 présentent un comportement similaire pour les configurations chaux-chanvre et laine minérale. Plus l'on s'éloigne du côté extérieur de la paroi, moins la pluie apparait comme le paramètre définissant le risque de pathologies.

Pour la configuration chaux-chanvre, l'indicateur MI apparait comme clairement décorrélé de la pluie et de l'orientation. La dispersion des individus apporte d'autres informations : nous pouvons observer que pour le chaux-chanvre, selon l'orientation les groupements d'individus ne se répartissent pas de la même façon en fonction de la composante principale. L'orientation Nord se distingue particulièrement des autres orientations (Figure 83).

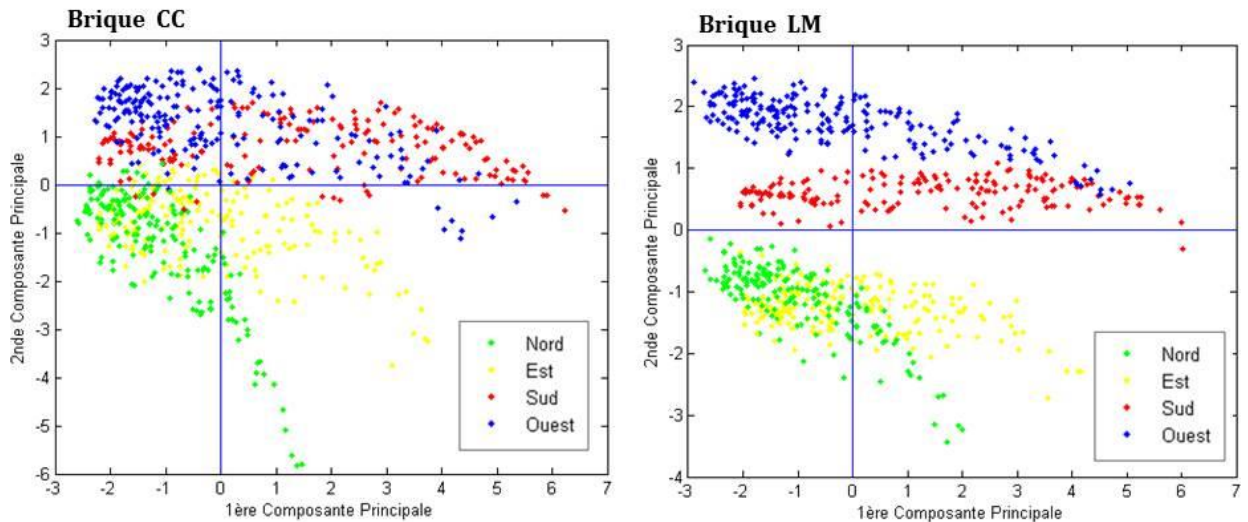


Figure 83 : Individus selon les configurations CC et LM pour l'indicateur MI dans le cas de la typologie brique

Cette étude ACP a mis en avant l'existence de groupement d'individus en fonction de l'orientation (Figure 81 et Figure 83) pour chaque configuration et indicateur de risques de pathologie. Nous étudions à présent les différents facteurs de risque plus en détail, en fonction des quatre orientations principales et de la typologie de la paroi.

4.2. Facteur de risques en fonction de l'orientation et de la typologie de la paroi

4.2.1. Etude du facteur de risque à l'interface

Le facteur de risque à l'interface est présenté selon l'orientation de la paroi pour chacune des configurations (Figure 84) et s'étudie grâce aux indicateurs de risques M_1 et HR_{80I} . Ce type de graphique permet une visualisation rapide des facteurs de risque en mettant en avant les orientations principales du centre ancien.

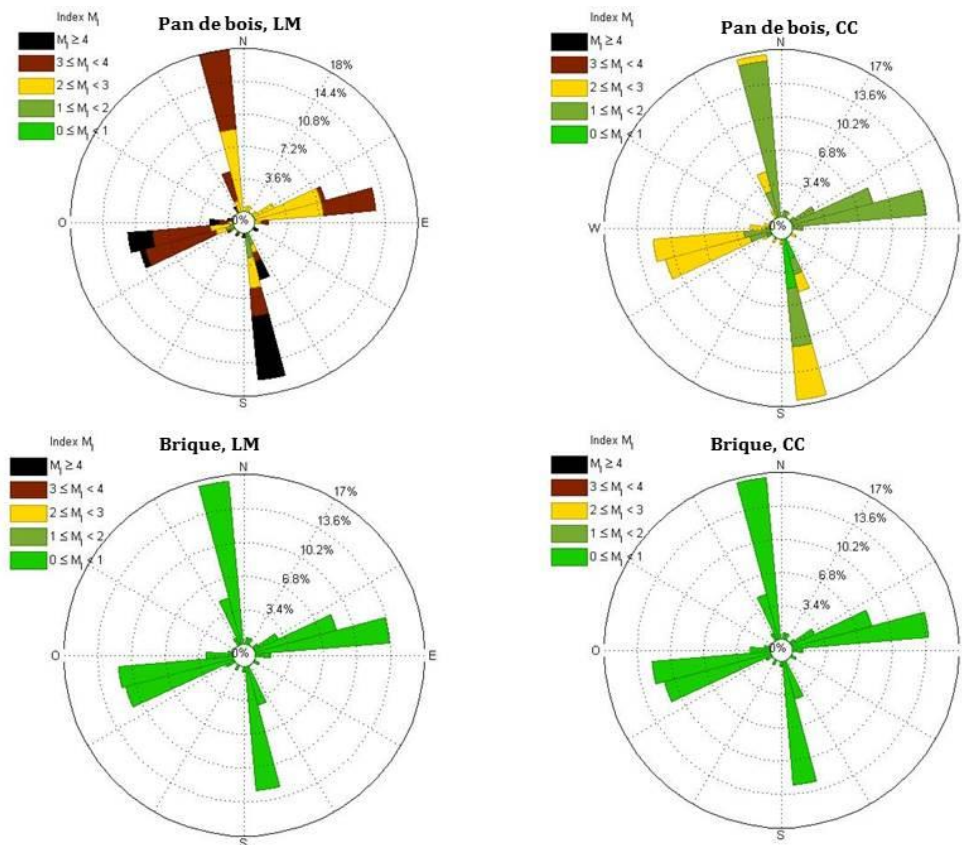


Figure 84 : Expression de l'index M à l'interface en surfaces cumulées selon l'orientation

La classification utilisée est celle proposée par (H Viitanen et al. 2015) présentée Tableau 21.

A l'interface, la typologie pan de bois est plus sujette au développement de moisissures que la typologie brique. De plus, la configuration avec de la laine minérale présente un risque accru par rapport à celle avec l'isolant chaux-chanvre et ce, quelque-soit l'orientation étudiée. La majorité des parois sont « à surveiller » ou « non acceptable » alors que pour la configuration chaux-chanvre, les parois Est ne présentent aucun risque, tout comme la majorité des parois Nord.

Pour la typologie brique, l'ajout d'un isolant influence la réponse hygrothermique mais ne présente pas de risques de développement de moisissures. Afin de pouvoir comparer les parois entre elles, nous utilisons l'indicateur HR_{80I} (Figure 85). Les indicateurs HR_{80I} et MI étant fortement corrélés (Figure 79), son étude apporte des informations complémentaires à celle de MI. HR_{80} apporte des indications concernant le taux d'humidité mais ne souligne pas la différence de sensibilité à la moisissure entre les deux matériaux.

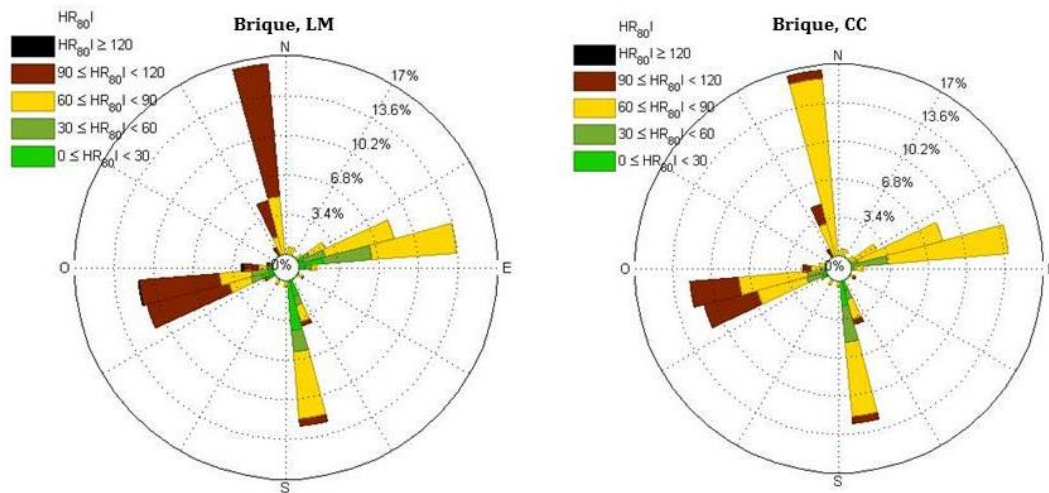


Figure 85 : Expression de l'index HR₈₀ à l'interface en surfaces cumulées

Cet indicateur met en exergue les différences entre les parois. De la même façon que pour la typologie pan de bois, la typologie brique avec la configuration laine minérale présente un comportement hygrothermique moins favorable qu'avec la configuration chaux-chanvre. La Figure 86 illustre la différence de réponse hygrothermique entre les deux configurations à l'interface.

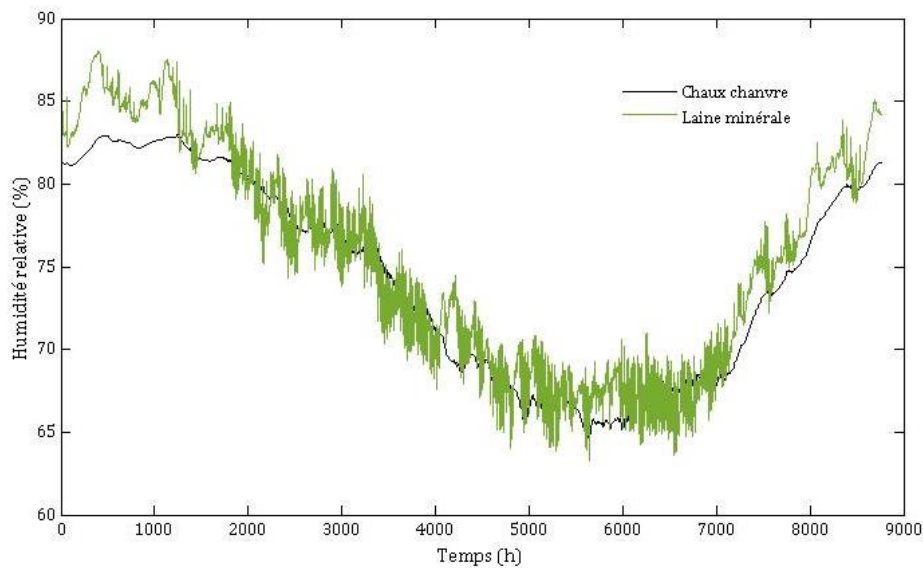


Figure 86 : Humidité relative à l'interface des configurations CC et LM (typologie brique, orientation Nord)

La configuration LM atteint des humidités relatives plus élevées pendant les mois d'hiver et des variations journalières plus importantes que celle du CC. La laine minérale est un matériau très perméable, la plaque de plâtre appliquée en finition joue un rôle tampon mais n'est pas suffisante pour freiner la progression de l'humidité jusqu'à l'interface, principalement pour des sollicitations importantes en provenance de l'intérieur. Le comportement hygrothermique à l'interface est en réalité extrêmement sensible à la valeur du coefficient S_d (épaisseur équivalente d'air) du film Kraft ou du pare/frein vapeur appliqué. (Alev and Kalamees 2016) démontre d'ailleurs que le risque de développement de moisissures à l'interface pour des murs traditionnels en bois orientés Nord évolue avec la diminution de la valeur du coefficient S_d pour une isolation en laine minérale.

L'étude de la réponse hygrothermique selon l'orientation permet d'avoir peu de variation de la variable Pluie. L'ACP a mis en avant la corrélation entre le FVC, l'irradiation et l'ensoleillement. Nous étudions donc à présent pour chaque orientation l'influence du FVC et du CP sur l'indicateur M_i (Figure 87).

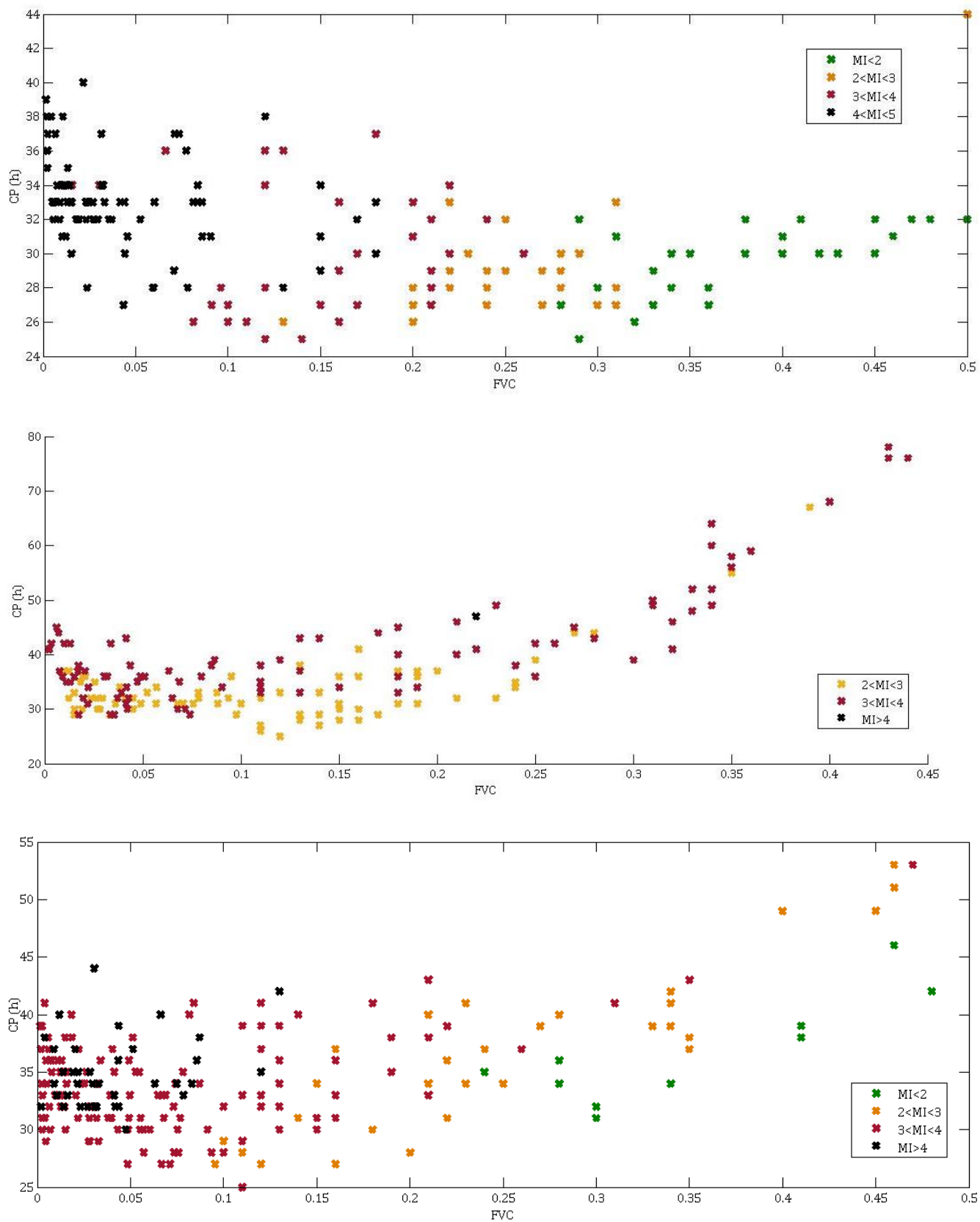


Figure 87 : Potentiel de Condensation en fonction du FVC pour les parois orientées Sud (haut), Nord (centre) et Ouest (bas), typologie pan de bois et configuration laine minérale

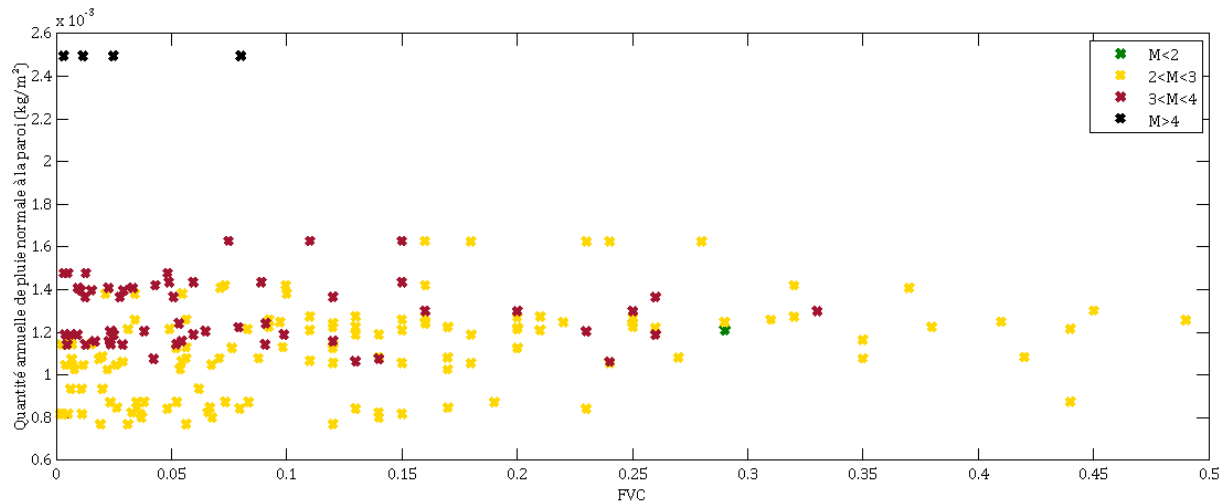


Figure 88 : Quantité de pluie normale à la surface en fonction du FVC pour l'orientation Est, typologie pan de bois et configuration laine minérale

Les graphiques précédents (Figure 87 et Figure 88) permettent de mettre en avant des spécificités propres à chacune des orientations.

Pour l'orientation Sud, une corrélation entre le facteur de risque et le FVC apparaît clairement. Pour un FVC supérieur à 0.32, aucune paroi ne présente de risque de développement de moisissures. Cette corrélation est d'ailleurs vérifiée Figure 89 pour les deux isolants testés et s'explique par la différence d'ensoleillement que reçoit la paroi durant les mois d'hiver selon les masques environnants. La même observation peut être réalisée sur la typologie brique en utilisant l'indicateur HR_{80} (Figure 90), à la différence que pour cette typologie, le comportement à l'interface pour les deux isolants est relativement similaire.

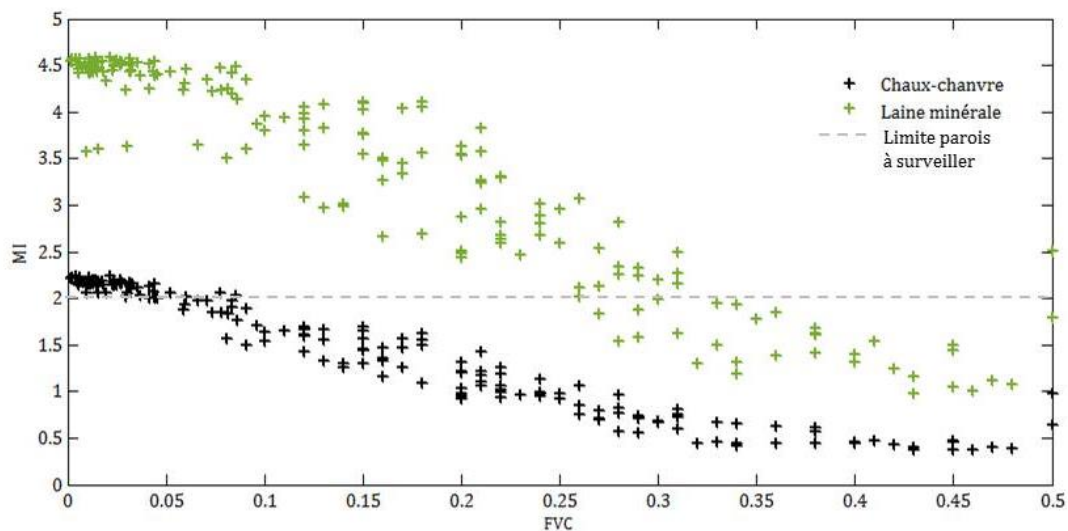


Figure 89: Indicateur M_i en fonction du FVC pour les parois pan de bois orientées Sud

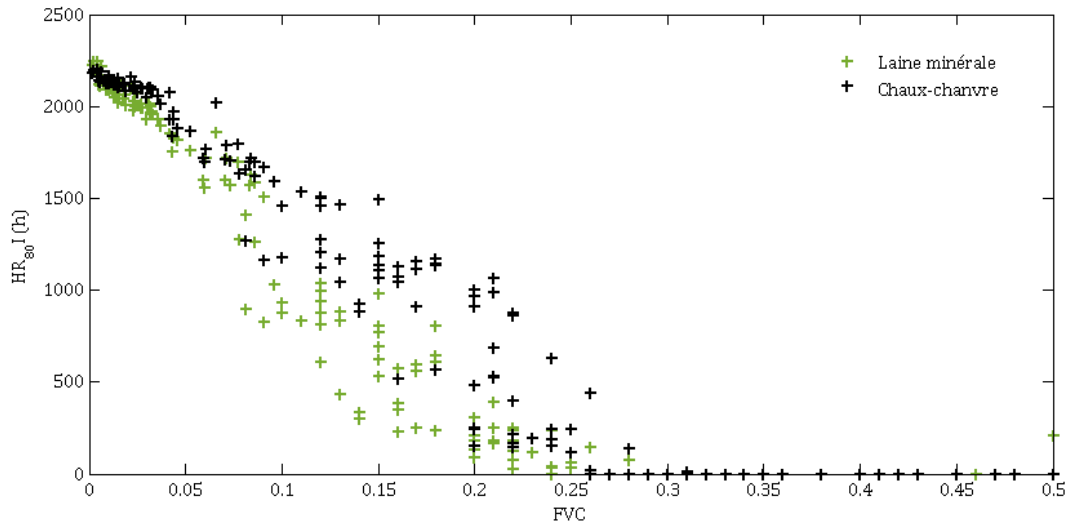


Figure 90 : Relation entre le HR80 à l'interface et le FVC pour l'orientation Sud, typologie brique

Pour la typologie Brique, cette corrélation entre HR_{80} et le FVC s'observe pour chacune des orientations, à l'exception de l'orientation Nord.

Pour l'orientation Nord, le comportement hygrothermique diffère. Les parois ayant un FVC élevé et donc plus exposées aux radiations de la voûte céleste voient leur Potentiel de Condensation augmenter. Pour un FVC fixé, les parois ayant un CP plus élevé auront également un risque de développement de moisissures plus important. L'utilisation de la brique apparente en façades diminue le risque de condensation de surface à cause de son absorptivité et de sa capacité thermique élevées. Les façades Nord ayant un Facteur de Vue du Ciel élevé (derniers étages ou rues dont le rapport d'aspect est faible) sont donc exposées aux rayonnements de la voûte céleste mais peu exposées au rayonnement solaire. Ne pouvant donc pas accumuler autant de chaleur que les autres orientations, elles sont plus sujettes à la condensation de surface.

Un comportement hygrothermique présentant des similitudes avec les deux autres orientations se retrouve pour l'orientation Ouest. Au-delà d'un FVC supérieur à 0.25, certaines parois ne présentent aucun risque mais à nouveau, pour un FVC fixé, le risque augmente avec le Potentiel de Condensation.

Pour la configuration Est, le CP ne semble pas influencer, les résultats sont donc présentés en fonction de la quantité de pluie battante. Il existe une claire différence dans la réponse hygrothermique selon la quantité de pluie reçue par la façade extérieure. Pour des FVC élevées aucune paroi n'est considérée comme « non acceptable ».

4.2.2. Etude des facteurs de risque M05 et M10B

Pour rappel, pour la typologie pan de bois, les deux indicateurs M05 et M10B sont confondus.

Pour la typologie brique, nous utilisons à nouveau l'indicateur HR_{80} afin de pouvoir comparer les parois entre elles, car aucun facteur de risque n'apparaît avec l'utilisation de l'indicateur M, celui-ci ne dépassant pas la valeur de 1.

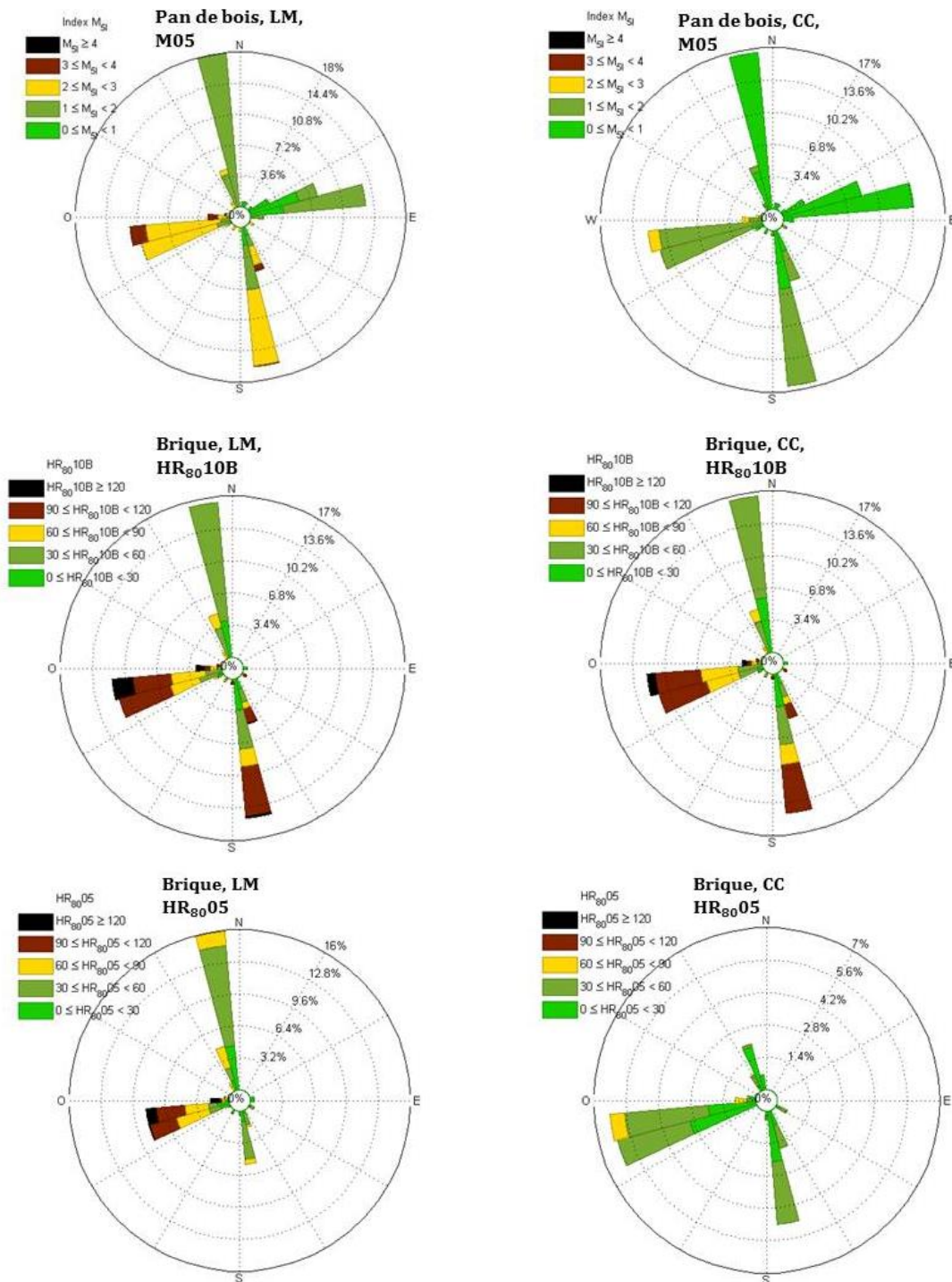


Figure 91 : Représentation des facteurs de risque à 5cm de l'isolant et à 10cm de l'extérieur

Pour la typologie brique, l'étude de l'indicateur HR₈₀10B, représentant une pénétration significative d'humidité dans la brique, est quasiment identique pour les deux configurations (Figure 91). A cette position de la paroi pour des murs d'une telle épaisseur, les propriétés hygriques de l'isolant n'ont que très peu d'influence. Ce sont principalement les conditions aux limites extérieures qui déterminent la teneur en eau à cette localisation dans le mur. On observe une humidité relative plus importante pour les parois Ouest et Sud, qui s'explique par la quantité de pluie plus importante reçue par ces parois (Figure 92).

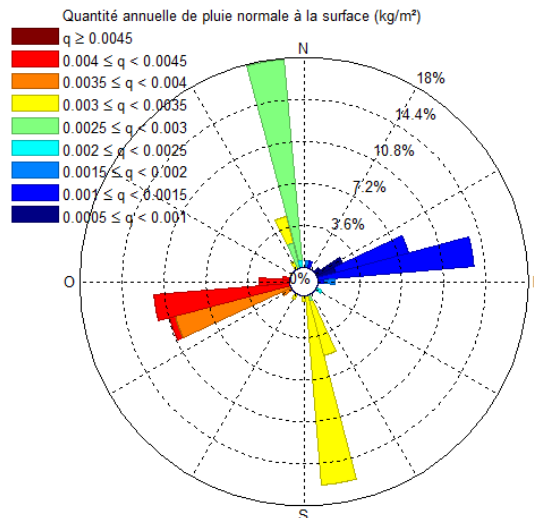


Figure 92 : Quantité de pluie normale à la paroi selon l'orientation en nombres de parois cumulées

A nouveau une corrélation entre le FVC et l'humidité relative (Figure 93) est mise en avant, le nombre d'heures où l'humidité relative dépasse 80% augmente sensiblement avec la diminution du FVC.

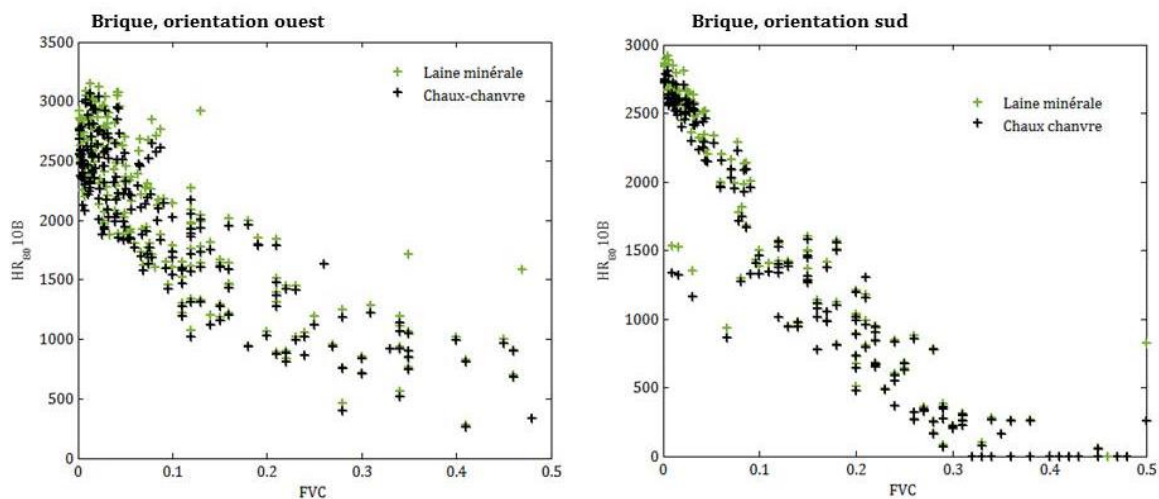


Figure 93 : HR_{80,10B} en fonction du FVC pour la typologie brique

L'étude simplifiée du risque pour les poutres encastrées, à travers les indicateurs M05 et HR_{80,05} met en avant un risque plus important pour la configuration laine minérale (Figure 91). En effet, pour la configuration chaux-chanvre, le risque pour les poutres encastrées est faible voire inexistant pour la majorité des parois.

L'orientation Nord présente un comportement similaire à celui observé à l'interface, c'est-à-dire un risque qui tend à augmenter avec le potentiel de condensation.

A la différence de l'orientation Sud, où l'on peut considérer qu'au-delà de FVC=0.2, le risque pour les poutres encastrées est négligeable pour les deux configurations, l'orientation Ouest présente un risque quelque-soit le FVC pour la configuration laine-minérale (Figure 94).

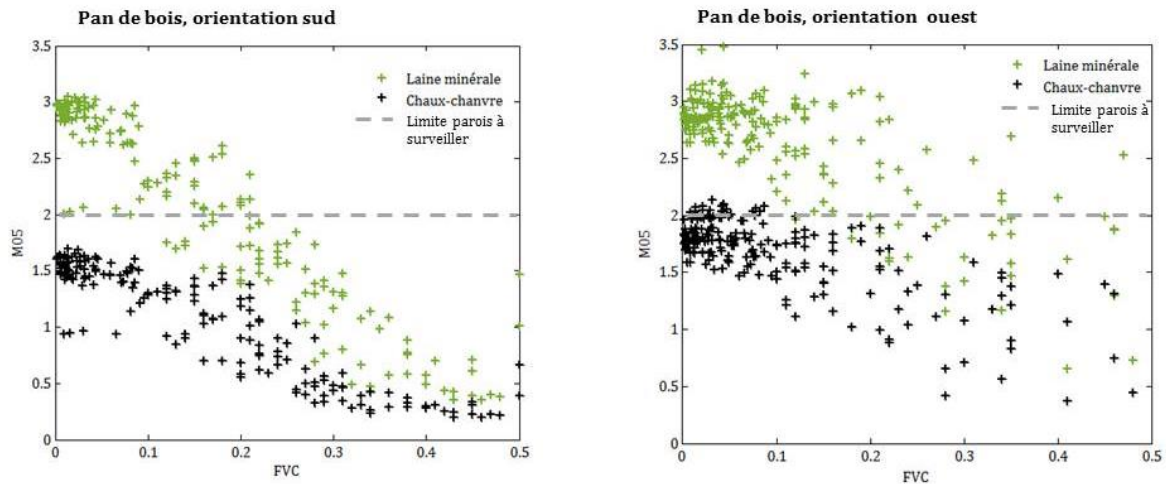


Figure 94 : M05 en fonction du FVC pour les orientations sud et ouest, typologie pan de bois

4.2.3. Discussion

Les résultats précédents mettent en avant une influence non négligeable de la morphologie urbaine sur la réponse hygrothermique des parois. Concernant les façades Est, Sud et Ouest, les parois ayant un FVC faible présentent quasi systématiquement un risque de pathologie plus élevé. Pour les façades Nord, le comportement hygrothermique diffère car cette orientation n'est pas soumise au rayonnement solaire. Pour cette orientation, l'augmentation du FVC implique une augmentation du potentiel de condensation, correspondant à une autre source d'humidité en provenance de l'extérieur.

A cela, il faut ajouter les conclusions obtenues au Chapitre 5, concernant l'accélération ou la réduction du profil de vent générées par la morphologie urbaine.

Pour les orientations particulièrement sujettes à la pluie battante, les résultats peuvent être à modérer car le milieu urbain peut réduire la quantité de pluie battante atteignant les façades extérieures : soit par la présence des bâtiments environnants qui créent un effet de masque ; soit par la réduction de la vitesse du vent en milieu urbain qui diminue la quantité de pluie frappant les parois.

Dans le cas d'une accélération de la vitesse du vent, comme vu au Chapitre 5, pour des vitesses de vent importantes le coefficient de convection massique permet de diminuer le taux d'humidité dans la paroi en accélérant son séchage mais sans pour autant contrebalancer l'effet de l'augmentation de la quantité de pluie normale à la paroi.

L'objectif de ce chapitre était d'observer l'influence de la morphologie urbaine sur la réponse hygrothermique de la paroi. Afin de pouvoir étudier l'effet des conditions extérieures, les conditions aux limites intérieures ont été définies comme identiques pour chacun des appartements simulés. En réalité, la morphologie du bâti et l'accès au rayonnement solaire, notamment à travers les parois vitrées modifient également les ambiances intérieures. Les mesures réalisées in-situ corroborent d'ailleurs l'existence d'un microclimat spécifique à chacun des étages entraînant une réponse hygrothermique différente de la paroi selon l'emplacement et l'orientation de l'appartement dans l'environnement urbain.

4.3. Cartographie des résultats

L'utilisation d'une base de données SIG nous a permis de travailler avec des éléments spatiaux (parois et masques environnants) en conservant leurs données attributaires. Ces dernières facilitent la cartographie des facteurs de risques et la spatialisation permet de vérifier la cohérence de l'indicateur dans l'environnement urbain. La Figure 95 permet une visualisation rapide des parois à risques pour la typologie pan de bois, selon la classification du Tableau 22.



Figure 95: Cartographie des risques à l'interface pour la typologie pan de bois

	Surface à l'interface entre deux matériaux, sans contact avec l'air extérieur
Acceptable	$M < 2$
A surveiller	$2 \leq M < 3$
Non acceptable	$M \geq 3$

Tableau 22 : Classification des risques selon la valeur de M

L'outil SIG a notamment été retenu car la mairie de Cahors utilise d'ores et déjà cet outil et un référencement des données patrimoniales du centre historique sous la forme d'une base de données SIG est en projet. La ville de Toulouse a par exemple mis en place un outil cartographique appelé Urban-Hist au service du patrimoine permettant la visualisation de données telles que les cadastres anciens, les documents iconographiques ou encore l'évolution urbaine au fil des siècles (Bernard et al. 2012).

Le potentiel de l'outil SIG est dans cette étude sous-exploité. Au-delà d'un simple outil de visualisation, ce système de cartographie peut devenir un outil de connaissance en utilisant son outil de saisie spatial et attributaire permettant de croiser les connaissances de différentes disciplines. Une base de données plus complète contenant la typologie de chaque bâti, le siècle de construction, mais également les rénovations qu'il a subi, permettrait de visualiser

rapidement quelles solutions de rénovations il vaut mieux adopter. En allant plus loin, et à l'instar d'un travail déjà appréhendé sur la ville de Londres par (Taylor et al. 2016) qui a croisé le risque de surchauffe estivale selon la typologie de bâti avec les données socio-économiques des occupants pour définir les quartiers les plus vulnérables, le croisement de l'estimation des consommations énergétiques permettant de définir quel logement est en vulnérabilité énergétique permettrait, dans notre cas d'étude, de prioriser les aides à la rénovation en proposant des solutions techniques adaptées.

5. Conclusion

Dans ce Chapitre, différentes simulations ont été réalisées ayant pour objectif l'étude de la durabilité de la paroi après rénovation en faisant varier l'emplacement de la paroi dans l'environnement urbain, sa typologie et l'isolant utilisé. L'étude se focalise sur les parois d'un îlot du site patrimonial remarquable, considéré comme représentatif de la morphologie urbaine du centre ancien de Cahors. Le profil de vent est identique pour chaque simulation et correspond à une échelle méso-climatique, d'une rugosité de campagne et les configurations de paroi correspondent à deux typologies constructives simplifiées du site patrimonial remarquable.

Premièrement, une étude ACP a été réalisée afin de connaître la sensibilité des indicateurs aux différentes sollicitations extérieures.

Concernant les indicateurs de pathologies, l'ACP a mis en avant que plus l'indicateur était situé coté extérieur de la paroi, plus le comportement était sensible aux variations des sources d'humidité extérieure (potentiel de condensation, pluie battante). Les indicateurs M10B et M05 sont donc plus sujets aux incertitudes concernant la quantité de pluie battante atteignant la paroi.

Le comportement hygrothermique diffère entre les deux typologies de parois.

Pour la typologie brique, aucun risque de développement de moisissures à l'interface paroi ancienne-isolant n'est relevé. L'étude de HR_{30I} met en avant une forte corrélation entre le comportement hygrothermique à l'interface et le FVC, seule l'orientation Nord déroge à la règle. Pour un FVC faible, la durée où l'humidité relative sera supérieure à 80% sera plus importante. Il faut néanmoins garder à l'esprit que l'épaisseur de laine minérale utilisée dans les simulations est très faible et peu représentative de la réalité. Une épaisseur plus importante diminuera la température à l'interface et pourra augmenter le risque de pathologies.

Pour la typologie pan de bois, l'utilisation de la laine minérale génère un risque élevé de développement de moisissures à l'interface pour chacune des orientations étudiées. Seules quelques parois de l'orientation Sud possédant un FVC supérieur à 0.32 présentent des résultats satisfaisants avec ce matériau. Une étude plus approfondie met en avant une sensibilité différente des parois aux sollicitations extérieures selon leur orientation :

- les parois Sud sont particulièrement sensibles aux effets de masque environnant concernant le rayonnement solaire. Ce sont elles qui auront des réponses hygrothermiques les plus différentes selon le FVC ;

- les parois Ouest sont également fragiles, cette fragilité est principalement due à la pluie battante plus importante sur cette orientation ;
- la fragilité des parois Nord provient principalement du potentiel de condensation, car à l'inverse des parois Sud, les derniers étages peuvent être également sensibles à cause du rayonnement plus important de la voute céleste.

Une différence nette entre les deux matériaux isolants se dessine donc pour la typologie pan de bois. Le fort potentiel hygroscopique du chaux-chanvre permet de stocker une quantité importante d'humidité sans que cette humidité ne transite vers l'interface, au contraire de la laine minérale.

Aucune des parois étudiées n'a présenté d'accumulation d'humidité d'une année sur l'autre. Cela est dû aux spécificités du climat de Cahors connaissant des étés chauds, voire caniculaires ces dernières années, faisant redescendre l'humidité relative au cours de cette période.

6. Références

- Aelenei, Daniel and Fernando M. A. Henriques. 2008. "Analysis of the Condensation Risk on Exterior Surface of Building Envelopes." 40:1866–71.
- Alev, Üllar and Targo Kalamees. 2016. "Avoiding Mould Growth in an Interiorly Insulated Log Wall." *Building and Environment* 105:104–15.
- ANSES. 2016. *Moisissures Dans Le Bâti. Rapport D'expertise Collective*.
- Barreira, Eva and Vasco P. de Freitas. 2013. "Experimental Study of the Hygrothermal Behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)." *Building and Environment* 63:31–39.
- Bernard, Catherine, Marc Comelongue, Louise-emmanuelle Friquart, Laure Krispin, and Géraud Lavedan. 2012. "Urban-Hist , Le Patrimoine Toulousain À La Carte." *Les Cahiers de Framespa* 1–12.
- Edward, A. and Anne V Baughman. 1996. "Indoor Humidity and Human Health. Part I: Literature Review of Health Effects of Humidity-Influenced Indoor Pollutants." *ASHRAE Transactions* 102:193–211.
- Glass, Sam et al. 2016. "The Need for Improved Moisture Performance Evaluation Criteria in ASHRAE Standard 160." in *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII Workshop 5*.
- Grant, C., C. A. Hunter, B. Flannigan, and A. F. Bravery. 1989. "The Moisture Requirements of Moulds Isolated from Domestic Dwellings." *International Biodeterioration* 25(4):259–84.
- Guizzardi, M., J. Carmeliet, and D. Derome. 2015. "Risk Analysis of Biodeterioration of Wooden Beams Embedded in Internally Insulated Masonry Walls." *Construction and Building Materials* 99:159–68.
- Hukka, A. and H. A. Viitanen. 1999. "A Mathematical Model of Mould Growth on Wooden Material." *Wood Science and Technology* 33:475–85.
- Ibrahim, Mohamad, Etienne Wurtz, Pascal Henry Biwole, Patrick Achard, and Hebert Sallee. 2014. "Hygrothermal Performance of Exterior Walls Covered with Aerogel-Based Insulating Rendering." *Energy and Buildings* 84:241–51.
- Johansson, Pernilla, Gunilla Bok, and Annika Ekstrand-tobin. 2013. "The Effect of Cyclic Moisture and Temperature on Mould Growth on Wood Compared to Steady State Conditions." *Building and Environment* 65:178–84.
- Marincioni, Valentina and Hector Altamirano-Medina. 2017. "Analysis of the Suitability of Mould Growth Models for the Risk Assessment of Woodfibre Internal Wall Insulation." Pp. 183–88 in *Proceedings of the 11th Nordic Symposium of Building Physics*, vol. 132. Elsevier B.V.
- Ojanen, Tuomo et al. 2010. "Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials." *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings XI* 1–10.
- Ojanen, Tuomo, Hannu Viitanen, and Ruut Peuhkuri. 2007. *Modelling of mould growth in building envelopes*. 1-18
- Pasanen, Anna-Liisa et al. 2000. "Fungal Growth and Survival in Building Materials under Fluctuating Moisture and Temperature Conditions." *International Biodeterioration & Biodegradation* 46(2):117–27.

- Schmidt, Olaf. 2006. *Wood and Tree Funji. Biology, Damage, Protection and Use*. Springer.
- Sedlbauer, Klaus. 2001. "Vorhersage von Schimmelpilzbildung Auf Und in Bauteilen." Universität Stuttgart.
- Sedlbauer, Klaus, Wolfgang Hofbauer, Nicole Krueger, Florian Mayer, and Klaus Breuer. 2011. "Material Specific Isopleth-Systems as Valuable Tools for the Assessment of the Durability of Building Materials Against Mould Infestation – The ' Isopleth-Traffic Light .'" in *XIIIth International Conference on Durability of Building Materials and Components*.
- Taylor, Jonathon et al. 2016. "Mapping Indoor Overheating and Air Pollution Risk Modification across Great Britain: A Modelling Study." *Building and Environment* 99:1–12.
- Vereecken, Evy, Liesje Van Gelder, Hans Janssen, and Staf Roels. 2015. "Interior Insulation for Wall Retrofitting - A Probabilistic Analysis of Energy Savings and Hygrothermal Risks." *Energy and Buildings* 89:231–44.
- Vereecken, Evy and Staf Roels. 2012. "Review of Mould Prediction Models and Their Influence on Mould Risk Evaluation." *Building and Environment* 51:296–310.
- Viitanen, H. et al. 2010. "Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building Materials and Structures." *Journal of Building Physics* 33(3):201–24.
- Viitanen, H., M. Krus, T. Ojanen, V. Eitner, and D. Zirkelbach. 2015. "Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models." *Energy Procedia* 78:1425–30.
- Viitanen, Hannu. 2001. "Factors Affecting Mould Growth on Kiln Dried Wood." 1–8.
- Viitanen, Hannu, T. Ojanen, and R. Peuhkuri. 2011. "Mould Growth Modelling to Evaluate Durability of Materials." *Proceedings of the 12DBMC - International Conference on Durability of Building Materials and Components* 1–8.
- Zheng, Rongjin. 2004. "Performance of Highly Insulated Zinc Roofs in Moderate Humid Regions." PhD Thesis. KU Leuven.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions des chapitres

Ce travail de thèse a permis d'évaluer la compatibilité d'un isolant bio-sourcé, le chaux-chanvre, utilisé pour la rénovation thermique de parois opaques du centre ancien de Cahors en tenant compte des spécificités du bâti ancien, de l'échelle du matériau à l'échelle urbaine. Cette évaluation est réalisée à l'aide de différents outils aussi bien expérimentaux que numériques et en collaboration avec un vaste panel d'acteurs de la rénovation thermique ainsi que les instances décisionnelles locales.

Le Chapitre 1 a mis en avant la complexité à rénover thermiquement le bâti ancien en centre urbain ainsi que les blocages freinant l'utilisation des matériaux bio-sourcés. Le cas particulier du centre ancien de Cahors, possédant une valeur patrimoniale, est décrit dans ce chapitre ainsi que la méthodologie originale du Living Lab. Ce lieu d'expérimentation reproduisant un environnement réel cherche à rassembler les différents acteurs de la rénovation thermique pour œuvrer ensemble à la conception et la validation d'un matériau et d'une mise en œuvre adaptée. L'objectif final est de faciliter l'intégration sur le marché d'isolants bio-sourcés en provenance de ressources locales. L'initiative de Cahors met en avant le rôle que peuvent jouer les collectivités territoriales en tant qu'instances décisionnelles. Celles-ci possèdent en effet des leviers d'action multiples pour aller vers des villes plus soutenables.

Le Chapitre 2 dresse une synthèse bibliographique des verrous concernant les bio-sourcés et oriente vers un travail multi-échelles, alliant différents outils afin de réduire les incertitudes inhérentes à chacun des outils.

Dans le Chapitre 3 sont présentés les dispositifs expérimentaux utilisés au sein du laboratoire et l'instrumentation in-situ mise en place dans les bâtiments du centre ancien. La caractérisation physique des matériaux de construction est en effet essentielle à l'analyse des transferts de chaleur et de masse. Nous avons mis en avant que les mélanges chaux-chanvre bien que présentant des conductivités thermiques légèrement plus élevées que celles des isolants conventionnels ($0.1 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ contre $0.04 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ pour la laine minérale), possèdent des propriétés hydriques intéressantes pour la rénovation des parois anciennes. Ces matériaux sont en effet fortement hygroscopiques, le mélange CC1 est d'ailleurs classé Excellent au test du tampon hygrique. L'utilisation d'une épaisseur supérieure à la profondeur de pénétration déterminée avec le MBV prévient en partie du transfert d'humidité en provenance des sollicitations intérieures. Cette caractérisation a également souligné la propriété perspirante des mélanges chaux-chanvre, justifiée par des valeurs faibles des coefficients de résistance à la diffusion de vapeur d'eau. La caractérisation des briques foraines a révélé l'hétérogénéité importante qui peut exister parmi les matériaux des parois anciennes. Le coefficient de capillarité élevé de la brique du 16^{ième} peut favoriser le transfert d'eau liquide vers l'intérieur de la paroi, les caractéristiques de ce matériau ont donc été choisies pour travailler avec le scénario le plus défavorable. Face aux singularités existant dans la paroi dues à la forte hétérogénéité des parois anciennes, le choix de travailler avec le cas le plus défavorable paraît judicieux pour assurer la durabilité de la paroi.

L'instrumentation in-situ a permis d'étudier sous des sollicitations dynamiques réelles la réponse hygrothermique de la paroi et du bâti avant et après rénovation. L'étude du confort d'été a mis en avant une modification de l'inertie de transmission de la paroi (augmentation du déphasage et une diminution de l'amortissement), le seuil de confort a légèrement diminué après la pose de l'isolant de par la faible effusivité du matériau chaux-chanvre, même si ces résultats doivent être modérés. Le coefficient de transmission thermique a été divisé par 5 pour le mur en pan de bois et par 3.75 pour le mur en brique.

Une étude de la morphologie urbaine du centre ancien de Cahors est menée au Chapitre 4. La définition d'indicateurs sous la forme de grandeurs quantifiables permet de définir les spécificités morphologiques du bâti urbain médiéval ainsi que de réduire l'étude à un îlot représentatif de l'ensemble du centre ancien pour la suite de l'étude numérique. La synthèse bibliographique souligne que la morphologie urbaine génère un microclimat urbain en modifiant les échanges radiatifs et les écoulements aérauliques à proximité de la paroi. Le logiciel EnergyPlus a entre autre été retenu car il possède un modèle radiatif permettant de prendre en compte les inter-réflexions entre les bâtiments. La cohérence entre les rayonnements calculés et mesurés sur la paroi in-situ a permis de valider le choix de l'algorithme dans le logiciel. Le lien entre le logiciel EnergyPlus et la base de données SIG a permis de simuler les différents bâtiments du centre ancien, en prenant en compte les masques environnants et d'obtenir ainsi des conditions aux limites plus représentatives de chaque bâtiment.

Face à la sensibilité à l'humidité des différents matériaux mise en avant au Chapitre 3, une étude plus fine des transferts de chaleur et de masse à l'échelle de la paroi a été menée afin d'étudier la performance hygrothermique de la paroi après isolation. Le choix du modèle implanté dans Delphin 5 a été validé en comparant les résultats numériques aux résultats expérimentaux et les données matériaux issues de la caractérisation réalisée en laboratoire. Les conditions aux limites prenant en compte l'effet des masques environnants a mis en avant que le profil du vent, tout comme l'accès au rayonnement solaire, modifient la réponse hygrothermique de la paroi.

Une étude de l'ensemble des parois de l'îlot Chico Mendès considéré comme un îlot représentatif du centre ancien est alors réalisé afin d'appréhender l'influence de la morphologie urbaine sur la durabilité de la paroi. L'étude réalisée correspond au scénario le plus défavorable, c'est à dire que la brique possède un facteur de pénétration d'humidité élevé et le profil de vent choisi est celui d'une rugosité « campagne » et non « centre-ville ».

L'évaluation réalisée grâce à des indicateurs de croissances de moisissures a mis en avant la fragilité des pans de bois par rapport aux parois en briques massives. Pour les parois en brique, le choix de l'isolant ne semble pas déterminant, aucun cas de détérioration suite à la rénovation n'apparaissant dans les résultats des simulations hygrothermiques. Par contre, pour les parois à pan de bois, l'installation d'un isolant en laine minérale combiné à une plaque de plâtre peut s'avérer problématique et générer l'apparition d'une humidité excessive.

Le couplage des outils EnergyPlus et Delphin 5 a mis en avant que la morphologie urbaine ne peut être négligée car elle modifie largement les conditions aux limites et donc la réponse hygrothermique de la paroi. Au sein du milieu urbain, on peut conclure, d'après les simulations et de l'analyse ACP, que les parois présentant le risque de dégradations le plus élevé sont les parois recevant le moins de radiations solaires, c'est-à-dire dont le FVC est très faible. Les parois Nord, recevant peu de radiations solaires font exception à ces conclusions, dans ce cas, un FVC

élevé entraîne l'apparition d'une autre source d'humidité en provenance de l'extérieur, due à la condensation de surface.

Nous pouvons donc conclure de cette étude numérique que la rénovation thermique de certaines parois en pan de bois, selon leur position dans l'environnement urbain, peut entraîner des risques de dégradation, la rénovation de celles-ci doit donc être réalisée avec précaution.

Le matériau chaux-chanvre possède un fort potentiel de stockage d'humidité entraînant parfois une humidité relative élevée à l'interface pendant des périodes assez longues. Les simulations ont mis en avant que ces périodes pouvaient être plus importantes pour les parois Est et Sud que pour la laine minérale. Néanmoins, dans aucun des cas étudiés, l'humidité relative à l'interface ne dépasse 85% contrairement à la laine minérale. Nous pouvons donc conclure que, l'isolant chaux-chanvre étant fortement hygroscopique, est amené à stocker une quantité d'humidité importante, mais cette teneur en eau ne génère pas de pathologies pour la typologie brique, mais seulement des cas à surveiller pour la typologie pan de bois.

L'installation in-situ d'un isolant en chaux-chanvre banché a cependant révélé que l'humidité excessive générée au cours de la mise en œuvre doit être considérée. En effet, pour certaines parois recevant peu de radiations solaires, ou appartenant à des bâtiments peu ventilés ou peu chauffés, l'application d'un isolant par voie humide ne semble pas forcément la solution adéquate. L'expérimentation in-situ a révélé une durée de séchage de plusieurs mois pour la paroi pan de bois et de près d'un an pour la paroi brique. Même si, dans notre cas, cette très longue durée s'explique en partie par l'absence de ventilation forcée due à la non-occupation du bâti, le temps de séchage est un paramètre qui ne peut être négligé, aussi bien pour des questions financières impliquant un retour rapide de l'occupant que pour des questions sanitaires et de durabilité face aux désordres que peut entraîner l'humidité excessive aux alentours de la paroi rénovée. Une solution par voie sèche utilisant des isolants préfabriqués doit donc dans certains cas être préférée (blocs de chaux-chanvre, blocs de terre allégés, panneaux en fibres de bois voire même des techniques de chaux-chanvre projeté où la quantité d'eau lors de la mise en œuvre est plus limitée).

Perspectives de recherche

Caractérisation des matériaux

La caractérisation des matériaux a permis de déterminer certaines propriétés thermiques et hygriques des mélanges chaux-chanvre, mais il faut néanmoins garder à l'esprit que ce matériau est non normé et que les propriétés finales sur chantier dépendront également de la mise en œuvre et des proportions du mélange.

Le projet SUDOE ENERPAT, démarré en 2017, permet de compléter la caractérisation physique des matériaux des parois anciennes et d'isolants bio-sourcés, afin de mieux en comprendre les spécificités et d'enrichir les bases de données. Ces tests devront adopter des protocoles adaptés pour prendre en compte la forte perméabilité et hygroscopicité des matériaux bio-sourcés afin d'obtenir des valeurs cohérentes et ne pas utiliser uniquement des méthodes stationnaires mais également des méthodes dynamiques pour valoriser les matériaux bio-sourcés.

Instrumentation in-situ

L'instrumentation in-situ a servi à valider ou comparer les conditions aux limites et aux interfaces obtenues en sortie des logiciels EnergyPlus et Delphin 5. Néanmoins, le modèle hygrothermique n'a pour le moment pas pu être validé précisément, des relevées des humidités relatives au sein de l'isolant chaux-chanvre sont actuellement en cours pour compléter cette étude. L'instrumentation in-situ n'a pas non plus permis de valider le modèle de croissance de moisissures, car il n'est malheureusement pas possible d'aller actuellement vérifier à l'interface l'apparition de dégradations microbiologiques.

Des sollicitations dynamiques, de charges et décharges de chauffage et d'humidité ont été réalisées à l'échelle de la pièce, avant rénovation. Il serait intéressant de travailler en comparatif, après rénovation, en réalisant de nouvelles mesures.

La création d'un nouvel espace pour le Living Lab avec le projet européen va permettre de tester des nouvelles solutions d'isolation aussi bien au niveau de la mise en œuvre, que de la réponse hygrothermique de la paroi.

Etude numérique

L'étude des différentes parois a été réalisée en couplant EnergyPlus et Delphin 5. Ce couplage a permis d'étudier l'influence de la modification des conditions aux limites par l'environnement urbain. Néanmoins, plusieurs simplifications ont été faites aussi bien dans les configurations des parois que dans la prise en compte des conditions aux limites.

Les typologies de bâti sont fortement simplifiées : seulement deux typologies (brique et pan de bois) avec deux épaisseurs ont été testées. De plus l'enduit ciment fréquemment présent sur les façades extérieures voire intérieures pour certaines parois à pan de bois à Cahors n'est pas représenté. Il serait donc intéressant de compléter l'étude en prenant en compte l'influence d'un enduit ciment sur les transferts hygrothermiques, pour mieux étudier la diversité de paroi existant dans le centre ancien de Cahors.

Concernant les conditions aux limites extérieures, l'étude ACP a mis en avant que la pluie battante et le vent sont des paramètres non négligeables dans la réponse hygrothermique de la

paroi, il est cependant difficile voire impossible pour le moment d'avoir des données précises à l'échelle de la paroi.

Les conditions aux limites intérieures sont également simplifiées et l'utilisation des normes EN13788 et EN15026 créant une ambiance intérieure identique pour chaque bâtiment est à questionner. En réalité, la typologie du bâti et l'accès au rayonnement solaire modifient fortement les ambiances intérieures ; les mesures réalisées in-situ corroborent d'ailleurs l'existence d'un micro-climat distinct pour chaque étage entraînant une réponse hygrothermique différente de la paroi. Cependant, la création d'une ambiance intérieure spécifique à chaque appartement du centre ancien est particulièrement difficile. De plus, la mise en place d'une couche d'isolation ou de finition composée de matériaux très hygroscopiques entraîne une régulation immédiate de l'ambiance intérieure. Un couplage direct, à chaque pas de temps, entre EnergyPlus et Delphin serait alors intéressant à réaliser pour prendre en compte l'influence de la paroi sur les conditions aux limites intérieures.

Les transferts de vapeur d'eau par advection à travers la paroi sont également négligés dans cette étude, or ce phénomène peut être pris en compte par le logiciel Delphin. Des nouvelles simulations permettraient d'étudier l'influence du transfert par advection lors de la mise en place de matériaux très perméables tels que les isolants.

Communication et ouverture

Cette thèse a été réalisée grâce aux financements et à l'appui de la Communauté d'agglomération du Grand Cahors. Comme présenté dans le Chapitre 1, les différents blocages inhérents aux matériaux bio-sourcés et au milieu ancien en milieu urbain, ne pourront être levés que grâce à un travail interdisciplinaire. Afin de valoriser les matériaux bio-sourcés, la communication et la formation sont essentielles. Un guide de préconisation destinée à la ville de Cahors est en cours de rédaction. De plus, le nouvel espace de Living Lab, va servir de chantier pilote et de rénovation exemplaire pour valoriser les matériaux bio-sourcés en rénovation.

L'utilisation de la SIG, ici sous-exploitée, doit être complétée. Le croisement des données SIG peut en effet être bien plus vaste et un travail notamment avec le service patrimoine doit être réalisé. Il faut également comparer la morphologie urbaine du site patrimonial remarquable de Cahors à d'autres centres anciens et s'interroger sur la possibilité de transposer les résultats de l'étude à d'autres villes. D'autres données, comme la vulnérabilité énergétique des différents ménages, croisées avec les résultats de cette étude permettrait de faire ressortir les îlots en vulnérabilité énergétique, les rénovations prioritaires et celles devant être suivies avec précaution.

L'interdisciplinarité est l'une des forces et originalités de ce projet. La continuité de ce travail à travers le projet européen SUDOE ENERPAT permet de consolider le réseau d'acteurs de la rénovation thermique écologique au niveau local et d'envisager, que grâce à un travail collaboratif, les matériaux bio-sourcés ne seront plus considérés comme des solutions marginales, d'ici à quelques années.

ANNEXE : Données d'entrée du logiciel EnergyPlus

Comparaison des années 2015, 2016 provenant de la station météorologique Cahors le Montat et du fichier météorologique interpolé grâce au logiciel Météonorm.

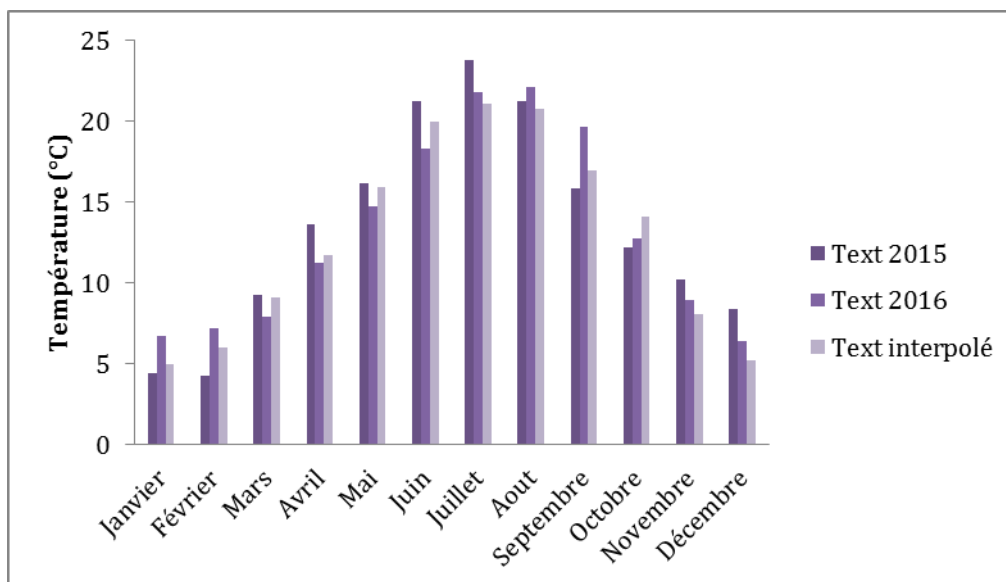


Figure 96: Température extérieure mensuelle

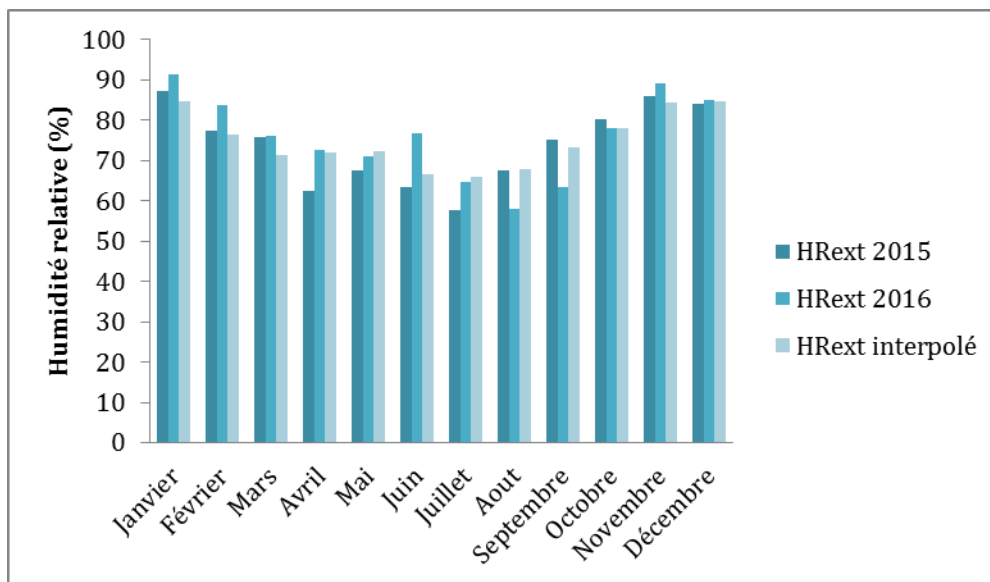


Figure 97: Humidité relative extérieure mensuelle

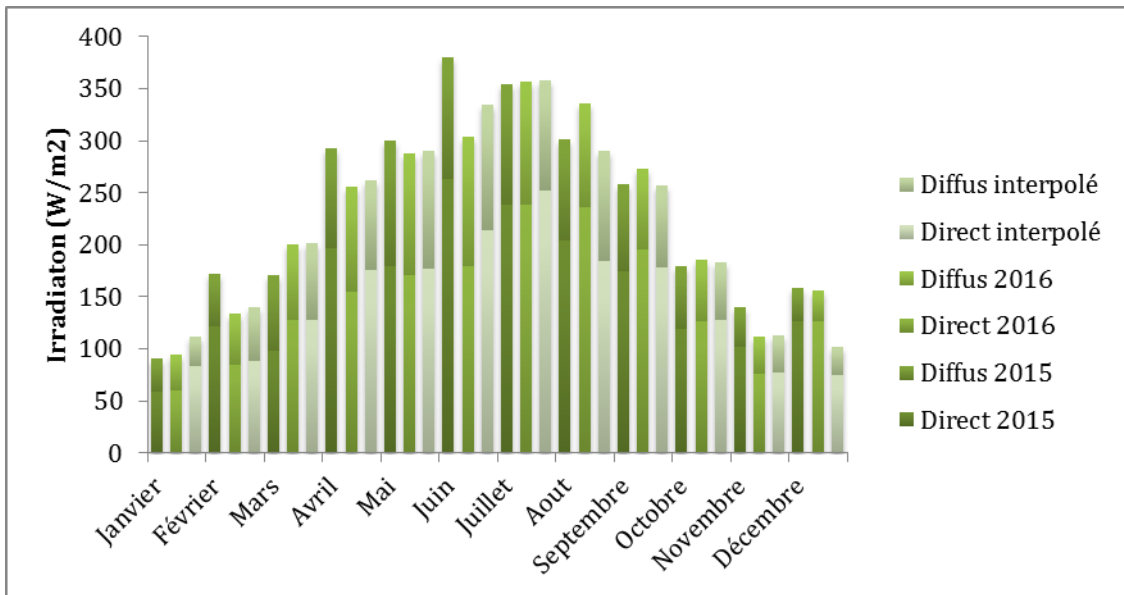


Figure 98: Irradiation mensuelle (rayonnement direct et diffus)

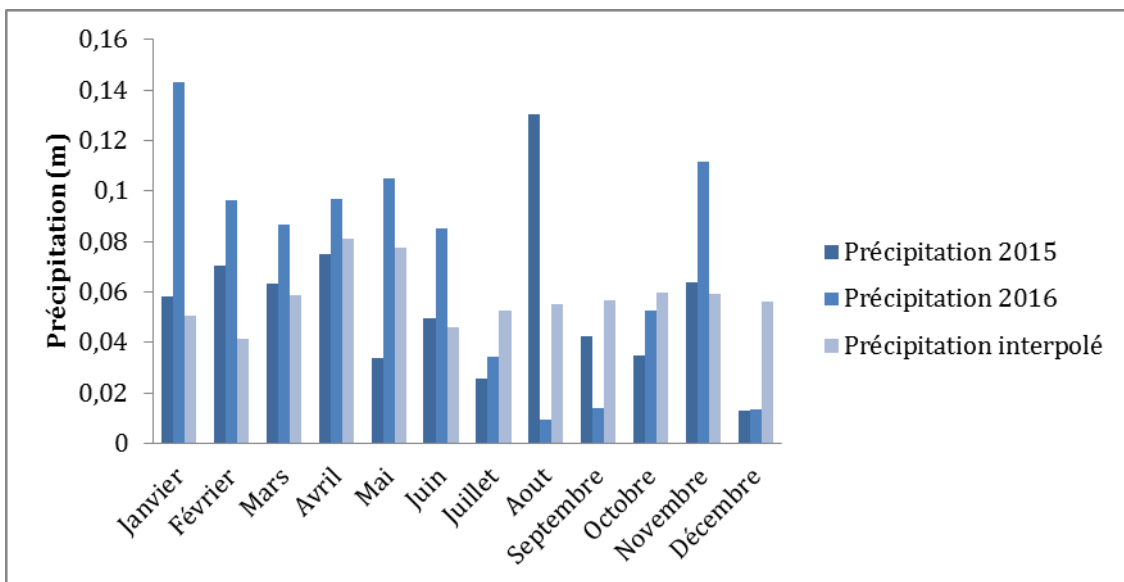
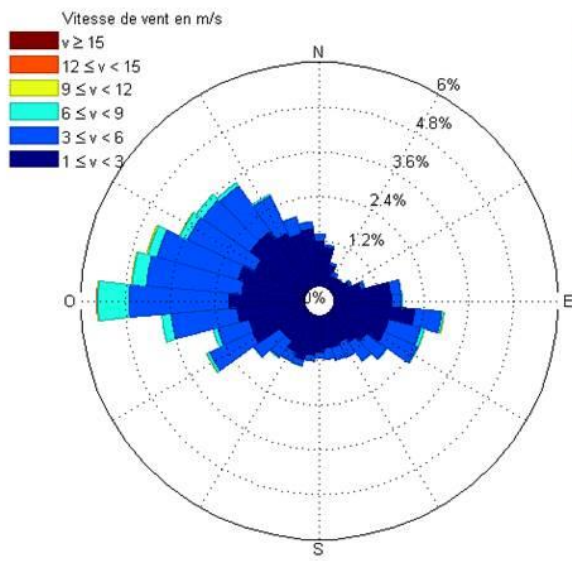
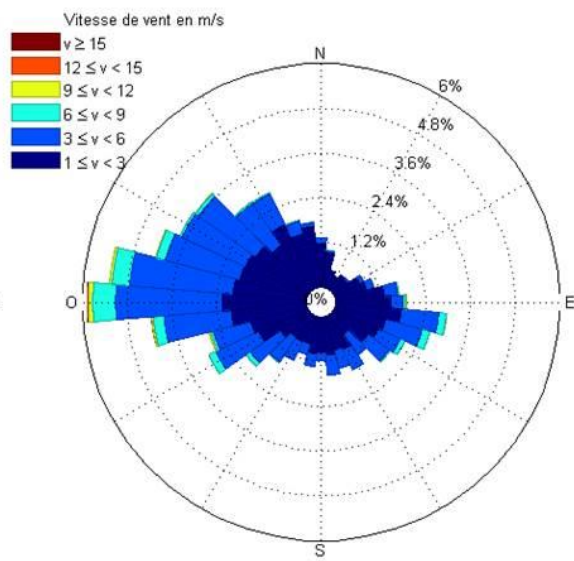


Figure 99: Précipitation mensuelle

2015, Cahors Le Montat



2016, Cahors Le Montat



Fichier Météonorm, interpolé

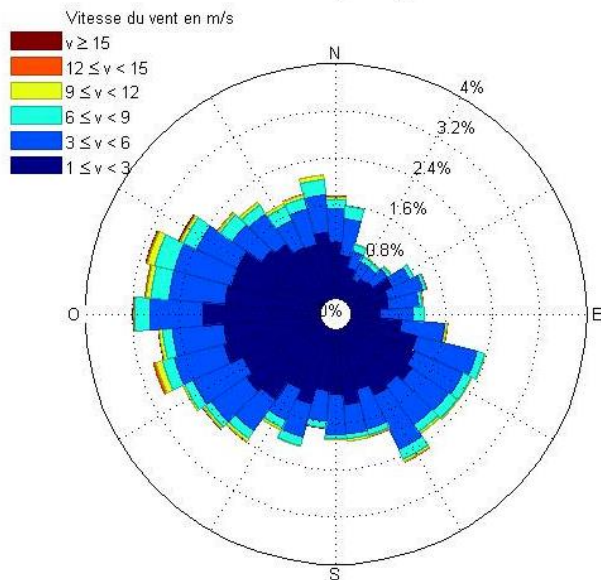


Figure 100: Roses des vents