



HAL
open science

Modélisation des performances thermiques et aérauliques du bâti résidentiel ancien lyonnais

Agnès Ferreira Lopes

► **To cite this version:**

Agnès Ferreira Lopes. Modélisation des performances thermiques et aérauliques du bâti résidentiel ancien lyonnais. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04938629

HAL Id: dumas-04938629

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04938629v1>

Submitted on 10 Feb 2025

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.

Copyright

04 SEPTEMBRE 2024

MODELISATION DES PERFORMANCES
THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI
RESIDENTIEL ANCIEN LYONNAIS

TRAVAIL DE FIN D'ETUDE

Pour le diplôme d'ingénieur de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

JURY :

- Président du jury :
Emmanuel GOURDON
- Tuteur du TFE : Bassam
MOUJALLED
- Experte : Héloïse MARIE



AGNES FERREIRA LOPES
CEREMA CENTRE EST
TFE ANNEE 2023-2024

Table des matières

Notice analytique.....	5
Déclaration de travail personnel	6
I. Introduction générale.....	7
1. Contexte	7
a. Perturbations de l'environnement du bâtiment	7
b. Qualité de l'air intérieur (QAI).....	7
c. La climatisation, ses impacts environnementaux et sanitaires en contexte urbain	8
d. La ville de Lyon dans une démarche d'adaptation de son bâti résidentiel ancien.....	9
e. Conclusion	9
2. Objectifs	9
II. Etat de l'art	11
1. Introduction	11
2. Le bâti ancien en ville : influence de la morphologie urbaine sur le confort thermique et la qualité de l'air en milieu urbain	11
a. Impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique en milieu urbain, l'importance de l'échelle de l'îlot.....	11
b. Les mécanismes et impacts de l'îlot de chaleur urbain : causes et effets.....	12
c. Influence de la morphologie urbaine sur la dispersion des polluants et la qualité de l'air intérieur.....	13
d. Des solutions de rafraîchissement qui se heurtent aux problèmes inhérents à la ville : les immeubles collectifs en centre-ville.....	14
3. Le bâti ancien : une architecture et des matériaux qui échangent avec l'environnement local ...	15
a. L'architecture vernaculaire, son adaptation au climat et son impact sur le confort thermique dans les bâtiments anciens.....	15
b. Caractéristiques thermiques et hydriques des parois dans le bâti ancien et matériaux employés	15
c. Impact de la perméabilité à l'eau et à l'air du bâti ancien sur le confort thermique et la qualité d'air intérieur en comparaison avec celui moderne	17
4. Typologies existantes sur le bâti ancien : un panel de bâtiments très large et une concentration d'études sur le confort d'hiver	18
a. TABULA.....	18
b. INSEE, CEREN et PACTE	18

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

c.	BATAN	20
d.	Projet CREATIV	23
5.	Impact des rénovations.....	24
a.	Réglementation et aides pour la rénovation du bâti ancien : recherche d'un équilibre entre performance énergétique et préservation	24
b.	Impact des rénovations sur l'humidité dans le bâti ancien : problèmes, pathologies et stratégies de préservation.....	25
c.	Les défis de la rénovation énergétique du bâti ancien : conséquences des rénovations pour le confort d'hiver sur le confort d'été	27
6.	Patrimoine lyonnais : matériaux, intérêt, histoire + typo lyonnaise historique.....	28
a.	Lyon : une richesse patrimoniale face aux enjeux d'adaptation au changement climatique ...	28
b.	Évaluation des caractéristiques climatiques et architecturales des quartiers historiques de Lyon	30
c.	Présentation d'un quartier emblématique : la Croix-Rousse, histoire de son urbanisation	34
d.	Typologie des bâtiments de la Croix-Rousse par sous-secteurs.....	35
7.	Conclusion de l'état de l'art	37
III.	Etude de cas	38
1.	Présentation de l'étude de cas	38
a.	Présentation générale	38
b.	Parois et planchers	41
c.	Menuiseries et protections solaires	43
d.	Classement de l'immeuble selon les typologies BATAN, TABULA et celle de J. Barre [22] de la Croix-Rousse.....	44
2.	Choix des outils et hypothèses sélectionnées.....	44
a.	Choix des logiciels	44
b.	Hypothèses des données d'entrée.....	45
c.	Données météorologiques	46
d.	Données d'occupation	48
e.	Choix des indicateurs de confort thermique et de QAI	49
f.	Description du modèle thermo-aéraulique des logements	49
g.	Modèle aéraulique dans CONTAM	50
h.	Modèle couplé dans TRNSYS.....	51
3.	Codes, méthode d'analyse	51

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAU LIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

4.	Résultats et analyse.....	52
a.	Analyse des bases de données météo	52
b.	Comparaison des températures issues de CONTAM et TRNSYS dans les différentes pièces	53
c.	Comparaison TAIR et TOP par boxplot	54
d.	Boxplot des températures dans un logement par cas et co	55
e.	Pièces les plus exposées.....	58
f.	Vérification des débits d'air entrant pour expliquer les différences de température	60
g.	Indicateurs thermiques	60
h.	Indicateur QAI	65
IV.	Discussion et propositions d'amélioration	70
V.	Conclusion	72
VI.	Remerciements.....	74
VII.	Table des figures	75
VIII.	Bibliographie	79
IX.	Annexes	82
1.	Annexe 1 : Fiche BDLisa sur la pierre de Couzon	82
2.	Annexe 2 : Fiches Tabula, exemple d'un immeuble collectif d'avant 1915	83
3.	Annexe 3 : Typologie des bâtiments Lyonnais des secteurs Vieux-Lyon, Saint-Just, Presqu'île, Ainay, Croix-Rousse et Chartreux	84
4.	Annexe 4 : Typologie des bâtiments de la Croix-Rousse par sous-secteur, explications détaillées	89
b.	Les immeubles à fonction commerciale prédominante du quartier des Capucins	89
c.	Les immeubles associant grand négoce et résidence de haut niveau autour de la place Sathonay.....	90
d.	Les immeubles-ateliers des Canuts	90
e.	Les immeubles mixtes, dernière phase d'urbanisation	92
5.	Annexe 5 : Tableaux récapitulatif des scénarios	94
6.	Annexe 6 : Capture d'écran de l'interface SimulationStudio de TRNSYS pour le Cas Réel	98
7.	Annexe 7 : Rendu sur CONTAM du cas réel, étage n°4	99
8.	Annexe 8 : Rendu sur SketchUp de la modélisation des 2 appartements	100
9.	Annexe 9 : Infographie de Baptiste Poirier sur la production d'humidité et de polluants par l'occupant [18].....	101
10.	Annexe 10 : Schéma d'isolation au chanvre issu de la thèse de Margot Ruiz [34].....	102

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

11.	Annexe 14 : Diagrammes boites à moustaches des différentes températures dans les pièces selon les différents scénarios pour le cas réel et le pire cas.....	103
12.	Annexe 15 : Histogrammes des indicateurs thermiques, agrandissement	105
13.	Annexe 16 : Graphiques des indicateurs de QAI, agrandissement	110

Notice analytique

AUTRICE			
Nom	Ferreira Lopes		
Prénom	Agnès		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme d'accueil	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA), L'Isle D'Abeau		
Nom du tuteur	Bassam MOUJALLED		
ANALYSE DU TFE			
Titre	Modélisation des performances thermiques et aéraulique du bâti résidentiel ancien lyonnais		
Title	Modelling the thermal and aeraulic performance of old residential buildings in Lyon		
Résumé	<p>Dans un contexte de changement climatique, la ville de Lyon cherche à entreprendre l'adaptation de son parc résidentiel ancien pour garantir le confort thermique et qualité de l'air intérieur. Ce travail de fin d'étude se concentre sur la modélisation des performances thermiques et aérauliques du bâti ancien lyonnais, en prenant pour cas d'étude un immeuble Canut du quartier de la Croix-Rousse. L'objectif principal est d'évaluer l'impact des scénarios climatiques futurs sur le confort thermique estival et la qualité de l'air intérieur, en intégrant les problématiques posés par le microclimat urbain. Cette étude s'appuiera sur la base d'un état de l'art scientifique approfondi sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur dans les immeubles collectifs urbains anciens et sur le patrimoine bâti lyonnais et sera suivi d'une étude de cas d'un logement représentatif.</p>		
Abstract	<p>In the context of climate change, the city of Lyon is seeking to adapt its old residential stock to guarantee thermal comfort and indoor air quality. This end-of-study project focuses on modelling the thermal and aeraulic performance of old buildings in Lyon, using a Canut building in the Croix-Rousse district as a case study. The main objective is to assess the impact of future climate scenarios on summer thermal comfort and indoor air quality, taking into account the problems posed by the urban microclimate. The study will be based on an in-depth scientific review of the state of the art in thermal comfort and indoor air quality in old urban apartment blocks and Lyon's built heritage, and will be followed by a case study of a representative dwelling.</p>		
Mots-clefs	Confort thermique – QAI – Bâti ancien – Lyon		
Keywords	Thermal Comfort – IAQ – Old building – Lyon		
Termes géographiques	France		
COLLATION			
	Nb de pages (avec ann.)	Nb d'annexes (nb pages)	Nb de réf. Biblio.
	116	13 (33)	39

Déclaration de travail personnel

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources référencées.

I. Introduction générale

1. Contexte

a. Perturbations de l'environnement du bâtiment

En 2022, la France a enregistré sa plus haute température moyenne depuis le début du XXe siècle, surpassant de 1,6°C celle de l'ère préindustrielle (1850) [1]. L'année 2023 a également dépassé cette température de 1,4°C et a été l'année la plus chaude du point de vue mondial. Comparativement à l'ère préindustrielle, les épisodes de chaleur extrême sont désormais plus longs, plus fréquents et plus intenses [1]. Cette augmentation est en partie imputable à l'activité humaine, responsable de l'augmentation moyenne de température annuelle de 1,1°C [2].

Le changement climatique intensifie les vagues de chaleur, les plaçant parmi les principales perturbations de l'environnement du bâtiment aux côtés de la pollution extérieure, des incendies, des coupures d'électricité, des pandémies et des séismes [2].

Les zones urbaines subissent une augmentation plus prononcée des températures en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) [3]. Les bâtiments anciens (construits avant 1948), constituant une part importante du logement en centre-ville, présentent des comportements distincts de ceux plus récents. L'addition du changement climatique, des vagues de chaleur et de l'ICU conduit inévitablement à une surchauffe des bâtiments, même dans des régions tempérées.

b. Qualité de l'air intérieur (QAI)

Le lien étroit entre la qualité de l'air et le climat est souligné par le GIEC, qui prévoit une augmentation de 30% à 50% des perturbations majeures comme les feux de forêt ou les vagues de chaleur. Les particules fines émises par les incendies forestiers soulèvent un risque respiratoire. Les futures vagues de chaleur entraîneront une détérioration de la qualité de l'air, imposant une pénalité climatique même dans des zones à faibles émissions [4]. Ainsi, la probabilité de rester confiné en raison de la pollution extérieure devrait augmenter. Par ailleurs, la qualité de l'air intérieur est cruciale, et nécessite de maîtriser la présence de polluants intérieurs tels que les particules fines et le formaldéhyde, reconnus nocifs pour la santé par le gouvernement.

L'efficacité de la ventilation des bâtiments est essentielle pour assurer une bonne QAI toute l'année (avec des débits minimaux hygiéniques), et rafraîchir les logements en été (avec des débits plus importants, principalement par ouverture des fenêtres). La pandémie de COVID-19 a notamment souligné son importance dans la limitation de la propagation des agents pathogènes.

Une bonne aération et une bonne ventilation sont nécessaires pour maintenir un air intérieur sain, prévenir les risques de condensation et minimiser les dommages aux bâtiments, mais aussi rafraîchir les bâtiments en période chaude en tenant compte de l'environnement extérieur (exposition à la pollution extérieure et au bruit notamment). Cette démarche doit également garantir l'efficacité énergétique, même lors d'événements climatiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les feux de forêt ou les coupures d'électricité.

c. La climatisation, ses impacts environnementaux et sanitaires en contexte urbain

Avec l'augmentation des vagues de chaleur, les systèmes de climatisation actifs gagnent en popularité en raison de leur capacité à maintenir une température confortable de manière abordable. Selon EDF et l'INSEE, la possession de climatisations en France est passée de 11-14% en 2017 à 22-25% en 2019, avec une croissance plus marquée dans les maisons individuelles (31% contre 20% pour les habitations collectives). À court terme, une augmentation significative de l'utilisation de la climatisation est à craindre, malgré les inquiétudes liées à ses émissions de CO₂ et de gaz à effet de serre, ainsi qu'à son impact sur les îlots de chaleur urbains et la consommation énergétique [5].

En Europe, le secteur du bâtiment représente 40% de la consommation finale d'énergie [6]. L'usage de la climatisation entraîne des émissions de CO₂ de 0,9 million de tonnes liées à la consommation électrique et de 3,5 millions liées aux fluides frigorigènes tels que le R-410 [5]. Bien que des innovations futures laissent espérer des fluides plus respectueux de l'environnement, la dépendance à l'électricité a des limites, notamment pendant les coupures de courant. Des mesures visant à réduire la surchauffe des bâtiments tout en limitant la consommation d'énergie sont impératives [7].

La surchauffe des bâtiments est devenue une question de santé publique en raison de ses impacts sur la santé, le confort et la sécurité des occupants [7]. De surcroît, le contexte urbain crée un microclimat local, amplifiant les effets des vagues de chaleur, notamment la nuit, entravant la gestion du confort intérieur pour le repos optimal des occupants. En effet, la géométrie urbaine conduit à un piégeage radiatif (inter-réflexions solaires et infrarouges), un stockage de la chaleur et une réémission de la chaleur plus faible [6] réduisant les possibilités de rafraîchissement nocturne des bâtiments.

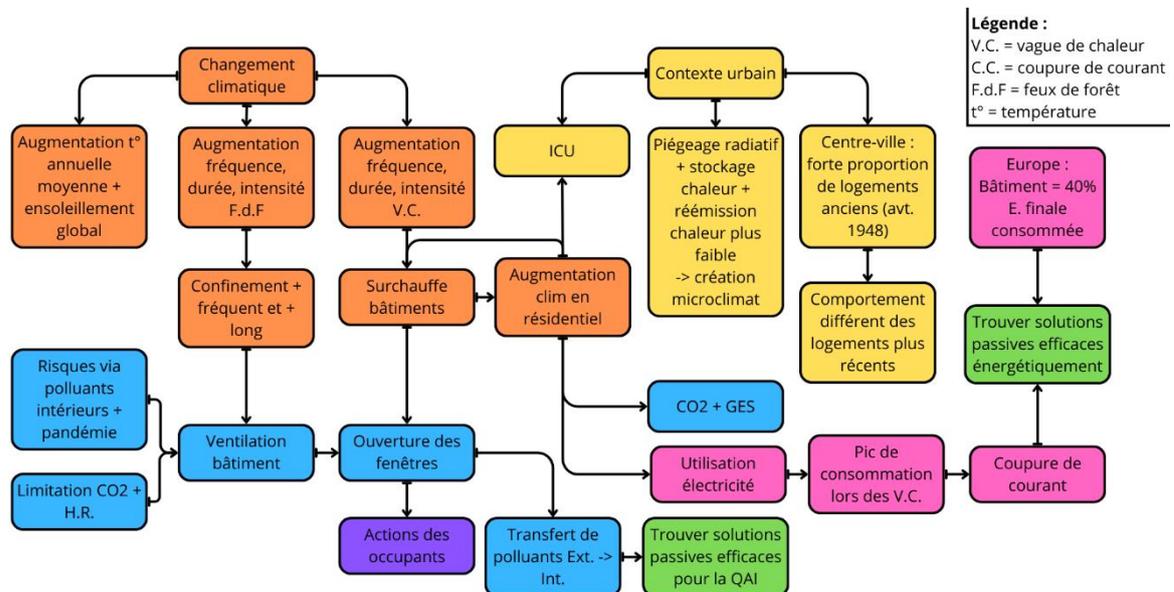


Figure 1 : Infographie de synthèse du contexte des bâtiments résidentiels urbains face au réchauffement climatique

d. La ville de Lyon dans une démarche d'adaptation de son bâti résidentiel ancien

Le centre de la Ville de Lyon est principalement constitué de bâtiment anciens ; dont une grande partie est remarquable , inscrite ou classée [8] et correspond donc au contexte du centre-ville ancien face au réchauffement climatique expliqué précédemment.

La ville a répondu à l'appel à manifestation d'intérêt « 100 villes climatiquement neutres et intelligentes d'ici 2030 » lancé par l'Europe. Afin de répondre à cet appel, elle cherche à étudier l'adaptation climatique de la partie du parc immobilier résidentiel lyonnais privé, construit avant 1948, situé en Sites Patrimoniaux Remarquables (SPR), régie par le statut de la copropriété et présentant souvent une forte valeur architecturale, urbaine et paysagère. Cette étude s'inscrit dans la révision des outils de mise en valeur patrimoniale de la ville (extension patrimoniale, révision du Plan de Sauvegarde et Mise en valeur (PSMV) ; création de Plan de Valorisation de l'Architecture et du Patrimoine (PVAP), extension des SPR, révision du plan de gestion UNESCO [9]. Cette étude sera lancée dans les années à venir mais la Ville de Lyon a déjà commencé à rassembler d'anciennes études de bâtiments spécifiques afin d'évaluer la situation actuelle.

e. Conclusion

Dans un contexte de changement climatique qui perturbe l'environnement urbain local, les villes cherchent à adapter leur centre ancien afin de garantir une bonne qualité d'air intérieure et un certain confort thermique en valorisant des solutions de rafraîchissement passives. La ville de Lyon est proactive dans cette démarche avec une volonté de lancer une étude de grande ampleur sur l'adaptation de son patrimoine au changement climatique.

La modélisation des bâtiments anciens sous des projections climatiques futures permet de visualiser leur future adaptation. Il s'agit donc d'une étape importante du processus de recherches de solutions d'adaptation. Cette modélisation doit prendre en compte tant le confort thermique d'été que l'impact sur la QAI des solutions de rafraîchissement passives. C'est pourquoi, au cours de ce Travail de Fin d'Etude, nous nous demanderons **comment modéliser de manière efficace les performances thermiques et aérauliques, ainsi que leurs influences réciproques, du bâti résidentiel ancien lyonnais dans un contexte de changement climatique.**

2. Objectifs

L'objectif de ce Travail de Fin d'Etude est d'évaluer l'impact du changement climatique sur la qualité de l'environnement intérieur (incluant le confort thermique et la QAI) du bâti ancien lyonnais. Cet impact sera évalué selon différents scénarios de changement climatique et tiendra compte du microclimat urbain. L'approche de modélisation utilisée sera un couplage thermo-aéraulique prenant en compte le transport de polluants.

Tout d'abord, je vais dresser un état de l'art sur les spécificités thermiques et aérauliques du bâti ancien en milieu urbain d'un point de vue général puis ferai un focus sur le patrimoine lyonnais, notamment sur le quartier de la Croix-Rousse.

Cet état de l'art me permettra de définir l'étude de cas correspondra à une typologie de bâti ancien lyonnais.

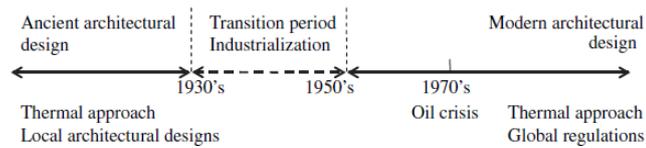
Après avoir présenté les caractéristiques architecturales, thermiques et aérauliques de l'étude de cas, je détaillerai l'approche de modélisation utilisée, en précisant notamment le choix des outils, les différentes hypothèses relatives aux données météorologiques et celles liées à l'occupation et les indicateurs de confort thermique et de QAI sélectionnés.

Enfin, je présenterai le plan de simulations paramétriques, avec les résultats et les analyses.

II. Etat de l'art

1. Introduction

Le bâti ancien regroupe plusieurs époques de construction, formant un tout hétérogène. Cependant, deux périodes, liées par une période de transition, sont visibles (Figure 2). La limite entre bâti ancien et récent, d'un point de vue réglementaire, est placée avant l'émergence de l'architecture moderne, en 1948 [10], [11]. Les constructions anciennes emploient des techniques et matériaux locaux (pierres, terre crue, etc.) tandis que celles des années 1950-1970, correspondant à la période des Trente Glorieuses, utilisent du béton et des parpaings creux [8].



En France, le bâti ancien représente 43% du parc français métropolitain [11] et un tiers du parc résidentiel français [10], [12].

2. Le bâti ancien en ville : influence de la morphologie urbaine sur le confort thermique et la qualité de l'air en milieu urbain

a. Impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique en milieu urbain, l'importance de l'échelle de l'îlot

La morphologie urbaine joue un rôle important dans le confort d'été. Le vieux Nice, par exemple, assure un certain confort d'été par la circulation de l'air par tirage thermique et les zones très ombragées [13].

Les « rues canyon », rue étroite bordée de bâtiment, empêchent les vents de circuler et font stagner les masses d'air. Cette forme urbaine, très courante dans les centres-villes anciens, rend le rafraîchissement difficile. Cette appellation est donnée par un indice de construction de Landberg (Largeur rue / Hauteur bâti) inférieur à 1,5.

L'orientation de la rue a aussi un impact sur le confort d'été. Les alignements Nord-Sud ne reçoivent du rayonnement solaire que lorsque le soleil est au zénith, permettant une limitation des apports solaires par rapport à un axe Est-Ouest où la rue est ensoleillée toute la journée [14]. Toutefois, dans la première configuration, les bâtiments se retrouvent alors orientés Est-Ouest, soit l'orientation la plus défavorable, maximisant les apports solaires dans les logements au cours de la journée.

Le centre-ville historique est formé de petits blocs de bâtiments, appelés îlots. La forme de ces îlots conditionne la mitoyenneté et les apports solaires du bâtiment [15].

Les auteurs du rapport BATAN [15] les ont classés selon 4 catégories :

- Catégorie I : îlots fermés de centre ancien.
- Catégorie II : îlots haussmanniens.
- Catégorie III : îlots fermés bas ou maisons alignées.
- Catégorie IV : maisons ou villas isolées ou dispersées

La dernière catégorie est trop rare en ville pour qu'elle puisse nous intéresser par la suite.

Implantation	I/ îlots fermés de centre ancien				II/ haussmannien		III/ îlots fermés bas ou maisons alignées		IV/ maisons isolées ou dispersées	
	A et B		C		A		A et B		C	
Mode constructif	A et B		C		A		A et B		C	
Matériaux	1	■			■		■		■	
	2		■			■		■		
	3						■			
	4			■						■

Figure 3 : Typologie d'îlots [15]

Le classement peut s'effectuer en se posant ces trois questions à la suite :

- Le bâtiment est-il mitoyen ? (Non : on sort du cas de la ville : catégorie IV)
- Si oui, l'îlot occupé est-il très dense ? (Non : catégorie III)
- Si oui, existe-il une cour intérieure ? (Non : catégorie I, Oui : catégorie II)

b. Les mécanismes et impacts de l'îlot de chaleur urbain : causes et effets

« L'îlot de chaleur urbain (ICU) est un phénomène du climat local qui se caractérise par des températures plus élevées en ville par rapport à la campagne environnante, ou à une moyenne régionale. Il s'agit d'une sorte d'anomalie climatique qui est la conséquence directe de l'artificialisation du milieu naturel par l'Homme » (Apur, 2013, [16])

L'ICU est influé par la morphologie urbaine, par les matériaux urbains (surfaces fortement minérales) et aux apports de chaleur anthropique. L'ICU se ressent essentiellement en fin de journée et la nuit en été [14].

Les causes principales de l'ICU sont :

- Le piégeage radiatif dû aux multiples réflexions du rayonnement solaires sur les multiples surfaces présentes. Les parois des bâtiments et le sol absorbent progressivement tous ces flux radiatifs, limitant le rayonnement infrarouge par déperdition avec la voûte céleste. Cet effet est aussi appelé albédo urbain.
- Le ralentissement du vent et la perturbation des écoulements d'air par la géométrie citadine, diminuant l'évacuation par convection de la chaleur.
- La faible présence de végétation amenant à une évapotranspiration limitée et donc à une limitation des échanges de flux latents entre les surfaces urbaines et l'air

- Les émissions de chaleur sensible d'origine anthropique (trafic routier, systèmes de climatisation notamment) [14].

Pour plusieurs types de formes urbaines, les plus courantes, il a été démontré qu'il y avait une densité bâtie critique située entre 30% à 40% où les façades jouent un rôle important dans le piégeage solaire. Ceci conduit à une valeur minimale de l'albédo urbain. En dessous de cette densité critique, la rugosité plus faible conduit à moins d'inter-réflexions ; au-dessus, le rayonnement solaire pénètre moins dans les rues [14].

c. Influence de la morphologie urbaine sur la dispersion des polluants et la qualité de l'air intérieur

La morphologie urbaine (densité et forme bâtie, orientation des axes de circulation...) a un impact tant sur le confort thermique que sur la concentration de polluants. Pour les mêmes raisons que l'ICU, la forme, l'orientation et la pente des rues constituent des obstacles à l'écoulement de l'air et donc à la dispersion des polluants [14].

La rue canyon, notamment est la forme la plus propice à l'accumulation de polluants. Une rue large avec de forts trafics, ne sera pas forcément plus polluée qu'une rue étroite avec un trafic faible [14].

Les polluants présents dans les logements en ville sont de différentes sortes et différentes sources (interne / externe).

Les polluants gazeux rassemblent les composés inorganiques tels que les oxydes d'azote, l'ozone et le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils (COV) comme le formaldéhyde, le benzène, le toluène et le radon. Les composés organiques semi-volatils (COSV) comme les pesticides et insecticides, les phtalates se retrouvent à la fois à l'état liquide et gazeux [17].

Les particules fines (PM) regroupent les fibres, les poussières, les particules (métalliques, organiques et minérales). Elles peuvent être groupées selon leur diamètre ($d \leq 2,5 \mu\text{m}$ pour les PM2.5 par exemple). Les bio-contaminants incluent les moisissures, les allergènes, les virus et les bactéries [17].

Les sources d'émission de ces polluants sont variées : constituants du bâtiment, du mobilier, appareils à combustion (chaudières, poêles, chauffe-eau, etc.), transfert de la pollution extérieure. Elles sont également issues des modes de vie (tabagisme ou présence d'animaux domestiques par exemple) [17].

L'humidité et le CO2 ne sont pas considérés comme des polluants mais constituent de bons indicateurs de la QAI. Le CO2, corrélé à la respiration humaine et à l'émission de bio-effluents, qui peuvent avoir un impact sur la santé (maux de tête, nausées), est le marqueur de confinement lié à l'occupation le plus utilisé. Plusieurs seuils marquants existent. Le plus utilisé est celui de confort, à 1000 ppm mais d'autres, avec des impacts sanitaires plus importants existent aussi à 5000 ppm et 10 000 ppm [18].

Les PM2.5 et les PM10 sont liées aux activités humaines telles que la cuisine pour les premières et la circulation automobile pour les secondes. Il s'agit de la première source de pollution à laquelle est soumise l'être humain [17], [18]. Le NO2 et le SO2 sont aussi des marqueurs liés à l'activité humaine mais

principalement pour la pollution extérieure. Les COV et COSV sont plutôt liés aux matériaux et sont principalement des polluants [17].

D'après Poirier & al. [18], les polluants de plus grande importance concernant les expositions chroniques sont : les PM, l'humidité et moisissures puis le formaldéhyde. Pourtant, seul le formaldéhyde (avec le benzène) voit son seuil fixé par décret (décret 2011-1727).

d. Des solutions de rafraîchissement qui se heurtent aux problèmes inhérents à la ville : les immeubles collectifs en centre-ville

La surventilation nocturne fait partie des solutions de rafraîchissement possibles. Cependant, en ville, il peut être difficile d'ouvrir ses fenêtres, principalement pour des raisons de sécurité, de bruit, d'intimité, limitant le rafraîchissement des pièces [19].

Par ailleurs, l'environnement urbain peut influencer sur les débits de ventilation naturelle (obstacles tels que les bâtiments alentours ou la végétation) [14], [20]. Ces obstacles, appelés masques, jouent également le rôle de protection solaire, permettant ainsi une protection face au rayonnement solaire direct.

Le rôle de protection solaire est néanmoins joué majoritairement par les systèmes d'occultation des différentes ouvertures des logements. L'efficacité des occultations varie selon la nature de celles-ci : intérieures ou extérieure, opaques ou translucides, d'un seul tenant ou à lames orientables. Ces occultations peuvent également avoir un impact sur la ventilation naturelle à travers les fenêtres selon leur perméabilité et leur taux de fermeture. Par exemple, les volets roulants opaques, une fois baissés, obstruent totalement l'ouverture.

De plus, les contraintes architecturales ou urbanistiques, intervenant en site patrimonial protégé, obligent les propriétaires à avoir un certain type d'occultation solaire, en interdisant souvent les protections extérieures. Or, les centres-villes anciens sont souvent concernés par la protection des sites patrimoniaux.

Les centres-villes anciens concentrent une part importante d'immeubles collectifs antérieurs à 1948. En plus de la diversité de bâtiments due à la plage temporelle couverte, il y a une grande diversité de situations au sein d'un même immeuble selon l'exposition au vent et au rayonnement solaire direct, ainsi qu'à la présence ou non d'espace tampon, espace source de fraîcheur. Ainsi, l'orientation du logement, s'il est traversant ou non, sa position au sein de l'immeuble (rez-de-chaussée, intermédiaire, sous les toits) et sa mitoyenneté avec d'autres logements vont jouer sur le confort thermique des occupants. Sa proximité avec une cour, une galerie, une traboule (passage couvert reliant plusieurs immeubles, emblématique du patrimoine lyonnais) ou au contraire sa vue directe sur une rue canyon affecteront également ce confort.

Les espaces aménagés en logement a posteriori à partir des combles perdus (ancien grenier) ou des chambres de bonne, fréquents dans les grandes villes telles que Paris, Lyon ou Strasbourg, sont plus vulnérables à la surchauffe que les autres logements positionnés plus bas au sein de l'immeuble. Ils possèdent plus de surfaces exposées, notamment par l'intermédiaire du toit, et ne sont pas toujours très bien isolés.

3. Le bâti ancien : une architecture et des matériaux qui échangent avec l'environnement local

a. L'architecture vernaculaire, son adaptation au climat et son impact sur le confort thermique dans les bâtiments anciens

Les logements anciens possèdent une architecture vernaculaire, adaptée au climat local. Cette architecture permet une relative bonne conservation du confort intérieur en été [8].

Les bâtiments anciens possèdent souvent des espaces tampons tels que des entrées, couloirs, combles, appentis [11]. Les espaces semi-ouverts tels que les cours intérieures, les patios, traboules, galeries, arcades ont également un fort pouvoir rafraîchissant [8]. Plusieurs degrés de différence sont observés entre le centre des îlots (cours intérieures) et la rue [10].

Les bâtiments anciens sont beaucoup plus perméables que ceux plus récents où les échanges sont contrôlés mécaniquement. L'enveloppe est le théâtre de plusieurs échanges d'air et d'humidité par les infiltrations dans les parois [10]. Ainsi, grâce à ces interactions, il y a une forte corrélation thermique entre le climat extérieur et intérieur [8].

Jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle où les logements des plus précaires deviennent mono-orientés [20], les logements sont traversants (c'est-à-dire avec des ouvertures sur au moins deux façades, permettant la création de courant d'air), permettant un rafraîchissement par courant d'air l'été [11]. Cette disposition permettait la ventilation, encore non mécanisée [20]. La ventilation naturelle est essentiellement employée dans les logements anciens et la ventilation mécaniques dans ceux récents ou neufs [20].

Avant 1948, le ratio des ouvertures était généralement plus faible que dans les logements construits après. Il n'était pas rare d'avoir un simple puits de lumière en cœur d'îlot tellement les parcelles sont denses [20]. Par ailleurs, les protections solaires diffèrent entre les 2 périodes de manière marquée : les volets battants extérieurs laissent place aux volets roulants [21]. Le cas de Lyon est un peu particulier puisque ses protections solaires ont été, jusqu'à l'apparition de la construction moderne, les jalousies en bois dont le jeu d'inclinaison des planches permet d'assurer un certain confort thermique en été [22].

Le bâti ancien n'est pas forcément plus consommateur d'énergie que celui de la période 1949-1974 [10], [15]. La différence de consommation se joue sur la mitoyenneté des immeubles [15]. En effet, comme vu précédemment, les bâtiments anciens sont souvent regroupés en îlots très serrés, à l'inverse des barres d'immeubles et maisons pavillonnaires non contiguës de l'immédiat après-guerre. Cette contiguïté, en améliorant la compacité, diminue les pertes et gains thermiques vers l'extérieur, conservant une température de confort dans les immeubles.

b. Caractéristiques thermiques et hydriques des parois dans le bâti ancien et matériaux employés

Le bâti ancien est constitué de matériaux naturels trouvés dans un périmètre proche et peu manufacturés. Ses parois présentent de bonnes qualités thermiques et hydriques naturellement. L'épaisseur, les matériaux employés, le liant utilisé dans ces parois déterminent les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur [9], [11].

Les matériaux employés dans le bâti anciens ont la pierre, le bois, le mortier, la terre crue ou cuite en structure et plâtras, sables, scories de haut fourneaux en remplissage de plancher [20]. Ces matériaux fournissent généralement une sensation de paroi froide, appréciée en été mais inconfortable en hiver [11].

L'inertie des parois est généralement très lourde et les matériaux de gros œuvre présentent de microporosité dans le bâti ancien. Cette inertie est le principal atout du bâti ancien en été. Le déphasage peut atteindre parfois une douzaine d'heures au moment le plus chaud de la journée [11]. En épisode de canicule, les bâtiments mettent quelques jours avant de devenir désagréable à vivre à cause de la chaleur [20].

Toutefois, les valeurs théoriques des propriétés des parois telle que la conductivité doivent être considérées avec prudence car ce sont des valeurs de laboratoire, surtout dans le cas du bâti ancien où les matériaux sont hétérogènes et leur propriétés hygrothermique variables et anisotropiques [10]. C'est pourquoi il est souvent plus pertinent de décrire la paroi avec le triplet conductivité, diffusivité thermique, perméabilité à la vapeur d'eau [15].

La maçonnerie de pierre est la technique de construction ancienne la plus courante en France métropolitaine. Toutefois, cela brasse un champ très large car la pierre est un matériau présentant une grande diversité. Les pierres employées sont généralement extraites localement à cause du coût élevé de transport [10]. Juste après la pierre vient la brique de terre cuite, matériau manufacturé à partir d'argile et employé dans les régions où la pierre est rare et le sol argileux. Jusqu'en 1930, les dimensions des briques n'étaient pas standardisées et variaient donc d'une région géographique à une autre [10].

Les liaisons façade-plancher sont discontinues, dans un premiers temps pour éviter le pourrissement ou l'oxydation des poutres [10]. Cela favorise la forte inertie du bâtiment en limitant les ponts thermiques dans ces zones [15].

Les façades sont souvent recouvertes d'un enduit ou d'un crépi à la chaux, en particulier pour le bâti antérieur à 1915. A l'inverse, l'absence de revêtement est plus courante dans la période 1915-1948. Le matériau de remplissage le plus courant est alors la brique (51%) et la pierre (moellon, meulière, de taille) (41%).

Globalement, on remarque que le comportement thermique du bâti ancien est très dépendant de l'environnement local dans lequel il se trouve. Les propriétés hygrothermiques et la forte inertie de ses parois, la présence d'espaces tampons sont propres à ce type de bâtiment. Actuellement, les modèles de calcul existant, notamment réglementaires, ont du mal à prendre en compte la complexité du comportement thermique du bâti ancien. Souvent, les simulations divergent des données relevées [23].

Le bâti ancien est un système vivant en perpétuelle quête d'équilibre entre les environnements intérieur et extérieur. Cet équilibre dépend du mode d'occupation et donc de la gestion du logement par l'occupant [24].

Les occupants de logements anciens ont tendance à trouver leur intérieur plus stable thermiquement parlant que ceux de logement récent avec de l'air conditionné (39% de plus) [25].

c. Impact de la perméabilité à l'eau et à l'air du bâti ancien sur le confort thermique et la qualité d'air intérieur en comparaison avec celui moderne

Le bâti contemporain, par son étanchéité, s'isole des apports d'eau tandis que le bâti ancien contient de l'eau qu'il équilibre selon les données de l'environnement extérieur. Par exemple, l'eau contenue dans les murs anciens crée du froid en s'évaporant sous les rayons du soleil, permettant un rafraîchissement des logements pendant la saison chaude [11].

La perspiration des matériaux, en régulant l'hygrométrie intérieur, joue également de manière favorable sur le confort d'hiver [20].

La transition de la vapeur d'eau à travers les murs est due aux matériaux employés dans les parois. Ceux-ci sont eux-mêmes perméables à la vapeur d'eau [20].

Dans les bâtiments anciens non modifiés, la ventilation se fait essentiellement par la faible étanchéité à l'air [11], [20]. Ces bâtiments perspirants satisfont généralement une bonne qualité d'air intérieur. Plusieurs études montrent que la perméabilité des enveloppes du parc ancien varie de $3 \text{ m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ à $1,7 \text{ m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ avec une moyenne à $2,5 \text{ m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ [20].

Toutefois, ce renouvellement d'air permanent représente de fortes déperditions thermiques en hiver (jusque 30%) mais est essentiel au renouvellement de l'air dans les logements. Les défauts d'étanchéité à l'air se situent essentiellement entre les étages, à la jonction menuiseries-maçonnerie et au niveau de la toiture [11].

Le bâti ancien présente une concentration de formaldéhyde plus faible que dans celui contemporain. Les bâtiments en pierre (dont 84% ont été construites avant 1948) ont des taux de formaldéhyde plus faible que ceux construits en béton (dont 92% ont été construits après 1948) [20].

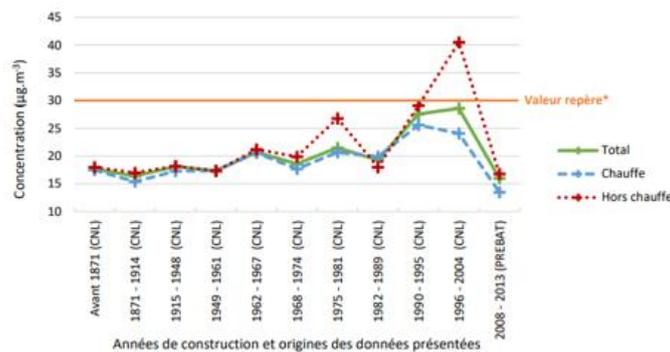


Figure 4 : Influence de la période de construction sur la concentration en formaldéhyde dans les logements. Valeur repère de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$: valeur maximale proposée par le projet européen INDEX (LaSIE, 2021) [20]

4. Typologies existantes sur le bâti ancien : un panel de bâtiments très large et une concentration d'études sur le confort d'hiver

a. TABULA

La typologie proposée dans le cadre de cette publication classe les bâtiments selon leurs performances énergétiques en période de chauffe. Il ne s'agit pas d'une classification architecturale ou régionale. Par ailleurs, elle ne prend pas en compte le confort estival et son classement s'étend jusqu'aux bâtiments des années 2010 [26].

La classification TABULA sépare les bâtiments anciens en deux périodes : une première allant jusqu'en 1850 et une autre de 1850 à 1948. La première période se caractérise par une grande disparité de modes constructifs et de matériaux employés, très régionalisés. La deuxième période se caractérise par une industrialisation des matériaux du bâtiment et la généralisation des modes constructifs à l'échelle nationale [26].

Toutefois, la date de distinctions entre les deux types de bâtiments anciens est placée en 1915, afin de correspondre au classement INSEE de l'époque. Les bâtiments récents sont eux classés en 8 périodes, ponctuées par les différentes réglementations [26].

Les bâtiments sont également classés selon leur caractéristiques géométriques (taille, compacité, mitoyenneté) qui impactent fortement les besoins de chauffage. Le projet Tabula définit quatre classes de base :

- SFH (Single-Family House) : maison individuelle isolée sur sa parcelle,
- TH (Terraced House) : maison individuelle mitoyenne sur un ou deux côtés,
- MFH (Multi-Family House) : petit immeuble de logements collectifs avec moins de 10 logements, mitoyen ou isolé,
- AB (Apartment Block) : grand immeuble de logements collectifs avec plus de 9 logements [26].

b. INSEE, CEREN et PACTE

D'après l'INSEE, il y a, en France, 5 080 446 maisons individuelles et 2 743 504 immeubles (composés de logements collectifs) construits avant 1948 [15]. Cependant, si l'on considère plutôt un ratio de surface, la répartition devient $\frac{3}{4}$ individuel et $\frac{1}{4}$ collectif du fait de la surface plus importante des logements individuels. En particulier, les maisons construites avant 1915 correspondent à 50% de tout le parc ancien. Parmi les immeubles collectifs, les bâtiments de moins de quatre étages représentent près de 90% [15].

D'après les données CEREN 1979, la structure des éléments porteurs verticaux d'avant 1948 sont à 92 % continues lourdes, 5 % en pans de bois et 1.7 % en ossature béton. Les pans de bois représentent 9% des bâtiments avant 1871, et l'ossature béton apparaît en 1915 à hauteur de 5 % [15].

Toujours d'après les données CEREN 1979, les matériaux constitutifs des parois avant 1948 sont à 38% en moellons, 28 % en briques pleines, 10% en pierre de taille et 6 % en torchis, 4.5 % en meulière. Le torchis

Agnès Ferreira Lopes
**MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS**

représente 11 % des parois avant 1871, et la brique pleine un tiers des parois pendant l’entre-deux-guerres (1914-48) [15].

On note une distinction déjà relevée avant entre les bâtiments d’avant 1915 et d’après 1915. La séparation statistique des bâtiments anciens dans l’enquête CEREN se fait néanmoins en trois périodes : avant 1871, 1871-1914 et 1915-1948, alors que les données INSEE ne séparent qu’autour de la date stratégique de 1915 [15].

Type d'immeuble	Avant 1871	1871-1914	1915-1948	1949-1961	1962-1968
1 logement	2 100 000	1 690 000	1 520 000	1 155 000	700 000
2 à 4 logements	610 000	670 000	435 000	210 000	70 000
5 à 9 logements	270 000	425 000	200 000	220 000	195 000
10 à 19 logts	150 000	420 000	250 000	380 000	370 000
20 logts ou plus	70 000	245 000	220 000	260 000	300 000
Ensemble	3 200 000	3 450 000	2 625 000	2 225 000	1 635 000

Figure 5 : Nombre de logements par type et période à partir des données INSEE [15]

Par ailleurs, Pascale Graulière a répertorié les principaux types architecturaux du bâti ancien et leur période d’apparition. Cette étude n’est plus disponible aujourd’hui, seules les mentions dans d’autres articles sont accessibles.

Numérotation des types	Avant XIXème siècle	Fin XIXème - 1914	1914 – 1948
Individuel			
1	Maison rurale		
2	Maison de bourg +	matériaux industriels	
3	Maison bourgeoise +	matériaux industriels	
4			Villa éclectique
5			Pavillon de banlieue
6			Pavillon ouvrier
Collectif			
7	Immeuble de bourg		
8	Immeuble historique		
9			Immeuble ouvrier
10			Immeuble Haussmannien
11			Immeuble éclectique
12			Immeuble HBM
13			Immeuble moderne

Figure 6 : Principaux types architecturaux du bâti ancien et période d’apparition, répertoriés par P. Graulière [15]

Les règles de l’art Grenelle Environnement 2012 permettent la mise à jour du rapport RAGE de 2007. Un nouveau programme, PACTE, Programme d’Action pour la qualité de la Construction et de la Transition Energétique, sort en 2017. L’objectif n’est pas de créer une nouvelle typologie, mais plutôt d’établir une typologie issue du croisement de différentes sources [20].

Concernant les enjeux de surchauffe et de qualité d’air, ces fiches décrivent :

- Les matériaux constructifs,
- La présence d’une isolation ou non (si oui, valeur moyenne de résistance thermique),
- Le type de menuiseries (simple ou double vitrage, selon deux générations : de 1982 à 2000 et de 2000 et 2010), menuiserie bois, aluminium ou PVC,

- Le rapport plein/vide en façade, qui caractérise le rapport des surfaces de menuiseries sur la surface des façades, ainsi qu'une information sur le coefficient surface vitrée/m² SHAB¹ (faible, moyen, important),
- Information sur la perméabilité à l'air (mauvaise, bonne),
- Information sur le type de ventilation (naturelle par défauts d'étanchéité et ouverture des fenêtres, naturelle par conduit individuel, naturelle par conduit SHUNT², mécanique autoréglable, mécanique hygroréglable). La distinction entre mécanique simple flux et mécanique double flux n'est pas faite,
- Informations relatives à l'organisation intérieure : la hauteur sous plafond,
- Informations relatives à la géométrie du bâtiment : compacité et taux de façade mitoyenne [20].

A la différence du projet TABULA, aucune rénovation éventuelle sur un quelconque poste n'est prise en compte ici : l'état actuel correspond à l'état d'origine [20].

c. BATAN

Cette typologie se concentre uniquement sur le bâti ancien mais se limite à la période de chauffe. Elle est élaborée à partir d'une approche systémique. Chaque bâtiment est alors vu comme un ensemble de systèmes multiples et interdépendants. Trois systèmes finaux sont décidés afin d'établir la typologie thermique :

- Le système macroscopique : implantation du bâtiment par rapport aux autres édifices bâtis,
- Le système microscopique : matériaux de l'enveloppe et leurs propriétés thermiques,
- Le système intermédiaire : modes constructifs, inertie résultant des combinaisons des différentes parois [15].

Le projet BATAN a élaboré quatre catégories d'implantation déjà vu dans la typologie urbaine (Impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique en milieu urbain) correspondant au système macroscopique.

Concernant le classement des matériaux employés dans les parois, quatre critères ont été retenus : le déphasage temporel, l'effusivité, la résistance thermique et le facteur de résistance à la vapeur d'eau [15].

La première catégorie comprend les roches denses et très denses, de conductivité moyenne à forte tels que le granit, le basalte, le gneiss, le grès quartzeux, le calcaire extra-dur, ardoise et schiste. Elles présentent toutes une épaisseur de mise en œuvre moyenne de 50 cm et une forte conductivité, du fait de leur densité importante. Elles ont une grande conductivité et une grande capacité thermique volumique, ce qui fait qu'elles vont rapidement conduire l'énergie, la capter en grande quantité, puis la restituer de la même manière. Cette capacité de stockage/déstockage est un atout, contrebalancé par une diffusivité forte. Leur déphasage est faible par rapport aux autres matériaux étudiés ici (mais tout de même 3 fois plus important que du béton). Leur grande effusivité est bénéfique l'été si les apports de chaleurs sont correctement restitués par une aération nocturne [15].

¹ SHAB : Surface Habitable

² Conduit avec une partie collectrice rejoignant une partie collective, fonctionne par tirage naturel

La deuxième catégorie est constituée des matériaux de densité moyenne et de faible conductivité représentés par le calcaire tendre et la brique de terre cuite pleine. Ces deux matériaux permettent une bonne performance en thermique d'hiver : une résistance thermique importante, une diffusivité pas trop élevée et une effusivité thermique moyenne qui a encore un bon intérêt. Toutefois, même si leur faible diffusivité permet de se protéger des phénomènes thermiques extrêmes, le confort d'été sera moins préservé que dans la catégorie précédente [15].

Une troisième catégorie contient les terres crues et roches extra-tendres : pisé, adobes, bauge, calcaire extra-tendre (tuffeau). Leur faible diffusivité protège des vagues de chaleur et de froid. Cependant, leur capacité de stockage/déstockage est moins bonne que les autres catégories à cause de leur faible effusivité. Leur avantage est de présenter une bonne résistance thermique et une mise à température ambiante rapide des parois en hiver [15].

La dernière catégorie comprend les matériaux de faible densité et conductivité tels que les pierres poreuses naturelles, les briques creuses, le bois et le torchis (mélange de terre crue à forte teneur argileuse et de plantes sèches, généralement de la paille). Pour les roches poreuses et les briques creuses, leur très bonne résistance thermique et leur grand déphasage sont avantageux. En revanche, ces matériaux présentent très peu d'inertie en tant que stockage et donc sont très sensible aux changements de température extérieur [15].

Pour le torchis, il est difficile de généraliser. Sa composition est très variable selon les régions et son mode constructif possède de nombreuses variantes qui ont un impact sur les caractéristiques de la paroi. De plus, le schéma de l'enveloppe passe d'une succession de couches verticales de l'extérieur vers l'intérieur de la paroi à un assemblage côte-à-côte de l'ossature bois et du remplissage torchis. Toutefois, le caractère peu dense du matériau fournit une bonne résistance thermique malgré une faible épaisseur mais également une faible inertie de stockage [15].

Ensuite, en combinant les matériaux employés à l'épaisseur des parois, trois modes constructifs se dégagent :

- Catégorie A : bâtiment à inertie très lourde,
- Catégorie B : bâtiment à inertie lourde,
- Catégorie C : bâtiment à inertie moyenne (bâtiments à colombages) [15].

Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

Catégorie		Classe d'inertie quotidienne	Classe d'inertie séquentielle	Murs	Plancher bas	Plancher haut	Type de bâtiment
A	Très lourd	Très lourde	Lourde	Pierre, Brique, Terre crue	Pierre, Hourdis, remplissage	Tous types	Bâtiment sans étage avec plancher bas lourd
							Bâtiment avec étage et plancher courant lourd
							Bâtiment haussmannien au plancher courant lourd
B	Lourd	Lourde	Moyenne	Pierre, Brique, Terre crue	Bois	Bois	Bâtiment avec étage et plancher courant léger (bois)
C	Moyen	Moyenne	Légère	Torchis	Tous types	Tous types	Bâtiment à colombages

Figure 7 : Catégories des modes constructifs relevés dans le bâti ancien [15]

Ainsi, la plupart des maisons paysannes (sans étage) se retrouvent dans la catégorie A, avec également les immeubles haussmanniens. Les maisons bourgeoises, maisons de ville et immeubles dont le plancher intermédiaire est en bois simple se trouvent dans la catégorie intermédiaire B. Les maisons en torchis et colombages se situent toutes dans la dernière catégorie [15].

En combinant et en croisant avec la réalité construite, les auteurs du projet ont constaté que les sous-catégories se recoupaient en certains points, plus qu'elles ne se démultipliaient. Par exemple, le type d'implantation détermine généralement la nature du mode constructif :

- Les îlots fermés de centre anciens comprennent des bâtiments à étages et en matériaux lourds ou à colombages.
- Les îlots haussmanniens comprennent des bâtiments exclusivement à étages et en matériaux lourds.
- Les maisons rurales isolées seront les seuls bâtiments sans étage et présenteront des inerties lourdes à très lourdes.
- Le mode constructif « inertie moyenne » comprendra exclusivement des bâtiments à colombages et torchis [15].

Cela donne, en synthétisant, la matrice suivante.

Dans ce projet, les auteurs ont trouvé que la mitoyenneté n'a pas été un critère qui rassemblait, ils l'ont donc retiré du projet et ne fera l'objet que de variantes. Par ailleurs, il n'a pas été possible de caractériser un indice d'ouverture chiffré. Ça restera donc une valeur qualitative (notamment concernant la perméabilité) [20].

Par ailleurs, le projet est toujours en cours.

regroupement des Logements collectifs : 6 groupes				
TABULA	01-MFH Immeuble collectif (<10log)	01-AB Immeuble collectif (>10log)	02-MFH Immeuble collectif (<10log)	02-AB Immeuble collectif (>10log)
Parc du parc existant (en logements)	<1915 13,70%	<1915 2,10%	1915 à 1948 2,10%	1915 à 1948 1,50%
Part du parc existant (en SDP)	2,5% 19,6%	1,4%	1,2%	0,9%
CLASSE NIVEAU ISOLATION UMURS	1,50<U<2,4	1,50<U<2,4	1,50<U<2,4	1,50<U<2,4
CLASSE NIVEAU ISOLATION UTOIT	1,30<U<2,4	1,30<U<2,4	≥2,4	≥2,4
Inertie (en Wh/m².K) d'après APUR	>200	>200	>200	>200
Type menuiserie (SV, DV, et alu/bois/PVC)	Menuiserie bois, SV	Menuiserie bois, SV	Menuiserie bois, SV	Menuiserie bois, SV
Umenuiseries (W/m².K) four		4,8	4,8	4,8
Système de ventilation	Ventilaton naturelle	Ventilaton naturelle	Ventilaton naturelle	Ventilaton naturelle
Echelle CREATIV (Q4PA)	0,95 à 3,5	0,95 à 3,5	0,95 à 3,5	0,95 à 3,5
Protections solaires	Volets extérieurs	Volets extérieurs	Volets extérieurs	Volets extérieurs
Différences dans groupe			Utoit	Utoit

Figure 9 : Regroupement des informations typologiques du projet CREATIV, extrait concernant le bâti ancien [20]

5. Impact des rénovations

a. Réglementation et aides pour la rénovation du bâti ancien : recherche d'un équilibre entre performance énergétique et préservation

D'un point de vue patrimonial, chaque rénovation énergétique d'un bâtiment historique est un risque pour la conservation historique et architecturale. Par ailleurs, les pistes d'amélioration du confort d'été ne sont pas toujours applicable sur ce type de bâtiment, également pour des raisons de conservation patrimoniale et architecturale [8], [10], [25].

Le bâti ancien originel, bien traité, bien conservé, présente généralement d'assez bonnes performances thermiques [11]. A l'inverse, le bâti dénaturé, c'est-à-dire des constructions anciennes modifiés par des apports modernes non réfléchis, présente de nombreuses pathologies [11].

Aujourd'hui, en France, la réglementation thermique pour la rénovation du bâti ancien (antérieur à 1948) est une approche « élément par élément » proposée par la RTex 2007. Elle fixe des seuils de performance pour chaque constituant du bâti soumis à un rénovation mais ne donne pas de contrainte sur les consommations énergétiques après rénovation [12]. De plus, elle met davantage l'accent sur le confort d'hiver par rapport à celui d'été.

Les dispositifs de conseil proposés par la ville de Lyon (via l’ALEC) ont évolué depuis 2020. A présent, trois aides sont possibles pour les particuliers :

- Mise en place d’une aide expérimentale adaptée au bâti ancien (dispositif Ecorenov) par la Métropole,
- Mise en place d’aides « Eco-patrimoine » par la Ville de Lyon portant sur l’amélioration du parc social ainsi que sur le parc privé et l’utilisation d’enduits correcteurs ou isolants thermiques,
- Dispositif « Maprimerenov » dépendant directement de l’Etat [27].

Par ailleurs, le contrôle de la préservation et de la mise en valeur est assuré par différents outils réglementaires, nationaux ou issus du travail des collectivités :

- Site Patrimonial Remarquable (SPR) régi par un Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur (PSMV) pour le Vieux Lyon,
- Protections au titre des Monuments historiques,
- SPR régi par une Aire de Valorisation de l’Architecture et du Patrimoine (AVAP) pour le quartier des pentes de la Croix-Rousse,
- Abords de Monuments Historiques,
- Sites classé et inscrits au titre du code de l’environnement,
- Plan Local de l’Urbanisme et de l’Habitat (PLU-H) [9], [27].

Les trois premiers permettent un contrôle cohérent des évolutions dont certaines sont internes à l’immeuble, les autres permettent le contrôle de l’aspect extérieur de l’immeuble [9].

b. Impact des rénovations sur l’humidité dans le bâti ancien : problèmes, pathologies et stratégies de préservation

En général, le bâti ancien sait bien gérer l’humidité avec des parois perspirantes. Toutefois, des rénovations mal conçues, en rendant étanche les parois, peuvent faire apparaître des pathologies liées à l’humidité. Ce bâti dénaturé a souvent été isolé avec des matériaux et selon des techniques qui ne lui conviennent pas : par exemple, des enduits ou joints en matériaux hydrofuges interdisant la perspiration normale des parois [11].

Le bâti ancien étant très sensible à l’humidité, les travaux de rénovation doivent prendre en compte le phénomène de perspiration des parois et prévoir un système de ventilation adapté en cas d’impact des rénovations sur le renouvellement d’air. L’humidité ayant pénétrée dans la paroi doit pouvoir ressortir vers l’extérieur, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse. Si elle s’accumule dans le mur, de nombreux problèmes, structurels, thermiques et sanitaires peuvent apparaître. D’un point de vue sanitaire, il s’agit notamment d’une dégradation de la qualité d’air intérieur (QAI). En effet, l’humidité favorise la pollution biologique, les moisissures, les acariens et les allergènes domestiques qui sont responsables des problèmes respiratoires et entraînent des allergies et parfois des infections pulmonaires chez les occupants prédisposés à ce type de réaction [20].

La mise en place d'enduit extérieur (ou intérieur) ou de re-jointement cimentaires, ou une isolation par l'intérieur, engendre une modification de l'équilibre hygrothermique du mur. L'isolation par l'intérieur, en particulier, peut être à l'origine de pathologies liées à l'humidité pour diverses raisons [20].

Dans un premier temps, l'ajout d'isolant diminue la température à l'interface entre l'isolant et la paroi, et ce d'autant plus que l'épaisseur d'isolant est élevée, et implique la présence de ponts thermiques aux angles notamment. Ces deux faits favorisent le risque de condensation dans le mur. L'isolation thermique par l'extérieur est plus favorable pour éliminer les ponts thermiques, points critiques pour l'humidité. Toutefois, il est nécessaire de prévoir un renouvellement d'air suffisant [20].

Par ailleurs, le choix d'un isolant fibreux (et non plastique) permet de mieux gérer l'humidité dans la paroi. En effet, les isolants plastiques alvéolaires (polystyrène expansé ou extrudé, polyuréthane) sont étanches à la vapeur d'eau ($30 < \mu < 500$). Les isolants fibreux qui peuvent être d'origine minérale (laine de verre, laine de roche), végétale (laine de bois, laine de chanvre, ouate de cellulose, paille) ou animale (laine de mouton, plume de canard, etc.) sont de leur côté perméables à la vapeur d'eau ($\mu < 10$) [20].

Dans le cas où le flux de vapeur d'eau se fait de l'extérieur vers l'intérieur, ce qui est possible en été, un isolant étanche bloque le flux de vapeur à l'interface entre la paroi et l'isolant et crée donc une accumulation d'humidité à cet endroit. Un isolant fibreux hygroscopique, n'étant pas étanche à la vapeur d'eau, joue le rôle de tampon hydrique. En absorbant l'excès d'humidité, il empêche ce point d'accumulation. Si on ajoute une membrane hygro variable, l'humidité s'évacue lentement, y compris vers l'intérieur [20].

Certaines catégories de bâtiments doivent faire l'objet d'une attention particulière : ceux construits avec des matériaux très sensibles à l'isolation utilisée (terre crue, pan de bois, torchis, pierre...), ceux classés ou inscrits au titre des Monuments historiques ainsi que ceux disposant du label Architecture contemporaine remarquables et enfin ceux localisés dans les périmètres de protection patrimoniale (abords des monuments historiques, SPR mais n'entrant pas dans les 2 catégories précédentes) [28].

Les bâtiments construits avec des matériaux nécessitant des précautions particulières pour l'isolation (terre crue, pan de bois, torchis, pierre...) représentent environ 11 millions de logements d'après les typologies du parc établie par le programme PROFEEL, soit un tiers du parc résidentiel [28].

L'enjeu principal de rénovation de cette typologie est de garantir la pérennité du bâti et d'éviter les sinistres. Pour cela, il est nécessaire de former de manière adéquate les concepteurs et les entreprises de travaux, ainsi que d'utiliser des matériaux adaptés. Ces investissements entraînent des coûts de rénovation plus élevés [28], [29].

Le plus souvent, l'isolation du bâti ancien se fait par intérieur mais il ne faut pas exclure celle par l'extérieur avec des matériaux capillaires et ouverts à la vapeur d'eau. En effet, l'isolation par l'extérieur permet de coupler préservation du bâti et amélioration du confort thermique. Un certain nombre de ces bâtiments ont été recouverts d'un enduit non ou peu capillaire (enduits ciments) auparavant [28], [29], empêchant la perspiration naturelle du mur.

c. Les défis de la rénovation énergétique du bâti ancien : conséquences des rénovations pour le confort d'hiver sur le confort d'été

La loi Climat et Résilience de 2021 prévoit la mise en place d'un DPE opposable qui impacte fortement les stratégies des propriétaires et des habitants [9]. Ainsi, afin de pouvoir encore louer leur logement, beaucoup de propriétaires cherchent à rénover énergétiquement leur logement. Actuellement, le DPE prend en compte uniquement le confort d'hiver et désavantage donc fortement le bâti ancien, qui pourtant, comme vu précédemment, apporte beaucoup de confort en été³.

Sous certaines conditions de vents, notamment en hiver, le renouvellement de l'air dans un bâtiment ancien non modifié peut s'élever à 2 volumes/heure, soit 4 fois plus que dans la réglementation sanitaire. C'est ce qui amène généralement les propriétaires à vouloir rendre étanche leur logement, afin de limiter l'influence des conditions extérieures sur le renouvellement d'air [11].

De plus en plus de bâtiments anciens sont réhabilités pour consommer moins de chauffage et offrir un meilleur confort hivernal aux occupants. Toutefois, l'impact de ces rénovations sur le confort d'été n'est que très rarement pris en considération. Il est important de connaître l'impact de ces rénovations sur le confort et les besoins en 2050. Il est en effet fort probable qu'après ces rénovations les besoins de chauffage et le confort d'hiver s'améliorent considérablement mais aussi que le nombre d'heures inconfortables l'été et les besoins en rafraîchissement augmentent [19].

Les modélisations menées par Arthur Jan [19] montrent que les rénovations faites afin de privilégier le confort d'hiver avec une forte isolation impactait grandement le confort d'été du bâti ancien. Cet impact n'est toutefois pas identique selon les régions climatiques. A Carpentras, certains bâtiments anciens rénovés peuvent présenter, en 2050, un inconfort estival supérieur à 2500 heures par an, soit l'équivalent de 3 mois.

Les rénovations actuelles améliorent en effet l'enveloppe, ce qui a un effet néfaste sur le confort d'été et peuvent entraîner l'usage d'un climatiseur. Or, en cœur urbain, l'ajout de milliers de climatiseurs empireraient l'effet d'îlot de chaleur urbain, en plus d'avoir des conséquences écologiques dévastatrices [19].

Les rénovations complètes des bâtiments anciens simulées par Arthur Jan [19] conduisent à réduire, comme souhaité, les besoins de chauffage. Néanmoins, les besoins de froid ne diminuent pas car l'ajout d'isolant sur les parois conduit à augmenter les températures à l'intérieur en été et donc l'usage de climatisation.

Dans le Nord de la France, l'inconfort double pour quasiment tous les bâtiments mais reste plutôt acceptable (la majorité demeure sous les 200 heures d'inconfort par an). La baisse globale des consommations va dans le sens de la lutte contre le réchauffement climatique. Il est donc utile de réaliser les rénovations [19].

Dans le sud de la France, le constat est moins marqué. L'inconfort peut être amené à tripler et rendre les bâtiments très inconfortables durant la saison chaude. Malgré la baisse des besoins de chaud, l'utilisation

³ Discussion avec Laurence Billionnet de la Direction de l'Aménagement Urbain de la Ville de Lyon

d'une climatisation pourrait devenir obligatoire là où aujourd'hui elle ne l'est pas forcément, ce qui est contraire à l'effet recherché. La réalisation des rénovations est dans ce cas plus discutable [19].

L'isolation d'un bâtiment ancien doit se faire dans les règles de l'art afin de ne pas dégrader les propriétés thermiques et hydriques intrinsèques aux murs anciens [24]. Ces dégradations thermiques et hydriques peuvent conduire à une dégradation du confort thermique ainsi qu'à des problèmes structurels.

Le système de double-fenêtres existant sur plusieurs bâtiments anciens a de relativement bonnes propriétés isolantes acoustiquement et thermiquement et peuvent donc répondre aux exigences actuelles sans nécessairement être changées [11].

Aujourd'hui, le confort d'été est un angle mort de l'étude des immeubles collectifs anciens en ville. Tous les logements ne sont pas concernés, selon leur position, leur orientation, leur environnement proche et le nombre de façades avec des fenêtres. Toutefois, il s'agit d'une question grandissante. La plupart des recherches sur ce type de bâti se concentre sur l'hiver, négligeant les problématiques d'adaptation de ces bâtiments n'ayant pas été construit pour supporter les vagues de chaleur actuelles et à venir. Le confort d'été est de plus en plus exprimé par les habitants lors des réunions sur le patrimoine urbain ou lors de ravalement de façades. Les problématiques techniques soulevées et les adaptations proposées pas toujours adéquates. La demande en équipement de climatisation ne cesse d'ailleurs d'augmenter [9].

6. Patrimoine lyonnais : matériaux, intérêt, histoire + typo lyonnaise historique

a. Lyon : une richesse patrimoniale face aux enjeux d'adaptation au changement climatique

Le site historique de Lyon est inscrit sur la liste du Patrimoine Mondial de l'Humanité depuis le 8 décembre 1998 et comporte environ 4000 immeubles urbains, de grande qualité Architecturale. Le site est inscrit sous les critères (II) et (IV) [9], [27] :

« La valeur originale du site urbain historique de Lyon réside dans son tissu très dense dont la cohérence a été respectée même lors des opérations d'urbanisme du XIXème siècle. »

« De par la manière particulière dont elle s'est développée dans l'espace, Lyon illustre de manière exceptionnelle les progrès et l'évolution de la conception architecturale et de l'urbanisme au fil des siècles. »

La particularité de Lyon réside dans son extension continue vers l'Est au fur et à mesure des époques, préservant à chaque étape le patrimoine passé, contrairement à la majorité des villes où le centre-ville a été plusieurs fois détruits et reconstruits pour correspondre à une esthétique plus récente [8].

Le périmètre Unesco s'étend sur 427 hectares et reprend les limites des anciens remparts du XIXème. La zone tampon s'étend sur 323 hectares supplémentaires tout autour. Les limites de la zone tampon ne correspondent pas à un tracé historique, ce qui fait qu'une certaine entité urbaine homogène peut se retrouver que partiellement dans la zone tampon [27].

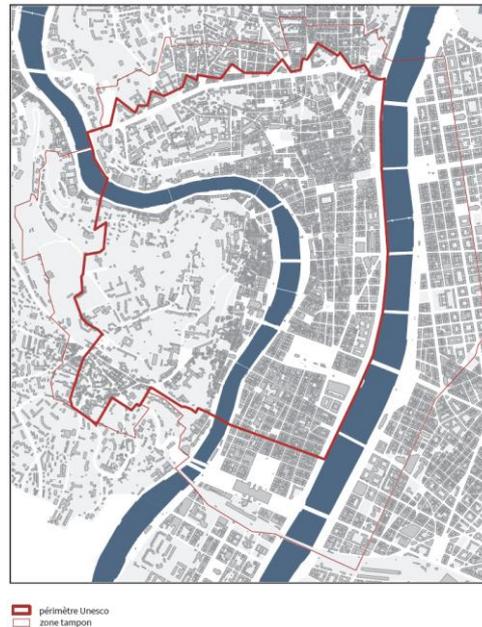


Figure 10 : Secteur Unesco et zone tampon [27]

L'adaptation thermique du bâti lyonnais doit se faire en cohérence avec sa qualité patrimoniale, d'autant que les immeubles d'habitation anciens forment une part importante et centrale de la ville, et constitue ainsi un enjeu majeur pour les années à venir [9].

Deux matériaux locaux ont été utilisés de manière prépondérante à Lyon : la terre crue par la technique du pisé et la pierre, essentiellement en moellon. Le pisé fut interdit au XIX^{ème} siècle car réputé trop fragile, notamment vis-à-vis des crues [30].

Quatre roches furent principalement utilisées dans la construction lyonnaise : [31]

- Le calcaire oolithique du Bathonien, appelé pierre du Lucenay est une pierre semi-dure silico calcaire utilisée dès le Moyen-Âge, notamment pour la cathédrale Saint-Jean ;
- Le calcaire de Couzon, surnommée la pierre dorée du Mont d'or est constitué de bancs de faible épaisseur. Elle a une mauvaise résistance à l'usure, son usage s'est trouvé très vite limité. L'exploitation de cette pierre remonte au XV^{ème} siècle. On la retrouve essentiellement en moellonnage, recouverte d'un enduit à la chaux à cause de sa mauvaise résistance à l'usure ;
- Le calcaire à gryphées, d'âge Sinémurien, venant de Saint Fortunat et Saint Cyr est un calcaire à la résistance remarquable. Il a surtout été utilisé comme pierres d'angle, montants et linteaux de portes et de fenêtres, et pour faire les dallages intérieurs et les marches d'escalier mais elle a aussi parfois été employée en moellon. C'est la pierre la plus courante dans les bâtiments construits avant le XIX^{ème} siècle ;
- Le Choin, appelé Pierre de Villebois, provient du massif du Jura. Il s'agit d'un calcaire à grain fin, semi-cristallin, gris ou blanc grisâtre. Cette pierre est à la fois dure et résistante et se prête très bien à la taille et au polissage). Cette pierre a frottement été utilisée par les Romains puis massivement importée au XVII^{ème} et XIX^{ème} siècles. Elle est dure et résistante. Elle compose notamment les berges de la Saône [8] [31].

Les pierres de Couzon et de Lucenay sont issues de milieux poreux tandis que celles de St Fortunat et St Cyr proviennent de milieux fissurés. Celle de Villebois vient d'un milieu karstique. Toutes ces pierres sont sur des aquifères. Leur hygrométrie a donc une forte influence sur leurs caractéristiques thermiques⁴.

b. Évaluation des caractéristiques climatiques et architecturales des quartiers historiques de Lyon

La ville de Lyon se répartit en neuf entités urbaines cohérentes, dont la majorité se trouve dans le périmètre Unesco.

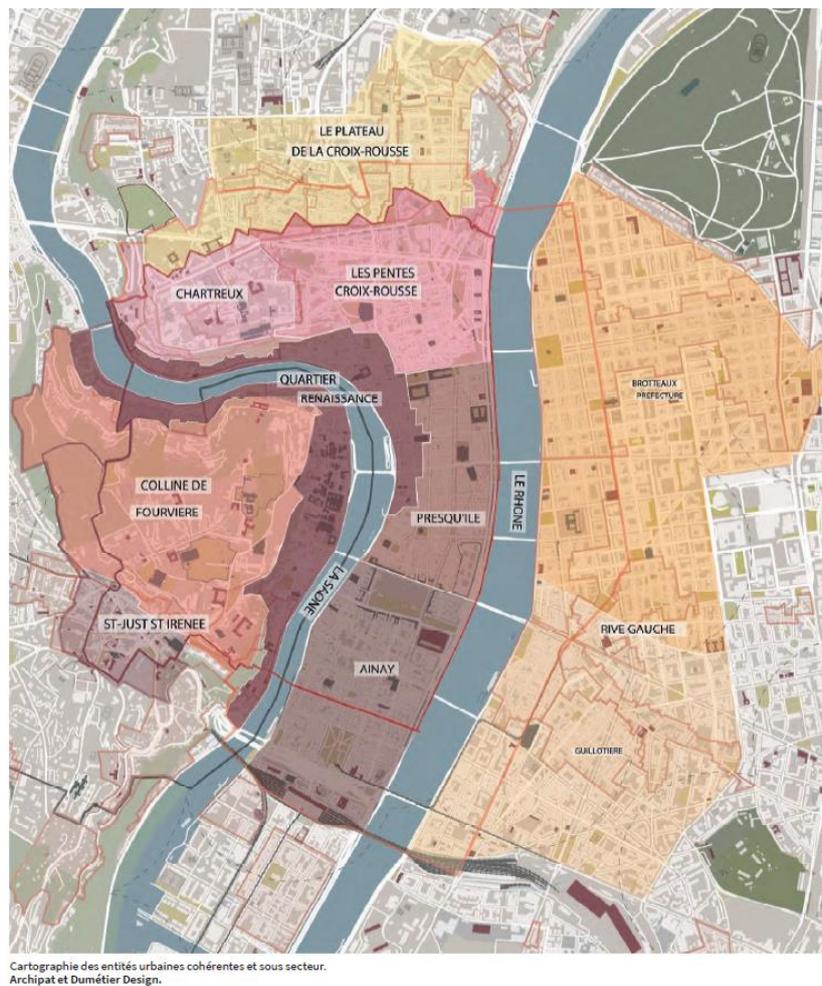


Figure 11 : Carte des entités urbaines cohérentes et sous-secteurs [27]

i. La colline de Fourvière

Il s'agit d'un tissu semi-ouvert permettant un bon ensoleillement mais aussi une bonne ventilation nocturne. La végétation est fortement présente, notamment par les balcons et les jardins, limitant la surchauffe du quartier en été [27].

⁴ Annexe 1 : Fiche BDLisa sur la pierre de Couzon



Figure 12 : Croquis représentatifs du secteur de la colline de Fourvière [27]

ii. Saint-Just et Saint-Irénée

Ce quartier est plus dense que le précédent. Cette compacité urbaine limite les déperditions thermiques pendant la saison de chauffe mais également durant l'été, ce qui devient un désavantage. Le tissu reste tout de même de densité moyenne et les rues étroites favorisent un bon ombrage durant l'été. La végétation est présente par l'intermédiaire de nombreux jardins et la proximité avec les balmes [27].



Figure 13 : Croquis représentatifs du secteur de Saint-Just et Saint-Irénée [27]

iii. Le Vieux Lyon, quartier Renaissance

Le quartier Renaissance est très dense, avec de hauts immeubles très serrés. De même que pour le quartier de Saint-Just et Saint-Irénée, cette configuration limite les déperditions thermiques et les rues étroites favorisent l'ombrage. Toutefois, les rues tortueuses du Vieux-Lyon ne sont pas propices au rafraîchissement nocturne, d'autant plus que le quartier est très minéral. La seule source de fraîcheur est la Saône située en son centre [27].



Figure 14 : Croquis représentatifs du secteur Renaissance Vieux-Lyon [27]

Le Vieux Lyon est un quartier touristique majeur de la ville. Il s'agit du deuxième plus grand site préservé de la Renaissance en Europe, juste après Venise [8]. Depuis la Renaissance, le site a subi assez peu de modification. Il faut néanmoins attendre 1891 pour qu'un ingénieur-voyer du secteur du Vieux-Lyon signale officiellement la présence d'immeubles « remarquables » et « à préserver ». Ce signalement conduira à l'abandon du plan d'alignement de Lyon (ordonnance du 2 octobre 1844) dans ce secteur [8].

iv. La Presqu'île Nord

La compacité urbaine est importante sans être équivalente à celle du quartier Renaissance. Les immeubles restent hauts mais s'organisent à présent en îlots repliés sur des cours intérieures [27].

Les îlots d'immeubles du quartier s'organisent autour de rues étroites généralement orientées Est-Ouest. Cette orientation favorise la fraîcheur en journée dans les logements et limite l'ensoleillement (avantage estival mais inconvénient hivernal). Toutefois, le rafraîchissement nocturne est médiocre, d'autant plus que les seules sources de fraîcheur sont le Rhône et la Saône [27].

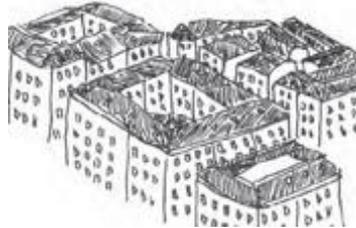


Figure 15 : Croquis représentatifs du secteur Presqu'île Nord [27]

v. Ainay

La configuration du quartier est assez similaire à celle de la Presqu'île Nord avec une compacité urbaine plutôt importante, une configuration en îlot et une proximité avec le fleuve et la rivière [27].



Figure 16 : Croquis représentatifs du secteur Ainay [27]

vi. Les Pentes de la Croix-Rousse

Les habitations des Pentes sont très compactes, limitant les déperditions thermiques. Les rues y sont étroites, favorisant la fraîcheur et l'ombrage en été mais limitant l'ensoleillement l'hiver. Le quartier est proche du Rhône et des balmes Est en partie boisée, ce qui est atout fraîcheur en été [27]. Les bâtiments en haut des Pentes ont une typologie plus proche des habitations du Plateau avec une forte exposition tant au vent qu'au soleil.



Figure 17 : Croquis représentatifs du secteur des Pentes [27]

vii. Les Chartreux

Le quartier des Chartreux est très ouvert. Son exposition au vent est favorable à la ventilation nocturne et à un bon ensoleillement. L'emprise végétale est généreuse, limitant la surchauffe urbaine en été [27].



Figure 18 : Croquis représentatifs du secteur des Chartreux [27]

viii. Le Plateaux de la Croix-Rousse

Comme dans les Pentes, les habitations sont très compactes avec des rues étroites, diminuant les déperditions thermiques et favorisant de la fraîcheur en été. Les immeubles sont hauts et souvent avec une vue dégagée, permettant un bon ensoleillement mais créant également un risque de surchauffe en été. Cette vue dégagée permet également une bonne exposition au vent. La végétation est un peu présente, seulement par petite touche⁵.

ix. La Rive Gauche

Ce quartier, couvrant une grande surface, a été urbanisé plus tardivement. On y retrouve des immeubles haussmanniens, post-haussmanniens, art nouveau. Les Brotteaux présente un découpage très régulier, avec des avenues assez larges, typique de la fin du XIX^{ème} – début XX^{ème} et du renouveau Haussmann. La végétation n'est présente que par les arbres plantés le long des avenues et quelques places comme la place Foch. Les immeubles sont percés de nombreuses ouvertures. La compacité est également importante, limitant les déperditions thermiques. La Guillotière présente une typologie similaire mais avec des façades plus modestes et quelques bâtiments plus anciens. Des rues moins rectilignes que dans la partie Brotteaux relie les axes principaux⁶.

⁵ Observations personnelles

⁶ Observations personnelles

c. Présentation d'un quartier emblématique : la Croix-Rousse, histoire de son urbanisation

La colline de la Croix-Rousse se sépare en deux : un côté méridional, les Pentes, et une vaste surface plane, le « Plateau ». Cette colline a été urbanisée très tardivement. Jusqu'à la révolution, seules quelques auberges et hostelleries constituent le bâti du plateau, qui est une commune à part entière jusqu'en 1852. Les Pentes contiennent quelques rares clos religieux [22], [32].

L'urbanisation du plateau débute au début du XIXème, de manière spontanée, et est notamment dû au passage d'une économie essentiellement agricole à une économie plus industrielle, plus particulièrement dans le domaine de la soie. La Croix-Rousse constitue à ce moment-là une réserve foncière à proximité du centre économique et immédiatement utilisable [22]. Les terrains les plus à l'Est sont les premiers à être lotis puis bâtis, tandis que le secteur occidental et le centre du plateau demeure rural jusqu'au deuxième quart du XIXème siècle [32].

Les parcelles début XIXème sont juxtaposées les unes aux autres, perpendiculaires à la rue et généralement plus longue que large. Elles sont différentes des parcelles en lanière que l'on peut rencontrer sur la Grande-Rue de la Croix-Rousse [32].

Durant cette même première moitié XIXème, les Pentes, appartenant à la ville de Lyon, s'urbanisent également et accueillent des immeubles destinés au travail. Cette urbanisation découle de la volonté de la ville de sortir du centre historique de l'époque qui « étouffe » [32]. Les clos religieux et les grosses propriétés bourgeoises sont rapidement lotis. En quelques décennies, de nouvelles rues apparaissent et près de 270 immeubles de trois étages et plus, avec de hauts plafonds à la française, aux fenêtres hautes et nombreuses, emblématiques du quartier, sont édifiés [22].

Les Terreaux accueillent à cette époque les marchands fabricants puis la Condition des Soies. C'est pour rester à proximité de l'activité économique en question que les industriels de la soie vont s'installer progressivement sur les Pentes [32].

Seuls quelques propriétaires privés se partagent les anciens clos et vont ainsi créer des rues et vendre leur terrain afin qu'ils soient bâtis. Ils donnent au quartier la physionomie qu'il a encore aujourd'hui [32].

Trois zones se dessinent. Est d'abord urbanisée la première zone, proche du centre-ville, puis la troisième, essentiellement sur le plateau et enfin la deuxième, qui effectue la jonction entre les deux précédentes [22].

La zone située au bas des Pentes, autour de l'ancien clos des Capucins et de la place Sathonay, accueille les activités nobles du commerce de la soie : la coordination de la fabrication et de la vente. Ses constructions illustrent le renom des maisons de soieries et conviennent également à des rentiers aisés autour de certains secteurs comme le Jardins des Plantes. Elles hébergent également sous les toits quelques actifs opérant en amont du tissage (activités silencieuses) [22].

La deuxième zone, attenante à la précédente, s'achève mi-Pentes et regroupe les activités de création de soieries, de préparation des fils ou de finition. Ces travailleurs de spécialités peu bruyantes cohabitent sans

problèmes avec d'autres catégories socio-professionnelles tels que les rentiers, dans des immeubles où l'agencement intérieur concilie les exigences des différents occupants [22].

La troisième zone, plus étendue, démarre mi-Pentes, en direction du Plateau, qu'elle englobe. Elle contraste avec les deux précédentes avec ses immeubles-ateliers uniformes sans recherche architecturale, dits immeubles canuts. Elle héberge les tisseurs et leurs métiers, auxquels l'architecture s'est adaptée, ainsi que les préparatrices des fils de soie [22].

d. Typologie des bâtiments de la Croix-Rousse par sous-secteurs

Sur la page suivante, se trouve un tableau récapitulatif des typologies de bâtiments rencontrés dans le quartier de la Croix-Rousse. Une explication plus détaillée est disponible en annexe (Annexe 4 : Typologie des bâtiments de la Croix-Rousse par sous-secteur, explications détaillées)

Caractéristiques	Immeubles commerciaux des Capucins	Immeubles de grand négoce de Sathonay	Immeubles-ateliers (immeubles canuts)	Immeubles mixtes
<i>Emplacement</i>	Partie inférieure des Pentes, côté Est	Partie inférieure des Pentes, côté Ouest	Partie médiane et supérieure des Pentes + le Plateau	Mi-Pentes
<i>Nombre d'étages</i>	4	4	5 à 6	3 à 5
<i>Nombre de pièces niveaux "nobles"</i>	3 à 4	4 à 5	/	3
<i>Nombre de pièces autres niveaux</i>	1	1	1 à 2	1 à 2
<i>Entresol</i>	Oui	Oui	Non	
<i>Façade</i>	Ornée (balcon en fer forgé, pierre de taille en rez-de-chaussée..)	Très ornée (balustrades en fer forgé, les portes cochères surmontées d'imposte, les pierres de taille, pilastres...)	Peu ornée, simplement le rez-de-chaussée en pierre de taille, de grandes fenêtres très nombreuses	Légèrement ornée (balcons, quelques frontons...)
<i>Commerces au rez-de-chaussée</i>	Oui (1 à 2)	Oui mais réduits	Oui	?
<i>Population d'origine</i>	Vendeurs de soieries (+ ouvriers textiles hors tisseurs)	Commissionnaires en soie (+ très peu d'ouvriers)	Ouvriers-tisseurs	Professions libérales + Ouvriers

Figure 19 : Tableau récapitulatif des typologies de bâtiments du quartier de la Croix-Rousse

7. Conclusion de l'état de l'art

Le bâti ancien, constitué des constructions antérieures à 1948, représente une part significative du parc résidentiel français. C'est un acteur important dans l'adaptation au changement climatique, pour le confort thermique et la qualité de l'air en milieu urbain. Les ICU, exacerbés par la densité bâtie, les matériaux à faible albédo et l'absence de végétation viennent accentuer les problématiques liées au confort thermique des immeubles collectifs anciens, souvent contraints par des architectures et des réglementations qui limitent les solutions de rafraîchissement.

Cependant, l'architecture vernaculaire, avec ses matériaux traditionnels locaux tels que la pierre et la brique, offre une bonne inertie thermique et une régulation naturelle de l'humidité, malgré des déperditions thermiques en hiver. D'ailleurs, les typologies du bâti ancien montrent une attention particulière à la performance énergétique hivernale. Beaucoup de rénovations des immeubles anciens sont faites pour garantir le confort hivernal. Celles-ci, pourtant dans une optique d'efficacité énergétique, peuvent parfois compromettre le confort d'été et créer des problèmes d'humidité.

Les centres-villes comme celui de Lyon, où le patrimoine bâti est riche, illustrent la complexité des enjeux, alliant préservation du patrimoine et défis d'adaptation au changement climatique. Les échanges avec les services de la ville de Lyon ont pointé l'absence de connaissance sur les caractéristiques thermiques du bâti ancien lyonnais, pourtant nécessaire à l'étude de son comportement et de sa vulnérabilité aux vagues de chaleur. Ainsi, comment modéliser de manière efficace les performances thermiques et aérauliques, ainsi que leurs influences réciproques, du bâti résidentiel ancien lyonnais dans un contexte de changement climatique ?

La ville de Lyon m'a communiqué plusieurs études, dont une relativement complète d'un ancien immeuble-atelier canut de la Croix-Rousse. La Croix Rousse est un quartier protégé, ancien et emblématique de la ville qui est soumis au changement climatique, notamment en été. Cette étude me permet de déterminer les caractéristiques architecturales et thermiques d'un immeuble collectif du haut des Pentès de la Croix-Rousse. Ce bâtiment servira pour mon étude de cas.

III. Etude de cas

1. Présentation de l'étude de cas

a. Présentation générale

L'immeuble étudié se trouve à Lyon, dans le haut des Pentes de la Croix-Rousse. Il s'agit d'un immeuble canut situé au 8 rue du Général de Sève. Cet immeuble a été choisi pour la modélisation parmi ceux étudiés ces dernières années par la Ville de Lyon.

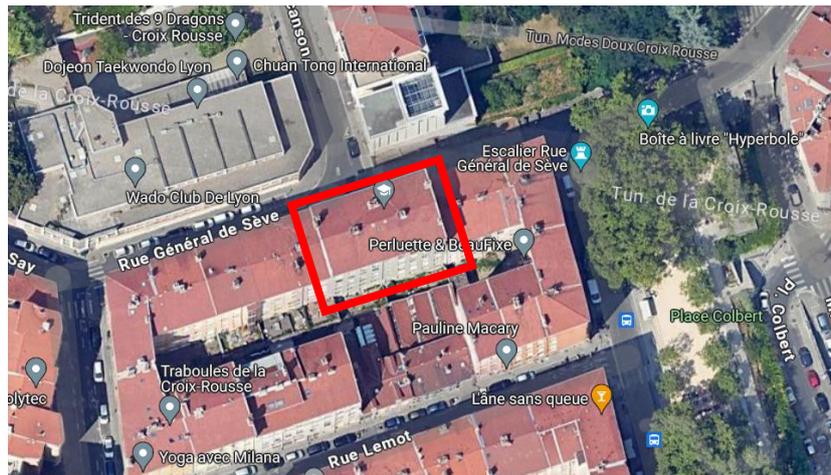


Figure 20 : Image satellite du 8 rue Général de Sève (Google Map)

L'immeuble est orienté Nord-Ouest à Sud-Est. Il s'étend sur 9 niveaux : des caves, un étage semi-enterré, un rez-de-chaussée, cinq étages et un grenier sous les combles. Il est composé de 27 logements répartis par palier de quatre, excepté pour l'étage semi-enterré composé uniquement de trois logements [27], [33].



Figure 21 : Orientation du bâtiment par rapport aux axes cardinaux [27]

Le coefficient d'emprise au sol de l'immeuble est de 0,77 d'après le bureau d'étude TRIBU. Toujours d'après TRIBU, l'immeuble a une plutôt bonne compacité (1,09) mais un indice d'ouverture assez élevé (0,29) [27]. Cet indice d'ouverture élevé est dû aux grandes fenêtres emblématiques des immeubles canuts, construites à l'origine pour éclairer les métiers à tisser.

La largeur entre les façades est de 14,45 m. L'immeuble donne sur une cour intérieure de 4 m de large. Il a un vis-à-vis assez limité. Son inertie est lourde par ses murs extérieurs et séparateurs des logements en pierres mais faible par ses planchers de bois, ce qui en fait un bâtiment intermédiaire. De plus, son isolation thermique est assez faible et hétérogène selon les logements [27].

Les murs porteurs sont en pierre à bâtir, plus spécifiquement en pierre de Couzon. Les planchers intermédiaires sont constitués d'un « marin » entre deux platelages de bois. Un marin est constitué de mortiers, briques et sable compactés. Des tommettes recouvrent la face supérieure du plancher. La toiture est composée d'une charpente bois avec une couverture en tuiles. Les combles ne sont pas aménagés et servent de grenier [27], [33].

Les appartements sont mono-orientés Nord / Nord-Ouest ou Sud / Sud-Est, avec assez peu de masque solaire côté cour, au Sud [27], [33]. Pour la modélisation, seuls seront représentés les deux derniers appartements de la partie Ouest de la façade Nord / Nord-Ouest. En effet, il s'agissait des logements avec le plus d'information sur les pièces.

Plan type

-  Ventilation naturelle mono-orientée
-  Bon ensoleillement : peu de masques solaires côté cour
-  Bon éclairage naturel : grandes baies et masques limités
-  Murs en pierre, voûtes en RDC, marin du plancher > inertie lourde favorable au confort d'été
-  Ouvrages bois : charpentes, planchers intermédiaires, et certaines menuiseries
-  Isolation : seulement dans certains logements > améliore le confort d'hiver des logements concernés

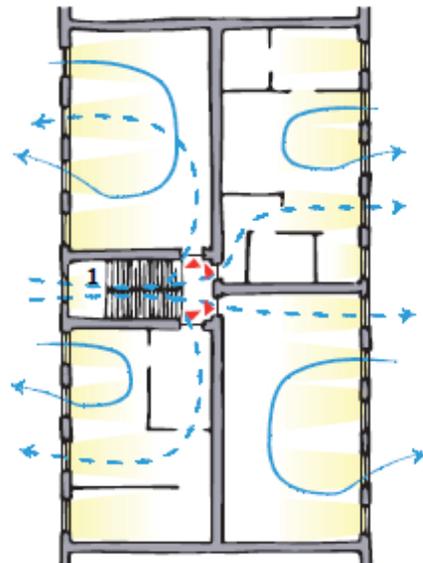


Figure 22 : Plan type d'un étage [27]

L'immeuble regroupe plusieurs caractéristiques des immeubles-ateliers canuts : plafonds à la française, fenêtres de grandes dimensions occupant une large partie des façades, répartitions des logements par groupe de 4 par palier autour d'un escalier central [27].

Toutefois, tous les logements ne présentent pas les mêmes performances thermiques : les menuiseries sont très diverses et les murs ne sont pas toujours isolés. Les protections solaires varient également et ne sont pas toujours présentes [33].

Coupe schématique bioclimatique

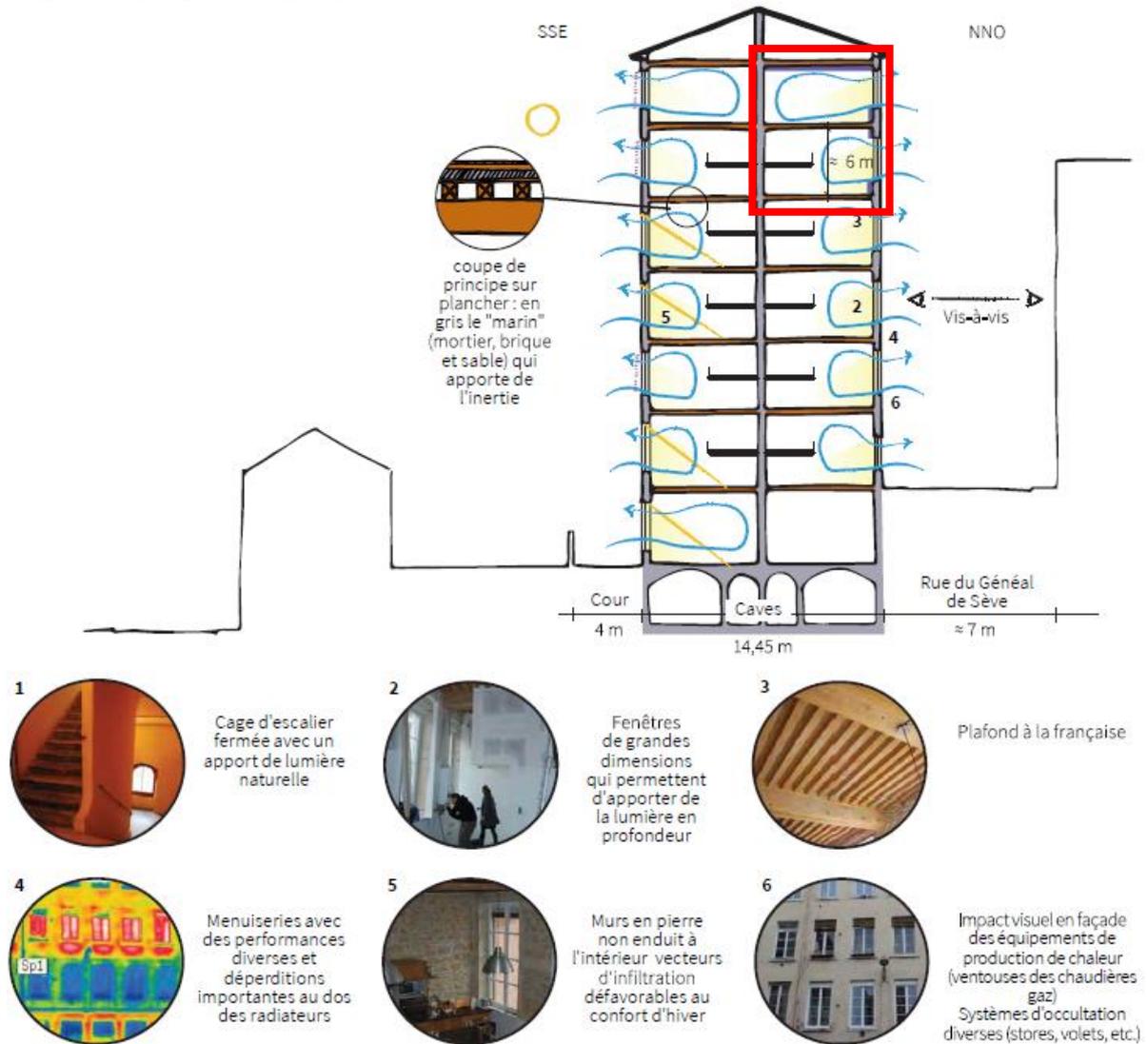


Figure 23 : Schéma en coupe du 8 rue Général de Sève mettant en avant ses caractéristiques [27], les 2 logements modélisés cerclés de rouge

Les systèmes de ventilation sont aussi très variables. Dans les pièces de vie, la ventilation se fait essentiellement par l'ouverture des fenêtres. Néanmoins, il y a parfois des grilles donnant sur la façade et des entrées d'air sur certaines fenêtres [27], [33].

Dans les salles de bain et les toilettes, la plupart du temps la ventilation s'effectue par des conduits débouchant en toiture ou des grilles de transfert situées en partie haute ou basse des pièces. Quelques fois, elle se fait uniquement par passage de l'air sous les portes ou à l'inverse par bouche d'extraction. Celles-ci ne sont pas toujours fonctionnelles [27], [33]. Pour la modélisation, nous retiendrons les grilles de transfert entre deux pièces.

Dans la cuisine, dans quasiment dans tous les logements, la ventilation se fait par une grille sur le mur. Cette grille se situe en partie haute ou basse des fenêtres ou en partie basse de la pièce [27], [33]. Nous retenons cette dernière solution pour la modélisation.

b. Parois et planchers

Les murs sont globalement non isolés. Certains copropriétaires ont engagé quelques travaux d'isolation par l'intérieur. On peut tout de même établir un mur type, composé principalement de pierre de Couzon, recouverte d'un enduit de mortier en extérieur et d'une plaque de placo BA13 en intérieur [33].

Caractéristique	Libellé	Unité
Epaisseur	Ep	cm
Conductivité	λ	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Masse volumique	MV	kg.m ⁻³
Chaleur spécifique	CS	Wh.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Coefficient de transmission surfacique	U	W.m ⁻² .K ⁻¹
Résistance thermique	R	m ² .K.W ⁻¹

Figure 24 : Caractéristiques étudiées des parois et leur unité [33]

Composition Simple	Murs Extérieurs					
Composante	Ep	λ	MV	CS	U	R
Enduit en mortier	1	1.15	1700	0.278	5.55	0.01
Pierre	50	2.05	2340	0.222	2.22	0.24
Placo BA13	1.3	0.25	1200	0.222	4.54	0.05
Résistances superficielles						0.17
Total					2.13	0.47

Figure 25 : Composition des murs extérieurs [33]

Les murs intérieurs de la cage d'escaliers et les murs des logements donnant sur les caves sont composés uniquement de pierre de Couzon et mesure 40 cm d'épaisseur [33].



Figure 26 : Mur de façade avec pierre de Couzon apparente à l'intérieur d'un logement [33]

Le plancher bas sur caves n'est pas isolé thermiquement au niveau des caves. Il est identique au plancher intermédiaire pour les quatre premières couches : tomettes, platelage bois, marin et à nouveau platelage bois. Cet ensemble repose ensuite sur une voûte en tomettes [33].

Composition Simple	Plancher bas sur caves					
Composante	Ep	λ	MV	CS	U	R
Voute en tomettes	10	1.15	1900	0.250	2.33	0.09
Platelage bois	2	0.18	650	0.667	2.22	0.11
« marin »	30	2	1950	0.253	2.04	0.15
Platelage bois	2	0.18	650	0.667	2.22	0.11
tomettes	3	1.15	1900	0.250	2.70	0.03
Résistances superficielles						0.34
Total					1.20	0.83

Figure 27 : Composition du plancher bois [33]

Composition Simple	Plancher haut sous combles					
Composante	Ep	λ	MV	CS	U	R
Platelage bois	2	0.18	650	0.667	2.22	0.11
« marin »	30	2	1950	0.253	2.04	0.15
Platelage bois	2	0.18	650	0.667	2.22	0.11
tomettes	3	1.15	1900	0.250	2.70	0.03
Résistances superficielles						0.14
Total					1.85	0.54

Figure 28 : Composition des planchers intermédiaires [33]

Aucune isolation n'est présente au niveau des combles, occupés par les greniers. Néanmoins, certains copropriétaires du dernier étage ont isolé en sous-face du plancher, dans leur faux plafond [33]. Nous n'en tiendrons pas compte dans la modélisation.

Il n'y a pas de pare pluie entre la charpente et les tuiles [33].

c. Menuiseries et protections solaires

Les menuiseries ont été rénovées en double vitrage dans quasiment tous les logements, seuls quelques copropriétaires ont encore les simples vitrages d'une précédente rénovation. Ce simple vitrage est une grande source de déperdition thermique [33]. Pour la modélisation, nous retiendrons le plus fort pourcentage de présence, soit les fenêtres double-vitrage 4/12/4 avec battants en bois.

Nom	Pourcentage du nombre de menuiseries	Coefficient U_w moyen $W.m^{-2}.K^{-1}$
Fenêtre battants Bois Simple Vitrage	15%	4,95
Fenêtre battants Aluminium Double Vitrage 4/6/4	15%	3,8
Fenêtre battants PVC ou Bois Double Vitrage 4/12/4	38%	2,2
Fenêtre battants PVC ou Bois Double Vitrage 4/16/4	31%	1,7

Figure 29 : Répartition des menuiseries et vitrage, production personnelle à partir des données du rapport d'audit énergétique [33]

Les protections solaires présentent aussi de grandes disparités. Les jalousies lyonnaises prévues à l'origine (store en bois extérieur) ont presque toutes disparues. La majorité des ouvertures restent sans occultation, une grande part de celles restantes sont protégées par des volets roulants extérieurs [33]. Nous retenons néanmoins la solution originale pour notre modélisation : les jalousies.

sans occultation	volets roulants extérieurs	persiennes	stores en aluminium extérieurs	store en bois extérieurs	volets roulants intérieurs
44%	33%	7%	4%	4%	7%

Figure 30 : Répartition chiffrée des différents systèmes de protection solaire [33]

Les différences sont aussi visibles entre les façades. Fort logiquement, la façade Sud possède plus de protections solaires que la façade Nord et elles sont toutes externes. La façade Sud est en effet plus exposée au rayonnement solaire que la façade Nord.

type d'occultation par logement	façade nord	
	est	ouest
5 ^{ème} étage	Volets roulant intérieurs	Volets roulant extérieurs
4 ^{ème} étage		
3 ^{ème} étage		Volets roulant extérieurs
2 ^{ème} étage		Store en bois extérieurs
1 ^{er} étage		Volets roulant intérieurs
Rez-de-chaussée	persiennes	persiennes
Sous-sol-1		

type d'occultation par logement	façade sud	
	ouest	est
5 ^{ème} étage	Volets roulant extérieurs	Volets roulant extérieurs
4 ^{ème} étage	Volets roulant extérieurs	
3 ^{ème} étage	Store en aluminium extérieurs	Volets roulant extérieurs
2 ^{ème} étage	Volets roulant extérieurs	
1 ^{er} étage		Volets roulant extérieurs
Rez-de-chaussée		
Sous-sol-1	Volets roulant extérieurs	

	sans occultation
	protection extérieure
	protection intérieure

Figure 31 : Répartition sur la façade des différentes protections solaires [33]

d. Classement de l'immeuble selon les typologies BATAN, TABULA et celle de J. Barre [22] de la Croix-Rousse

En reprenant la classification BATAN vue lors de l'Etat de l'Art, cet immeuble correspond à un immeuble d'îlot de centre ancien (I), de classe d'inertie B (lourde) et de matériaux 2 (calcaire tendre).

La classification TABULA est moins précise. Il s'agit d'un AB (Apartment Block) de la période antérieure à 1850.

La classification de J. Barre nous permet de dire qu'il s'agit d'un immeuble-atelier canut.

2. Choix des outils et hypothèses sélectionnées

a. Choix des logiciels

La modélisation du cas d'étude se centre sur deux axes : la performance thermique et celle aéralique.

Concernant la modélisation aéralique, le choix s'est immédiatement porté sur le logiciel CONTAM. Ce logiciel permet de calculer le transport et la concentration des polluants, ainsi que de caractériser leur impact sur la qualité de l'air intérieur (QAI). Il permet également de calculer des débits et des taux de renouvellement d'air, et de caractériser leur impact sur le comportement thermique du bâtiment. Cette dernière action est possible grâce au couplage avec un logiciel de simulation thermique dynamique comme Trnsys ou EnergyPlus. A savoir qu'Energy+ intègre un code aéralique mais qui ne permet pas de calculer le transport des polluants.

Le choix pour la modélisation thermique fut moins évident. En effet, Energy+ prend en compte l'humidité dans les murs et non TRNSYS, mais ce dernier est plus facile à manipuler, notamment lors du couplage avec CONTAM. Afin de choisir au mieux le logiciel, j'ai mené une étude sur la pierre utilisée dans la construction de l'immeuble : la pierre de Couzon.

La base de données BDLISA⁷ montre que la pierre de Couzon provient d'un aquifère et qu'elle est très poreuse. Cette porosité, et donc cette réactivité à l'eau, implique une prise en compte de l'humidité dans les murs afin de représenter au mieux les échanges thermiques. Energy+ semble donc le logiciel le plus adapté.

Toutefois, le couplage CONTAM-Energy+ est plus difficile à mettre en place que celui CONTAM-TRNSYS pour lequel je disposais un appui interne pour la mise en place dans la durée contrainte du stage. J'ai donc choisi d'utiliser TRNSYS, laissant la possibilité d'utiliser Energy+ pour ma thèse.

b. Hypothèses des données d'entrée

i. Polluants et marqueurs de présence

Le CO₂ n'est pas considéré comme un polluant mais sa forte concentration altère le confort des occupants ; mélangé aux biofluents, il peut causer des maux de tête et des nausées. De plus, il demeure un bon indicateur de présence de ces derniers, étudié depuis longtemps pour caractériser l'efficacité de la ventilation.

Les particules fines (Particules Matters : PM) sont la première source de polluants à laquelle l'humain est exposé, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. Dans un logement, les particules fines produites sont les PM_{2.5} par l'intermédiaire de la cuisson des aliments. A cela s'ajoute, les particules fines extérieures qui peuvent transiter à l'intérieur des logements à travers les échanges aérauliques.

J'ai choisi de me concentrer uniquement sur ces deux polluants, comme dans le projet Creativ, et de ne pas ajouter le formaldéhyde à l'étude.

ii. Variantes

Quatre variantes, en plus de la situation de départ, sont étudiées.

La première variante concerne les combles perdus. Ceux-ci sont remplacés par le dernier logement.

La deuxième variante concerne l'orientation du bâtiment. On impose un demi-tour (180°) à ce dernier pour étudier l'impact de l'orientation sur le confort thermique.

La troisième variante est la mise en œuvre de la proposition de rénovation du programme Eco-patrimoine de la ville de Lyon avec l'application d'un enduit correcteur thermique, donc d'une isolation par l'extérieur.

La quatrième variante est une isolation par l'intérieur, plus courante dans les bâtiments anciens que celle extérieure. J'ai choisi de rester sur une isolation au chanvre, matériau que j'ai étudié cette année lors de

⁷ Annexe 1 : Fiche BDLisa sur la pierre de Couzon

mon cours sur les bétons biosourcés. J'ai repris alors la proposition d'isolation de Margot Ruiz au cours de sa thèse [34].

Paramètre de la variante	Variante 0 (Situation de départ)	Variante 1 (Pire cas)	Variante 2 (Orientée)	Variante 3 (Isolation extérieure)	Variante 4 (Isolation intérieure)
<i>Combles</i>	Perdus	Aménagés	Perdus	Perdus	Perdus
<i>Isolation du toit</i>	Aucune	Aucune	Aucune	Oui (adaptation de l'isolation intérieure des murs)	Oui (adaptation de l'isolation intérieure des murs)
<i>Isolation des murs</i>	Aucune	Aucune	Aucune	Oui : enduit extérieur Parnatur de Parex Lanko (données de la ville de Lyon [35])	Oui : reprise de l'isolation intérieur en chanvre de la thèse de Margot Ruiz [34]
<i>Perméabilité à l'air (valeur de $Q_{4PaSurf}$)</i>	Q=2,5 ([20])	Q=2,5 ([20])	Q=2,5 ([20])	Q=0,95 ([20])	Q=0,95 ([20])
<i>Orientation</i>	N-NO	N-NO	S-SE	N-NO	N-NO

Figure 32 : Tableau récapitulatif des variantes étudiées

Certaines variantes seront croisées, notamment la 1 vis-à-vis de la 2, 3 et 4.

iii. *Choix des périodes de simulation*

La période chaude de l'année comprend les mois de juin, juillet, août et septembre. Néanmoins, pour que les données soient cohérentes sur toute la période étudiée, la modification des fichiers météo commence dès le 18 mai (2 semaines avant juin) et l'étude des indicateurs dès le 26 mai, afin que les moyennes glissantes puissent s'effectuer correctement. Les informations seront néanmoins étudiées entre le 1^{er} juin et le 30 septembre.

c. *Données météorologiques*

J'ai besoin de fichiers météorologiques représentant les climats futurs selon différents scénarios de changement climatique, basés sur les scénarios RCP, qui intègrent une canicule représentative pour Lyon. Les RCP (Representative Concentration Pathways) sont quatre scénarios de trajectoires de forçage radiatif établi par le GIEC jusqu'à l'horizon 2100.

Mathilde Hostein, au cours de sa thèse, a travaillé sur une méthode d'élaboration de fichiers météorologiques pour 5 scénarios : historique 1976-2005, projection futur proche 2035-2064 selon les scénarios rcp45 et rcp85, puis idem avec la projection à long terme 2070-2099. Ces 5 scénarios sont modélisés à l'aide de 5 banques de données. Ce qui donne 25 fichiers météo [36].

Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAU LIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

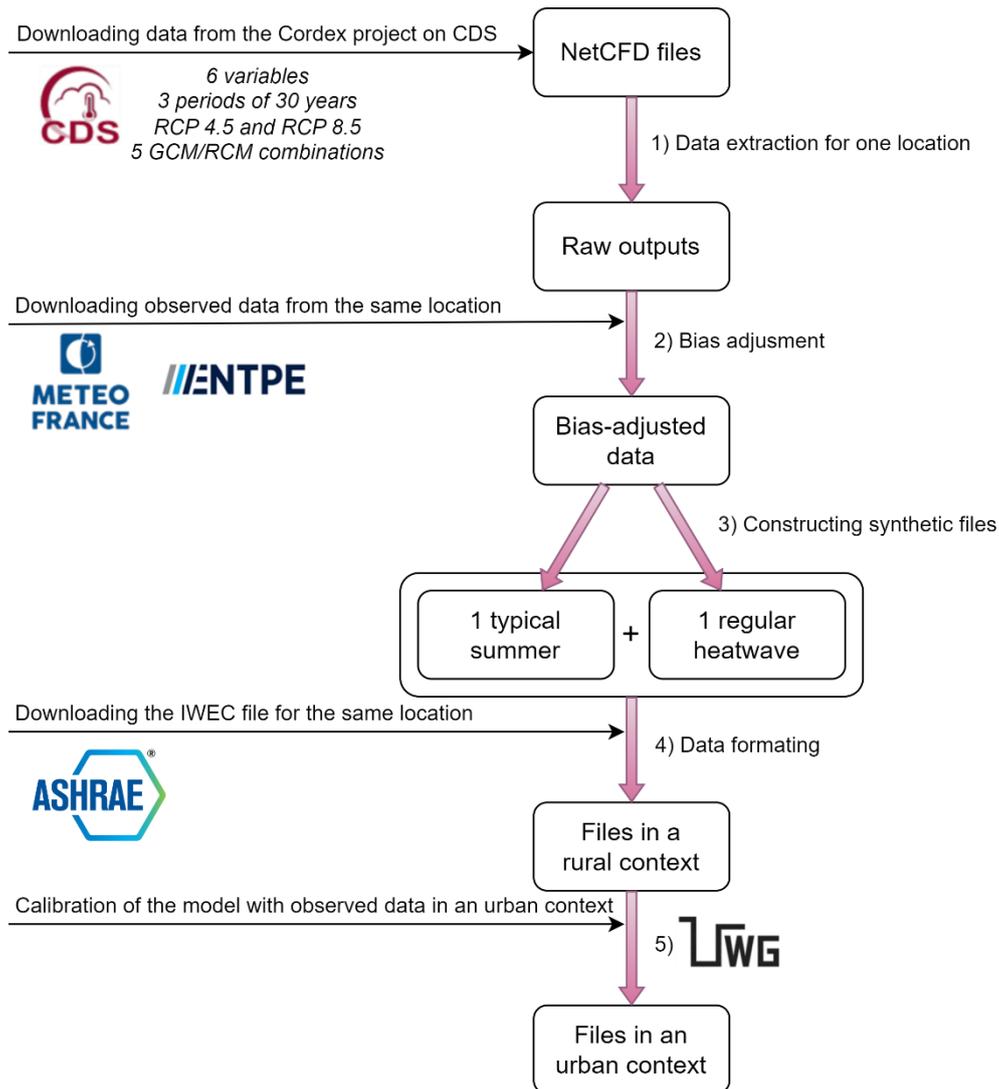


Figure 33 : Methodologie pour construire les fichiers météorologiques représentant le futur climat d'un quartier urbain et intégration d'évènements extrêmes (vague de chaleur) [36]

J'ai récupéré les fichiers météorologiques établis par Mathilde avant l'utilisation du module UWG afin de faire correspondre les fichiers météorologiques à mon quartier d'étude, sa densité bâtie, son type de logement et sa densité de végétation.

Le module UWG nécessite l'apport d'informations sur la densité bâtie, celle de la végétation et sur la fonction des bâtiments. J'ai récupéré ces informations à l'aide de la base de données BDTOPO traitée via QGIS.

Variable	Valeur	Définition de la variable
Zone	4A	Zone climatique
Bldheight	21	Taille moyenne des bâtiments en mètres
Blddensity	0.4404	Empreinte au sol de la densité bâtie rapportée à l'aire urbaine choisie
Vertohor	2.7914	Ratio vertical sur horizontal de l'aire urbaine (aire totale des façades verticales urbaines divisée par l'aire urbaine choisie)

<i>Grasscover</i>	0.0032	Fraction du sol urbain seulement recouvert par de l'herbe
<i>Treecover</i>	0.0095	Fraction du sol urbain recouvert par des arbres
<i>H_ref</i>	90	Hauteur d'inversion, en mètres
<i>H_ubl1</i>	300	Hauteur de la couche limite urbaine diurne en mètres (= rayon de l'aire urbaine choisie)
<i>H_ubl2</i>	60	Hauteur de la couche limite urbaine nocturne en mètres
<i>Bld</i>	('primaryschool', 'pre80', 14/685), ('supermarket', 'pre80', 38/685), ('midriseapartment', 'pre80', 629/685), ('largehotel', 'pre80', 4/685)	Types de bâtiments rencontrés, leur période de construction et leur proportion dans le nombre total de bâtiment

Figure 34 : Tableau récapitulatif des informations nécessaires au lancement du module UWG



Carte du 8 rue du général de Sève et son cercle d'influence des 300 m

Figure 35 : Carte QGIS du cercle d'influence autour du 8 rue du général de Sève

d. Données d'occupation

Les scénarios d'occupation données par la RT2012 et repris par la RE2020 concerne le logement et non les pièces qui le composent. Ces scénarios apportent les valeurs des gains de chaleur due à l'occupation, les équipements électriques et l'éclairage [37].

L'article de Baptiste Poirier [18] fournit les valeurs liées à l'humidité et à l'émission de polluants, et ceux par évènement (douche, cuisine, etc). Les évènements étant reliés à des pièces spécifiques, il est plus simple de réaliser l'emploi du temps associé. En le couplant aux données des scénarios thermiques, il est possible d'élaborer un emploi du temps global cohérent.

Les scénarios s'élaborent sur une semaine. En effet, certaines actions comme les lessives sont estimées à l'échelle d'une semaine tandis que d'autres sont par jours (douche, repas). Il y a également une différence d'occupation du logement entre les jours de la semaine et le weekend. J'ai choisi de ne faire aucune

différence entre le mercredi et les autres jours de la semaine et d'occuper le logement tout le weekend afin de maximiser les risques d'expositions.

J'ai également choisi de poser une semaine de vacances entre le 12 et le 18 août afin de mieux voir l'impact des occupants sur le confort thermique du logement.

Par ailleurs, j'ai choisi de fixer le nombre d'occupants à deux adultes.

e. Choix des indicateurs de confort thermique et de QAI

Chaque indicateur est étudié pour chaque pièce des 2 logements étudiés, hors cas spécifique où ils sont étudiés pour une seule pièce.

Concernant la qualité d'air intérieur, j'ai choisi seulement un indicateur par polluant : l'exposition cumulée. Elle permet de confronter l'exposition de l'occupant à un polluant au seuil sanitaire associé.

L'exposition cumulée au CO₂ (I_{CO_2}) ne doit pas excéder la valeur de référence choisie, ici celle de confort à 1000 ppm [18]. Celle des PM_{2.5} ($I_{PM_{2.5}}$) ne doit pas dépasser la valeur limite sanitaire de 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ [18].

Pour le confort thermique, j'ai choisi des indicateurs simples et des indicateurs liés au confort adaptatif, reprenant les travaux de la thèse de Mathilde Hostein :

- DH : Les degré-heures correspondent à la différence entre la température étudiée et la température limite (ici 28°C, d'après la norme EN-16798-1 [38]) multiplié par le nombre d'heures.
- iT : Le pourcentage de temps où la température est supérieure à la température limite de 28°C (EN-16798-1 [38]).
- iT26 : Le pourcentage de temps où la température est supérieure à 26°C, température de confort pour dormir. Cet indicateur n'est utilisé que pour les chambres. Il provient de la norme CIBSE TM59 et met en avant l'aspect sanitaire du confort thermique en cherchant un moment de fraîcheur pour dormir. J'ai repris cet indicateur de la thèse de Mathilde qui l'a adapté de l'étude de M. Hendel [39]
- iHR : Le pourcentage de temps où l'humidité relative est hors de la plage 25-60% (EN-16798-1 [38]). Comme vu dans l'état de l'art, l'humidité impacte le ressenti thermique des occupants.

f. Description du modèle thermo-aéraulique des logements

J'ai représenté seulement deux logements car la représentation précise d'un immeuble entier nécessite un temps de calcul trop long. Les appartements de l'immeuble étudié sont tous d'es appartement d'angle non traversant percés d'ouvertures sur la façade Nord-Ouest ou Sud-Est.

J'ai choisi d'étudier le logement Ouest de la façade Nord-Ouest, donnant sur la rue, et ce pour les deux derniers étages de l'immeuble (4 et 5). J'ai également représenté les combles perdus. Le choix de ce logement est dû à la présence d'un plus grand nombre de plans et de données sur la disposition des pièces que pour les logements de la façade Sud-Est.

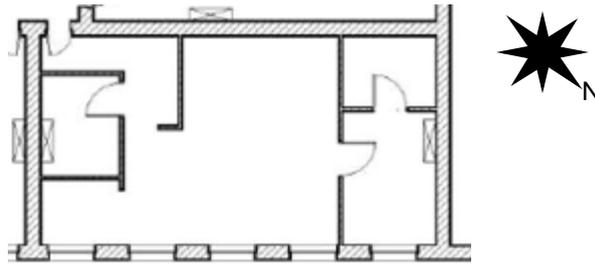


Figure 36 : Détail de plan montrant le logement Ouest de la façade Nord-Ouest [33]

Dans un premier temps, j'ai récupéré dans un tableur Excel les données constructives du logement, notamment à l'aide de l'étude du bureau d'étude (BE) thermique de 2015. Certaines cotes étaient absentes des plans. J'ai alors estimé les dimensions.

Concernant les cheminés, au nombre de deux par logement côté Nord, je n'ai rien trouvé dans la littérature, notamment sur les cheminées condamnées comme dans le cas d'étude. Comme leur présence ne peut qu'améliorer le confort thermique d'été grâce au tirage thermique associé, on se place dans le pire des cas ; c'est-à-dire qu'on ne les prend pas en compte, elles sont équivalentes à un mur.

J'ai représenté dans un premier lieu le cas réel (les deux derniers étages surmontés des combles perdus). Ensuite, j'ai représenté différentes variantes jouant sur la présence ou non de combles perdus, sur l'orientation et sur l'isolation.

g. Modèle aéraulique dans CONTAM

CONTAM est un logiciel de simulation dynamique de QAI, développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST). Il permet d'analyser les transferts de polluants et les mouvements d'air dans les bâtiments. Il permet d'évaluer la diffusion de polluants, l'efficacité de la ventilation et des stratégies de contrôle.

J'ai représenté les logements dans CONTAM, indiqué les dimensions, positionné et dimensionné les portes et les fenêtres ainsi que la perméabilité à l'air des murs extérieurs.

Concernant la dimension des fenêtres, la seule information disponible est leur surface de 4.2m². En prenant la largeur classique d'une fenêtre (1,2 m), cela faisait 3,5m de hauteur, ce qui était cohérent avec les 5,5 à 6 m sous plafond. Je n'avais aucune information sur les portes, j'ai donc pris les informations d'une porte standard d'intérieure et de palier, proposées directement par le logiciel.

La perméabilité à l'air des murs dépend de la structure même du mur (les espaces entre le mortier et les pierres par exemple). Elle est caractérisée en France par l'indice $Q_{4PaSurf}$ qui représente le débit de fuite pour une différence de pression de 4 Pa par unité de surface déperditive, hors plancher bas (A_{TBAT}). Elle est répartie sur chaque paroi extérieure au prorata de sa surface par rapport à la surface A_{TBAT} , en utilisant un exposant de la loi de pression.

$$Q_{4PaSurf} = (C \times 4^n) \times \frac{A_{TBat}}{A_{Surf}}, \text{ où on fixe } n=2/3 \approx 0,67, \text{ valeur usuelle.}$$

Le logement, non traversant, possède des pièces humides sans fenêtres (salle de bain et cuisine) ventilées par l'intermédiaire de grilles apposée dans les cloisons que j'ai aussi représentées.

Une fois le modèle CONTAM créé, je l'ai converti à l'aide de CONTAM3DExport en fichier « .dck », fichier lié à TRNSYS.

h. Modèle couplé dans TRNSYS

TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique des systèmes énergétiques utilisé notamment dans la modélisation du confort thermique des bâtiments. Simulation Studio est l'interface principale. Elle permet de construire des Type, éléments décrivant les conditions climatiques extérieurs ou les systèmes de ventilation ou encore les emplois du temps d'occupation, et de les lier entre eux, simulant leurs interactions. TRNBUILD est une interface secondaire utilisée pour définir les caractéristiques thermiques du bâtiment, telles que l'isolation et les matériaux, afin de mieux comprendre leur impact sur le confort thermique intérieur.

Sur l'interface principale, j'ai ajouté les emplois du temps des scénarios d'occupation (gains de chaleur, apport d'humidité, production de polluants), des informations relatives aux protections solaires, aux pourcentages d'ouvertures des fenêtres et à la perméabilité des murs extérieurs. Les valeurs ainsi que la programmation des émissions de polluants (CO₂, PM_{2.5}) se font directement sur SimulationStudio.

Les scénarios d'occupation sont élaborés à l'aide du type 14, qui permet la création de fonction correspondant à une journée et compilés à l'aide du type 41b. Ce type reçoit trois fonctions (une pour les jours de semaine, une pour les weekends et une pour les vacances) et émet une fonction qui renvoie une valeur différente selon la période considérée.

Le pourcentage d'ouverture des fenêtres est fixé à 30% (pourcentage établie par Mathilde Hostein au cours de sa thèse). La protection solaire des jalousies est fixée à 90% arbitrairement.

Sur TRNBUILD, j'ai entré les valeurs de conductivité, de capacité et de résistance thermiques ainsi que la densité volumique des parois. Ces valeurs proviennent de l'étude thermique de 2015 [33] données dans la Présentation de l'étude de cas.

Les valeurs des émissions d'humidité (douche, cuisine), de chaleur (présence, lumière, équipement) sont également entrées dans TRNBUILD mais la programmation de leur émission reste sur SimulationStudio.

3. Codes, méthode d'analyse

Afin de faciliter l'exécution des simulations, je l'ai automatisée. Pour cela, j'ai repris le code rédigé par Mathilde Hostein pour sa thèse. Ce code permettait aussi la lecture du fichier « .out » contenant les résultats et la production d'un fichier Excel à partir de ce dernier. J'ai effectué les adaptations nécessaires. Par ailleurs, je l'ai combiné à celui de la thèse de Baptiste Poirier qui permettait la lecture des fichiers « .ncr » des résultats de CONTAM que j'ai également adapté à mon cas d'étude.

A la fin de ce processus, je me suis retrouvée avec 200 simulations à traiter. Afin de réduire le nombre de simulations à traiter, je me suis penchée sur les différences entre les différents modèles utilisés pour produire les fichiers météorologiques pour les 5 scénarios d'étude. J'ai étudié ces différences par l'intermédiaire de la température extérieure moyenne au cours de la période d'étude et celles du séjour de l'étage supérieur. J'ai effectué cette étude uniquement pour le cas principal.

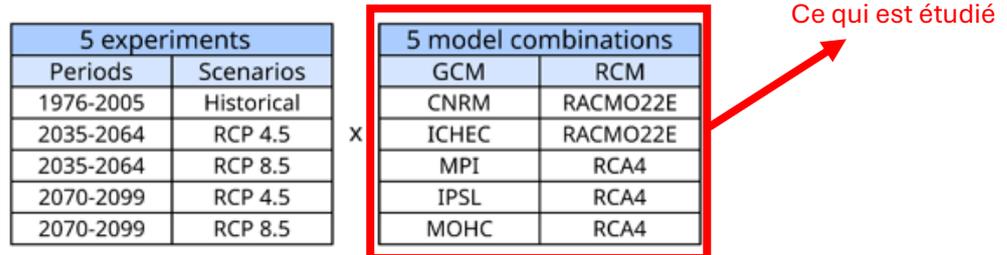


Figure 37 : Élément de schéma montrant la combinaison scénarios - modèles utilisés [36]

Ensuite, j'ai comparé à l'aide d'une fonction différentielle les températures issues de CONTAM et TRNSYS afin de voir si elles étaient identiques et si non, pourquoi. Je me suis centrée sur le cas principal en période historique pour cette étude.

J'ai ensuite comparé par des boxplot la température de l'air et celle opérative de chaque pièce, pour tous les scénarios mais seulement le cas principal.

Puis, afin d'établir quelle serait les pièces les plus intéressantes à étudier, j'ai tracé les boxplots des températures de toutes les pièces pour le cas réel et le pire cas (variante 0 et 1) pour tous les scénarios.

Une fois les pièces les plus exposées récupérées, j'ai tracé les boxplots de ces dernières pour chaque variante en faisant un graphique par pièce. Cela m'a permis d'évaluer rapidement l'impact de chaque variante.

Enfin, j'ai calculé les indicateurs détaillés plus tôt afin d'analyser mes résultats de simulation en profondeur.

4. Résultats et analyse

a. Analyse des bases de données météo

Pour la partie historique (allant de 1976 à 2005), les différences entre chacune des modélisations du climat est assez faible. Les différentes températures extérieures restent similaires. Celles recueillies dans le séjour du logement haut décuplent légèrement ces différences.

En revanche, lorsqu'il s'agit des projections futures, notamment lointaines, les différences sont accentuées. Comme pour le scénario historique, la température relevée dans le séjour amplifie les différences.

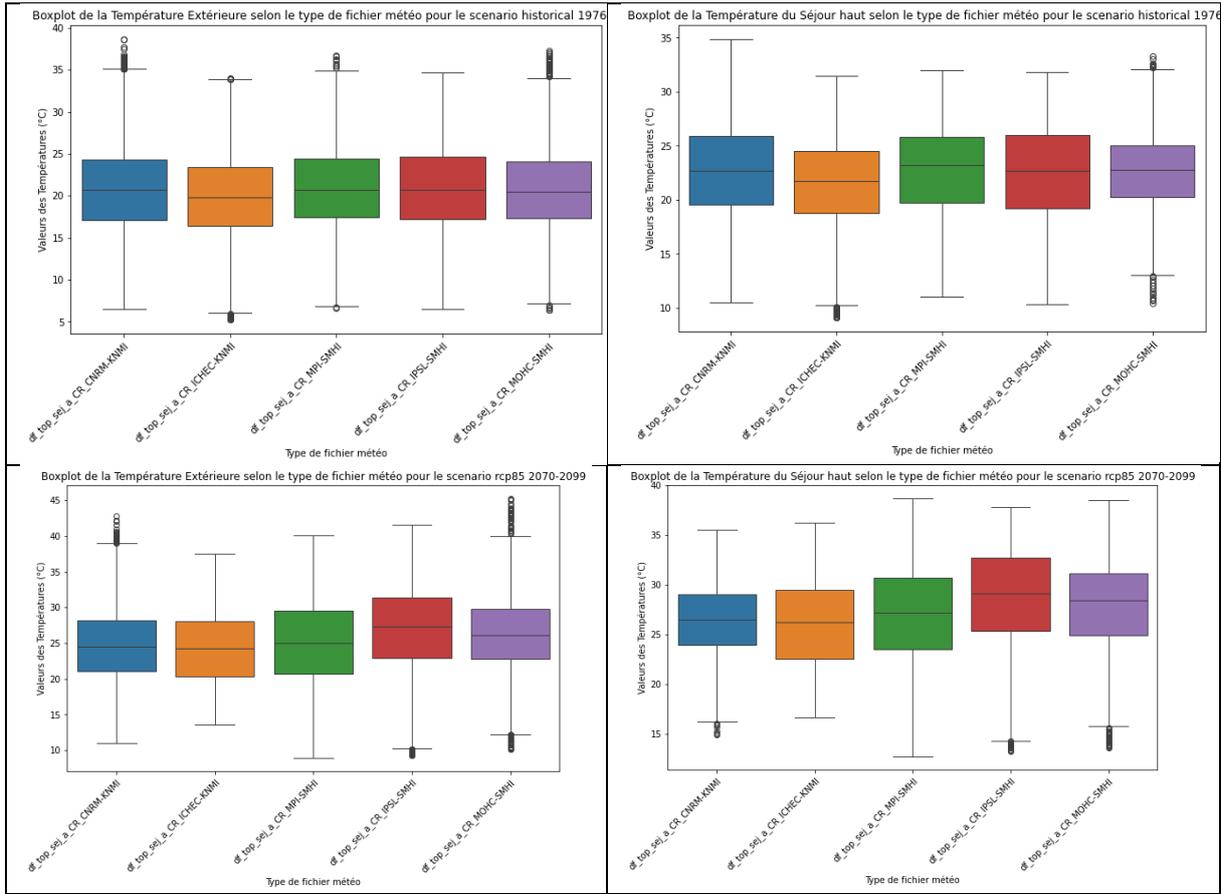


Figure 38 : Diagramme boîte à moustaches (boxplot) des températures extérieures et du séjour haut pour les scénarios historiques et rcp85 2070-2099 selon les différents fichiers météo

Néanmoins, il était impossible de mener toutes les analyses sur 200 fichiers. C'est pourquoi, malgré les différences visibles dans les modélisations projectionnelles, j'ai choisi de ne conserver qu'un seul type de fichier météo. J'ai choisi celui qui présentait les valeurs les plus médianes : MPI_SHMI (boîte verte sur la Figure 38).

b. Comparaison des températures issues de CONTAM et TRNSYS dans les différentes pièces

J'ai calculé la différence entre la température de l'air de chaque pièce issue de TRNSYS et la température des pièces donnée par CONTAM en faisant $T_{AIRpièce} - T_{pièces}$.

Cette fonction différentielle donne essentiellement des résultats négatifs, compris généralement entre 0 et 3. La seule période de superposition se situe vers la deuxième semaine d'août, la semaine de vacances.

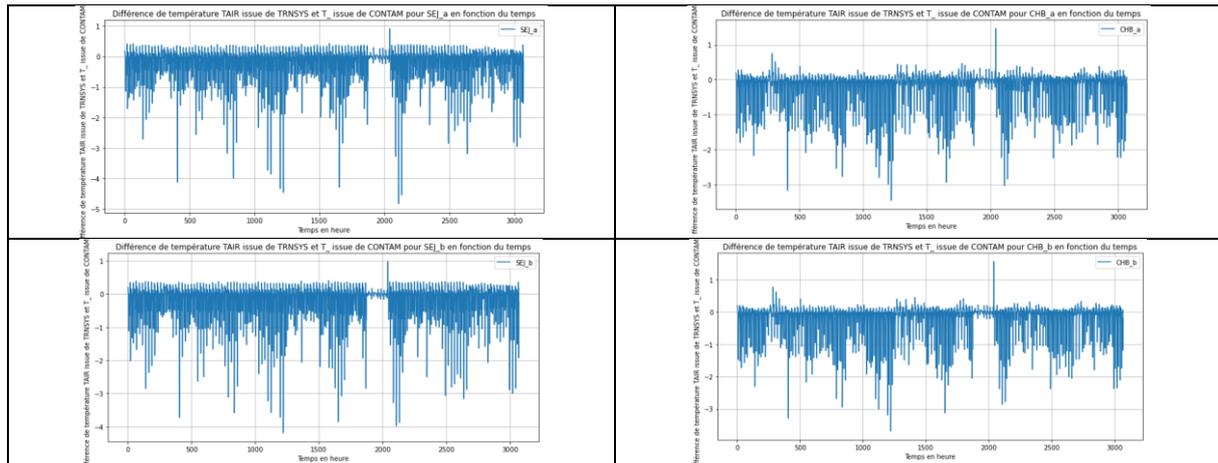


Figure 39 : Différence de températures entre TAIR issue de TRNSYS et T issue de CONTAM en fonction du temps pour 4 pièces (les 2 chambres et séjours)

La différence entre les deux températures est raisonnablement imputable à la prise en compte des gains de chaleur et d'humidité due à la présence humaine, aux appareils et à l'éclairage uniquement sur TRNSYS. En effet, lorsque tous les contrôleurs sont mis à zéro pour la semaine de vacances, la différence est presque nulle. On voit alors l'influence de l'occupation humaine dans le confort thermique d'un logement.

c. Comparaison entre TAIR et TOP

De même que précédemment, j'ai comparé la température de l'air et la température opérative dans chaque pièce pour le cas principal et ce pour tous les scénarios temporels afin de voir l'impact de la température des parois sur la température ressentie dans la pièce. En effet, les bâtiments anciens sont souvent cités pour leur sensation de parois froides.

La différence entre les deux restent faible. Toutefois, elle est plus marquée dans les pièces les plus exposée au soleil, c'est-à-dire les pièces avec fenêtre (chambres et salons).

En comparant les scénarios projectionnels à celui historique, on remarque que la valeur médiane augmente, ce qui logique étant donné que la température extérieure augmente. Néanmoins, l'apparence globale des boîtes reste identique.

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL ANCIEN LYONNAIS

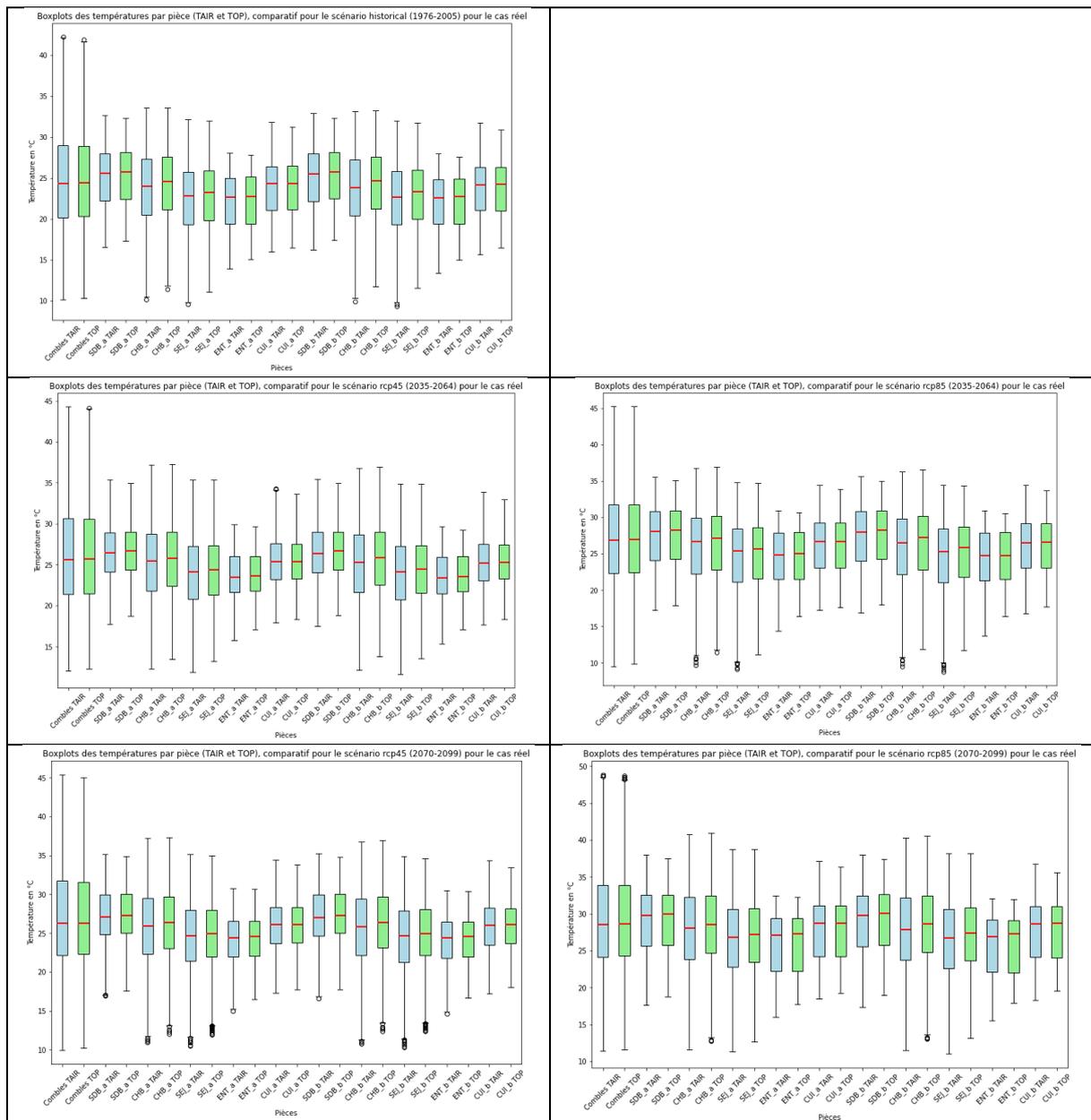


Figure 40 : Boxplot de la température de l'air et de la température opérative dans chaque pièce pour chaque scénario et pour le cas principal

Pour la suite, la température utilisée sera la température opérative.

d. Comparatif des températures dans un logement entre la variante 0 et la variante 1

J'ai représenté sous forme de diagramme boxplot les températures opératives dans les pièces pour le cas principal (cas réel) et celui où le dernier étage se situe sous les toits (pire cas).

Dans un premier temps, pour le scénario historique, on remarque que la température des combles fluctue énormément (premier et dernier décile entre 10°C et 42°C). Néanmoins, ces combles protègent les étages inférieurs. En effet, la température médiane de la chambre haute du cas principal est à 26°C tandis que celle

du cas sous les toits est à 28°C. Par ailleurs, les fluctuations sont moins importantes (premier et dernier décile entre 12°C et 34°C pour le cas réel et entre 12°C et 50°C pour le pire cas).

Les comparaisons entre étage dans un même cas montrent une différence assez faible pour le cas réel. Elle est plus marquée pour le pire cas pour certaines pièces comme le séjour, qui est étonnamment plus chaud en bas qu'en haut.

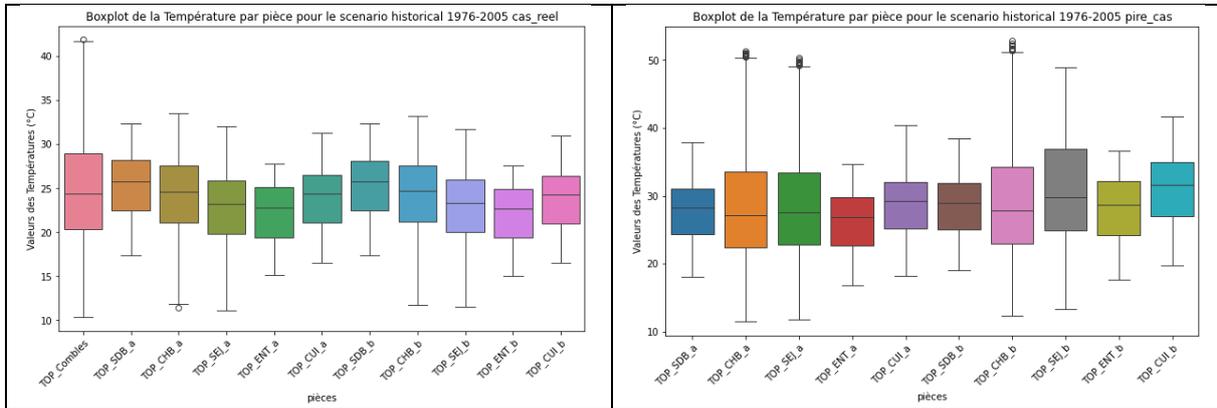


Figure 41 : Boxplot de la température par pièce pour le scénario historique, comparaison du cas réel et du pire cas

Pour les scénarios projectionnels, l'allure des boîtes est similaire. Toutefois, les températures extérieures étant globalement plus forte, cette différence est plus marquante. Par exemple, en prenant la projection la plus désavantageuse pour le futur lointain (2070-2099), la température médiane de la chambre haute est de 28°C pour le cas réel et de 32°C pour celle du pire cas. Les déciles suivent la même tendance : 13°C et 41°C pour le cas réel et 13°C et 55°C pour le pire cas.

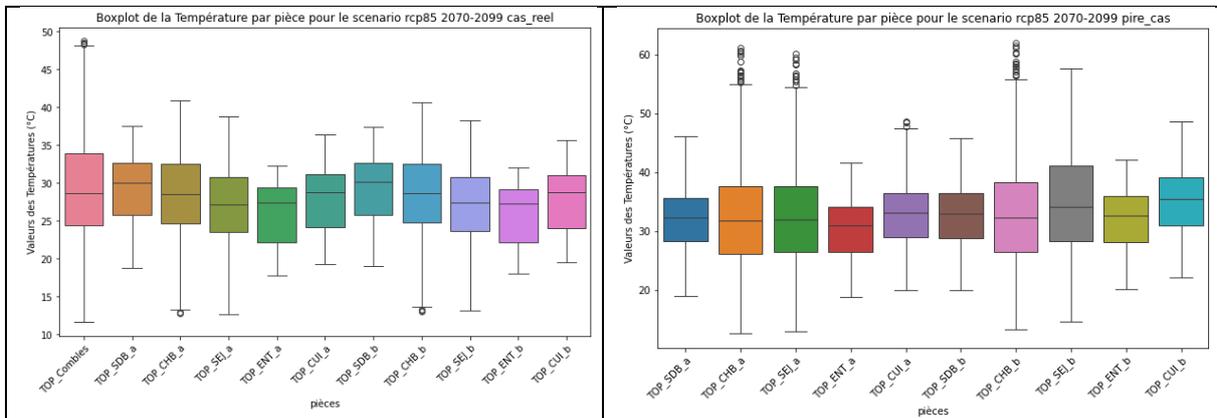


Figure 42 : Boxplot de la température par pièce pour le scénario rcp85 de 2070-2099, comparaison du cas réel et du pire cas

Par ailleurs, les allures des boxplot restent identiques au cours du temps. En comparant le scénario historique aux deux projections rcp85, les dimensions des boîtes ne bougent que très peu. Néanmoins, les médianes, quartiles et déciles se déplacent vers des températures plus chaudes. En continuant de prendre l'exemple de la chambre haute, on a $T_{\text{médiane}} = 25^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{médiane}} = 27^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{médiane}} = 28^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{dernier décile}} = 34^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{dernier décile}} = 37^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{dernier décile}} = 41^{\circ}\text{C}$.

Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

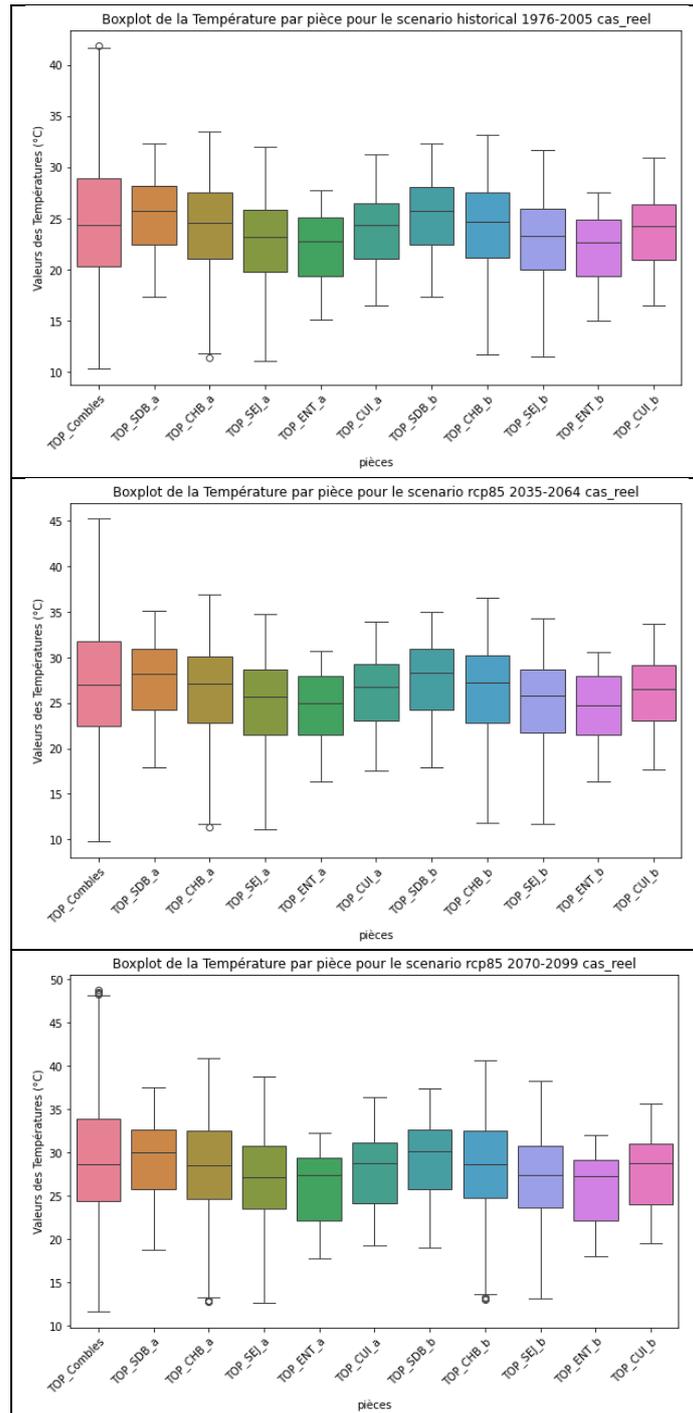


Figure 43 : Boxplot de la température par pièce pour le scénario historique et les deux projections rcp85 (2035-2064 et 2070-2099)

J’ai comparé les deux scénarios de projection, sachant que le rcp85 doit être le moins favorable. La première chose qu’on peut remarquer est l’agrandissement des boîtes entre les deux projections, et ce pour les deux périodes. Les températures médianes ne bougent que peu pour les pièces les plus exposées ($T = 26^{\circ}\text{C}$ et $T = 27^{\circ}\text{C}$ pour la chambre haute pour la période 2035-2064). Elles ne bougent guère plus pour les pièces plus protégées ($T = 24^{\circ}\text{C}$ et $T = 26^{\circ}\text{C}$ pour l’entrée haute).

En revanche, la plage de données, notamment des premier et troisième quartiles est plus importante pour les pièces les moins exposées. Elle s'étend pour la période 2035-2064 de 23°C à 29°C (6°C) pour la chambre haute et de 22°C à 26°C (4°C) pour l'entrée haute pour le scénario rcp45 mais de 24°C à 30°C (6°C) et de 23°C à 29°C (6°C) pour le scénario rcp85.

De plus, la valeur médiane se rapproche du 3^{ème} quartile et s'éloigne du premier entre les 2 projections. Cela est très visible pour la période 2070-2099.

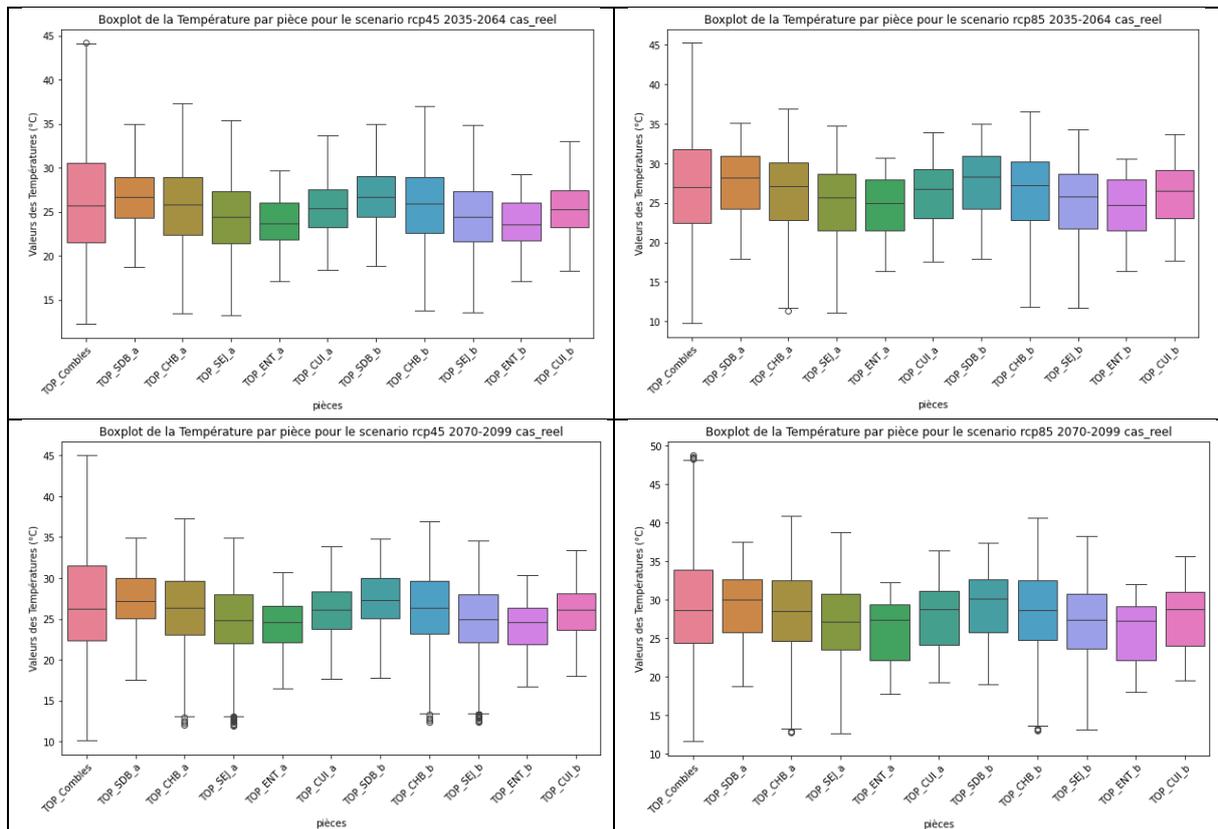


Figure 44: Boxplot de la température par pièce pour les projections rcp45 et rcp85 pour les deux périodes futures (2035-2064 et 2070-2099)

e. Pièces les plus exposées, comparatif entre toutes les variantes

J'ai ensuite cherché à m'intéresser aux pièces les plus exposées tant au vent qu'au rayonnement direct du soleil et à comparer ainsi les différentes variantes. A l'aide des diagrammes boxplot précédents, j'ai sélectionné quatre pièces (hors combles) : les deux séjours et les deux chambres.

J'ai commencé à étudier pour le scénario historique. J'ai été surprise par une différence non attendue pour le pire cas orienté (dernier logement sous les toits avec une orientation de +180°C, soit Sud-Est). En effet, je m'attendais à avoir une température supérieure à celle du pire cas resté orienté Nord-Ouest et c'est le contraire qui s'est produit.

Une explication possible serait une différence de débit d'air suffisamment importante pour compenser le rayonnement solaire d'une orientation plus au Sud. Toutefois, la température du cas réel orienté est supérieure à celle non orienté. Cette hypothèse sera traitée par la suite.

Par ailleurs, on voit les effets de l'isolation, notamment sur le pire cas : l'écart interdécile extrême diminue et la médiane baisse légèrement pour le cas réel et nettement pour le pire cas. Il n'y a pas de différence marquante entre l'isolation intérieure et extérieure avec simplement les valeurs remarquables de la température opérative.

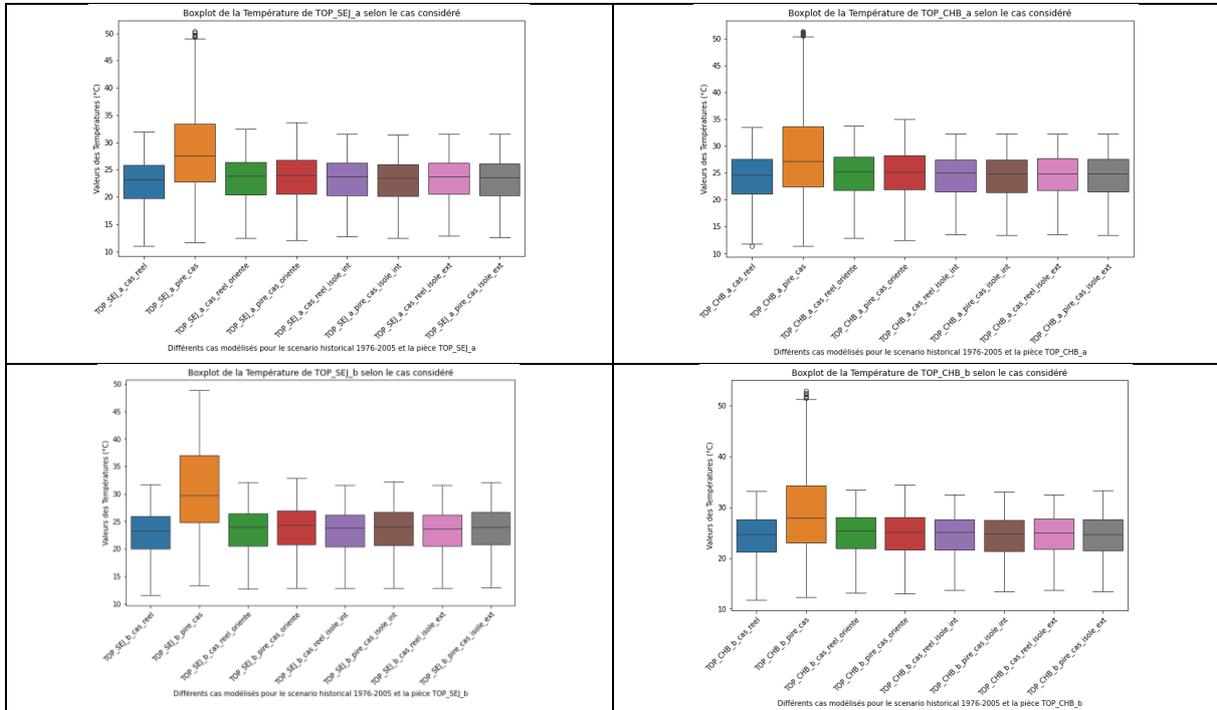
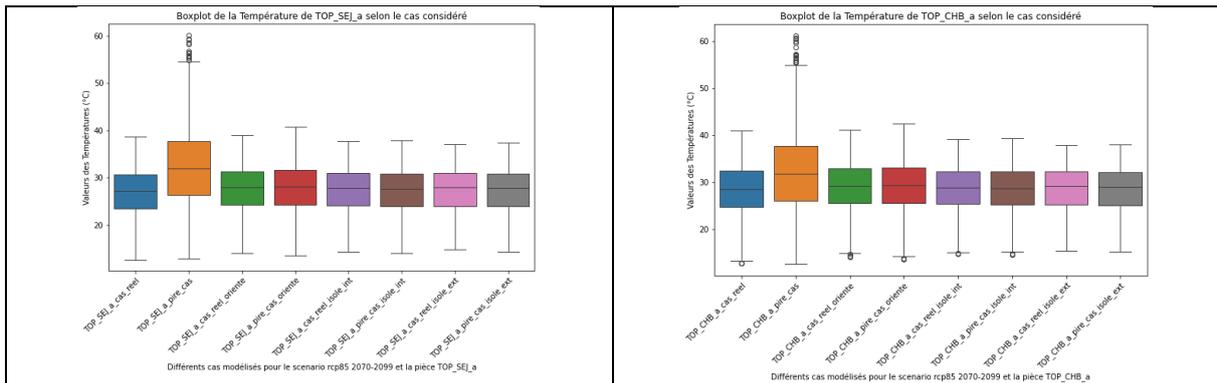


Figure 45 : Boxplot de la température dans les 4 pièces les plus exposées selon le cas considéré, scénario historique

Le constat est identique pour les scénarios futurs comme le montre le scénario rcp85 pour la période 2070-2099. On remarque néanmoins une augmentation globale des températures.



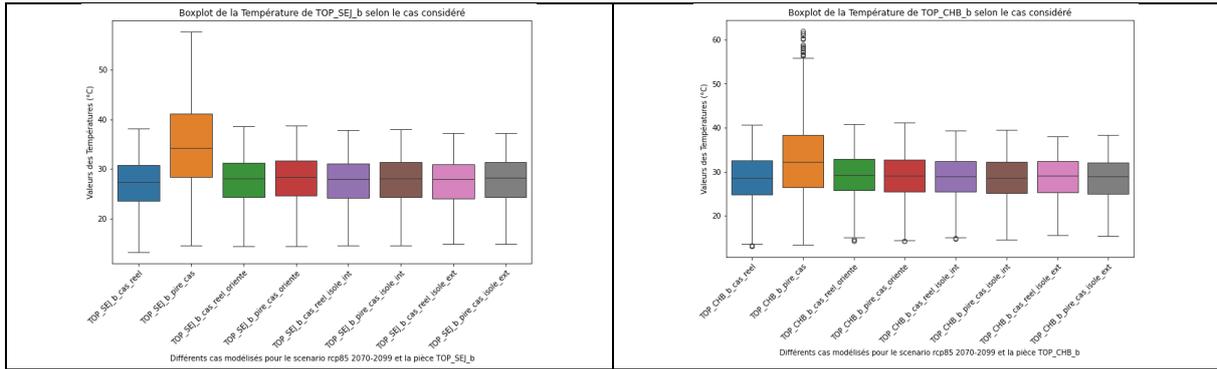


Figure 46 : Boxplot de la température dans les 4 pièces les plus exposées selon le cas considéré, scénario rcp85 pour la période 2070-2099

f. Vérification des débits d'air entrant pour expliquer les différences de température

L'hypothèse était que des débits d'air plus importants étaient présents pour le cas orienté, ce qui permettrait de « compenser » l'exposition normalement plus importante au Sud-Est qu'au Nord-Ouest. Portant, ce sont des résultats opposés que j'ai récupérés.

Débit d'air total dans les logements, comparatif entre le pire cas et le pire cas orienté, scénario historique (1976-2005)

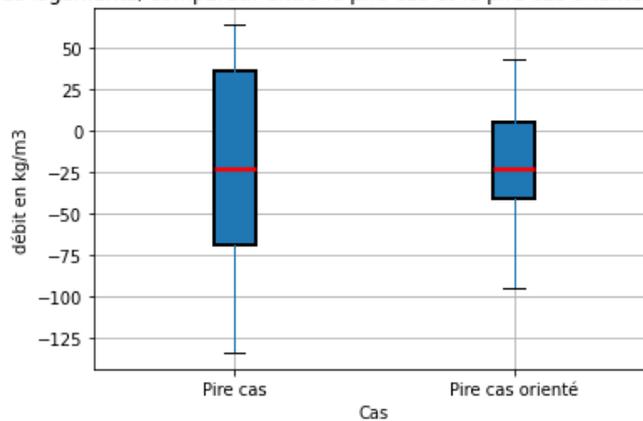


Figure 47 : Débit d'air total entrant dans les logements, comparatif entre le pire cas et le pire cas orienté, scénario historique

Ce ne sont donc pas les débits d'air entrant qui explique la différence de température entre le pire cas et le pire cas orienté de 180°.

J'ai également pensé à une explication par les horaires d'ouverture et fermeture des protections solaires. En effet, le soleil se couche à l'Ouest et donc peut être présent plus longtemps dans la soirée que pour le logement orienté Sud-Est, pour qui le soleil arrive plus tôt le matin. Or le matin, les jalousies sont fermées dès le départ au travail, donc avant la venue du soleil. Il pourrait être intéressant de creuser également cette piste.

g. Indicateurs thermiques

J'ai d'abord comparé deux pièces situées en haut et en bas. J'ai choisi la chambre à coucher (CHB_a, CHB_b), notamment pour pouvoir également regarder le pourcentage d'heure au-dessus de 26°C la nuit.

Concernant Le pourcentage de temps où l'humidité relative est hors du cadre normée (iHR), les valeurs sont similaires pour les deux pièces.

Le pourcentage d'heure au-dessus de 26°C la nuit (iT26) est plus élevé dans la pièce du haut. Ce constat est logique compte tenu de la position plus élevée dans les étages.

Le pourcentage d'heure au-dessus de 28°C (iT) suit la même tendance, bien que les échelles de mesure soient différentes.

Le nombre de jours cumulés maximum (Nb jours cumulés max) reste identique, à l'exception du cas isolé par l'intérieur où le nombre de jours atteint 3 pour la chambre du bas.

Pour les degrés-heures (DH), la chambre du bas reste toujours en dessous de 2000 °C.h, sauf dans le pire cas où elle atteint 10 000 °C.h. En comparaison, la chambre du haut dépasse les 2000 °C.h pour le pire cas orienté mais ne se situe qu'à 8000 °C.h pour le pire cas. Les autres cas ont des degrés-heures similaires entre les deux chambres.

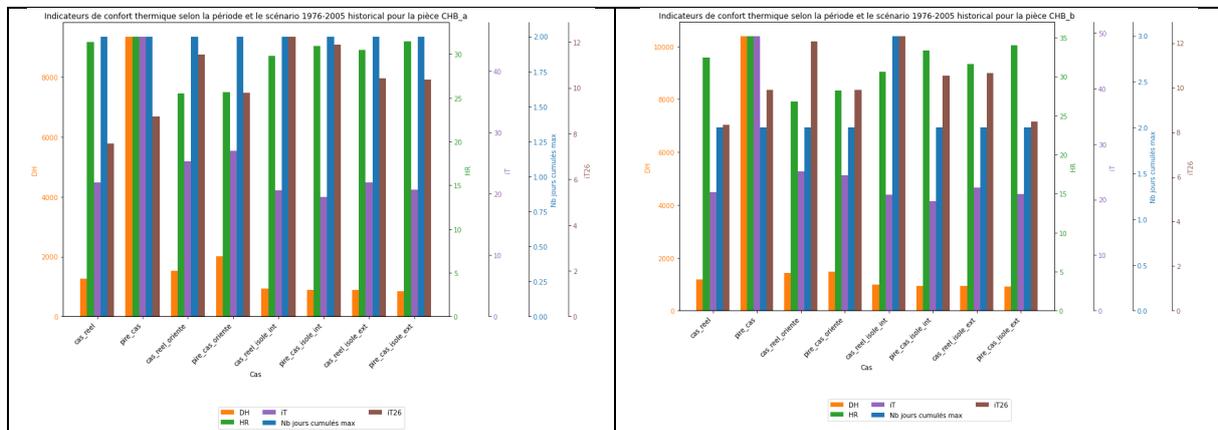


Figure 48 : Histogramme des indicateurs thermiques pour les 2 chambres, scénario historique (1976-2005)

J'ai ensuite regardé les pièces avec une forte production d'humidité : la cuisine et la salle de bain. J'ai pris les deux pièces du haut (CUI_a et SDB_a).

Le pourcentage de temps où l'humidité relative est hors du cadre normée (iHR) est globalement similaire à celle de la chambre pour la salle de bain, mais nettement plus élevée pour la cuisine (du simple au double). Cette grosse différence peut s'expliquer par la sous-estimation de l'humidité dans la salle de bain liée au pas de temps de 30 minutes imposé par le traitement des fichiers météorologiques futurs (ensoleillement très important ne pouvant être correctement interpolé par TRNSYS).

La valeur de l'iHR suggère que la ventilation dans la cuisine n'est pas suffisante pour traiter l'humidité.

Il est également notable que dans la salle de bain, l'isolation augmente le pourcentage hors cadre de l'humidité relative, avec une hausse de 10%, notamment avec une isolation extérieure, si l'on ne modifie pas la ventilation. Ainsi, il faudrait prévoir une ventilation supplémentaire lors de l'isolation.

Par ailleurs, dans le pire cas, étant donné que le logement est alors très exposé, notamment au vent qui favorise un fort débit d'air, l'humidité relative y est relativement faible.

Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

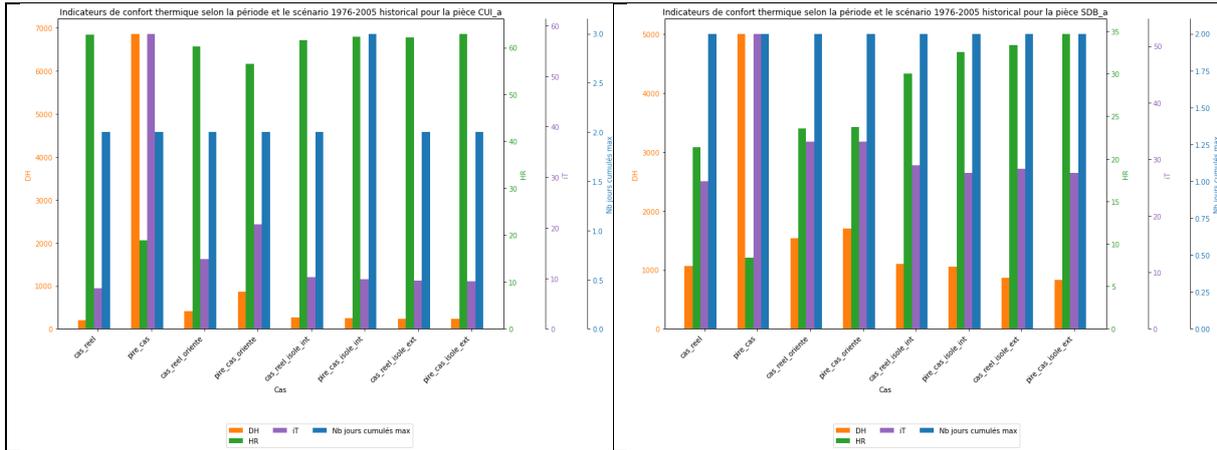


Figure 49 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la cuisine et la salle de bain, scénario historique (1976-2005)

J’ai également comparé une pièce, le séjour du haut (SEJ_a), à travers les différents scénarios afin de voir les effets du changement climatique, notamment l’augmentation de la température extérieure, sur les différents indicateurs.

Le pourcentage de temps où l’humidité relative est hors du cadre normée (iHR) est plus élevé pour le scénario actuel que pour les scénarios futurs, qui, quant à eux, présentent des valeurs relativement similaires, indépendamment du RCP ou de la période considérée.

Concernant les autres paramètres, le pire cas est saturé, je vais donc me concentrer sur les autres cas dans l’analyse qui va suivre.

En termes de pourcentage d’heure au-dessus de 28°C (iT), on observe une progression nette : moins de 20% pour le scénario historique, entre 18% et 20% pour le RCP 4.5 (2035-2064), entre 30% et 40% pour le RCP 8.5 (2035-2064), entre 25% et 32% pour le RCP 4.5 (2070-2099), et entre 45% et 52% pour le RCP 8.5 (2070-2099). Il y a donc une augmentation en avançant dans le temps, mais plus encore en fonction du RCP. De plus, à mesure que l’on avance dans le temps et que le RCP augmente, les différences entre les cas se réduisent en proportion, même si elles restent similaires en valeur absolue.

Un constat similaire s’applique aux degrés-heures (DH), notamment pour le RCP 8.5 sur la période 2070-2099. Hors pire cas, on atteint jusqu’à 6000 °C.h, alors qu’en scénario historique, ce chiffre est inférieur à 1000 °C.h.

Agnès Ferreira Lopes
**MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS**

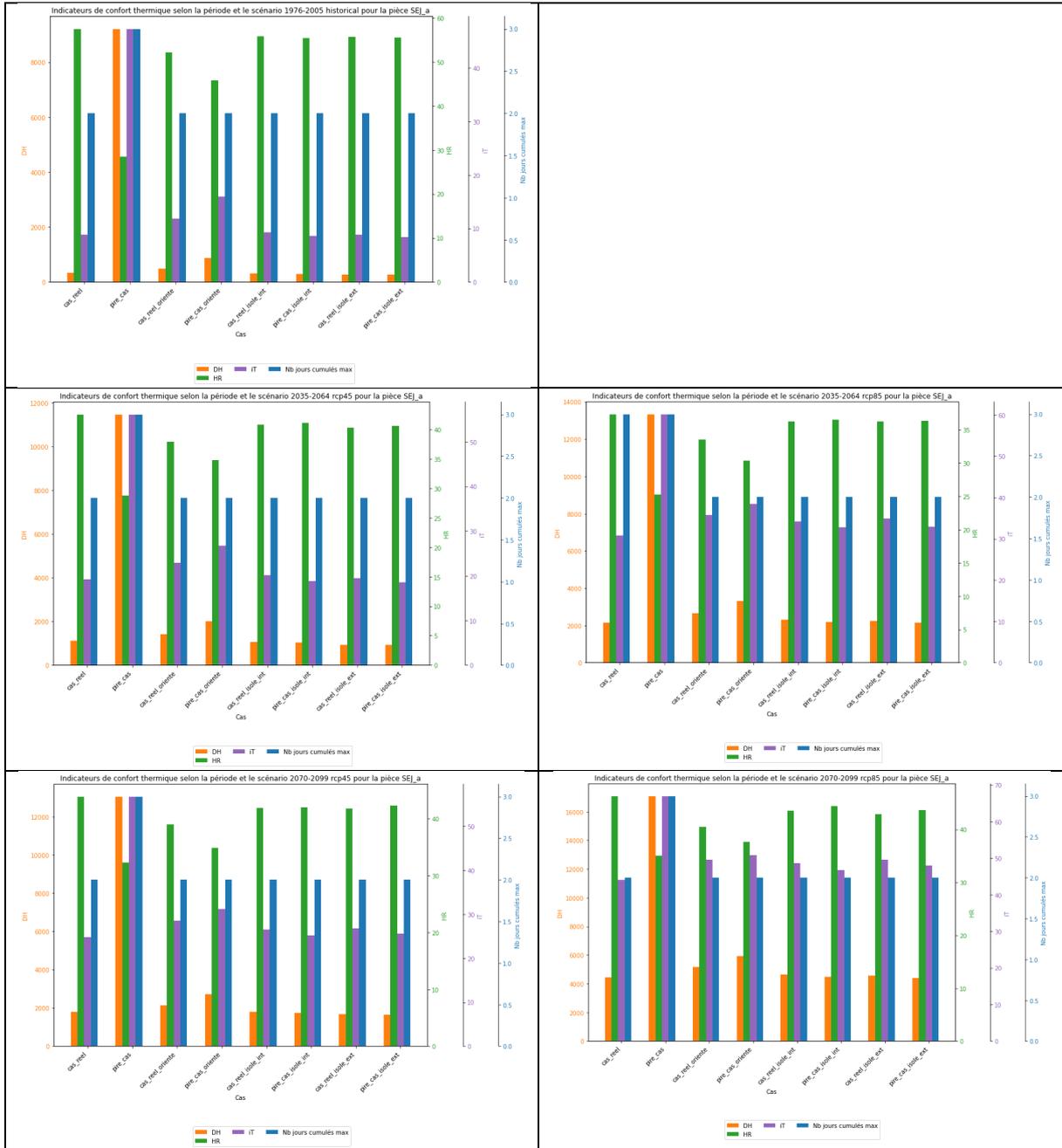


Figure 50 : Histogramme des indicateurs thermiques pour le séjour pour tous les scénarios

Le constat pour la chambre du même étage est identique mais avec des degrés-heures plus élevés, que l'on peut imputer à une bonne aération malgré la forte exposition. Concernant le scénario RCP 8.5 2070-2099, les valeurs atteignent jusqu'à 8000 °C.h (hors pire cas), par rapport aux 6000 °C.h du séjour.

Pour le pourcentage d'heures au-dessus de 26°C (iT26), le maximum est de 12,5% dans le scénario historique, mais il grimpe à 26% pour le scénario RCP 8.5 en 2070-2099. La moyenne pour l'iT26 est d'environ 10% dans le scénario historique et passe à environ 25% dans le scénario RCP 8.5 (2070-2099).

On peut raisonnablement avancer qu'un temps aussi important (1/4 du temps) de la plage de sommeil où la température dépasse les 26°C pourra engendrer des problèmes de santé due à un mauvais sommeil. Il

Agnès Ferreira Lopes
**MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS**

faut donc réfléchir à d'autres solutions de rafraîchissement en plus de celles étudiées au cours de cette étude.

L'isolation ne permet pas de faire baisser le temps nocturne passé à plus de 26°C, au contraire, surtout concernant l'isolation intérieure. On peut d'ailleurs noter qu'une isolation par l'extérieur est préférable à une isolation par l'intérieur en termes de pourcentage d'heures nocturnes au-dessus de 26°C. Ce constat s'applique également au pourcentage d'heures au-dessus de 28°C (IT), bien que de manière moins prononcée.

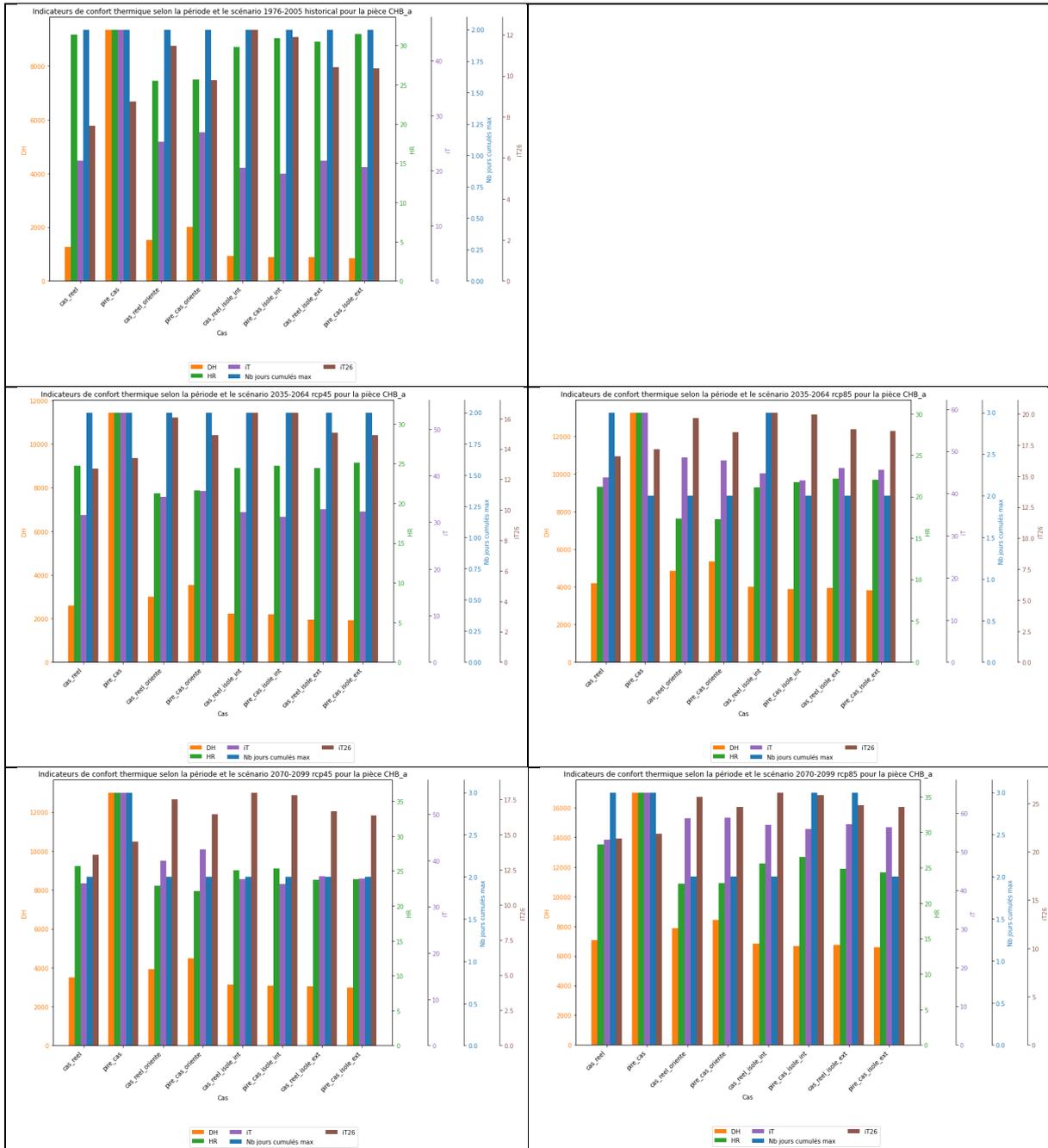


Figure 51 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la chambre pour tous les scénarios

h. Indicateur de QAI

J'ai effectué mes analyses sur une durée de deux semaines, du 21 juin minuit au 6 juillet minuit. Le 21 juin est un vendredi puisque j'ai arbitrairement décidé de faire commencer l'année un lundi.

i. Concentration de CO₂

J'ai d'abord comparé les pièces avec et sans fenêtres. La présence de fenêtres permet un meilleur renouvellement de l'air. Néanmoins, la limite de 1000 ppm n'est jamais dépassée, sauf quelques rares pics dans la cuisine qui dépasse de moins de 50 ppm. Ces pics semblent correspondre à la présence dans la cuisine pour le repas du soir. Le pic est plus élevé que le midi car la préparation du repas est supposée plus longue. Le pic du petit déjeuner n'apparaît presque pas car, à ce moment-là, toutes les fenêtres sont ouvertes et de l'air arrive donc jusqu'à la cuisine en passant par le salon. On peut faire la même observation dans la salle de bain où, malgré une douche le matin et une le soir (deux occupants), le pic du matin est moins élevé que celui du soir, permettant de supposer là aussi une influence de la fenêtre ouverte dans la pièce à côté (chambre).

Je suis en revanche surprise du peu d'effet de présence de l'occupant de façon plus importante dans le salon pendant le week-end. Je m'attendais à des pics plus haut et surtout plus étalés, avec une montée lente correspondant à la présence de l'occupant dans la pièce fenêtres et volets fermés.

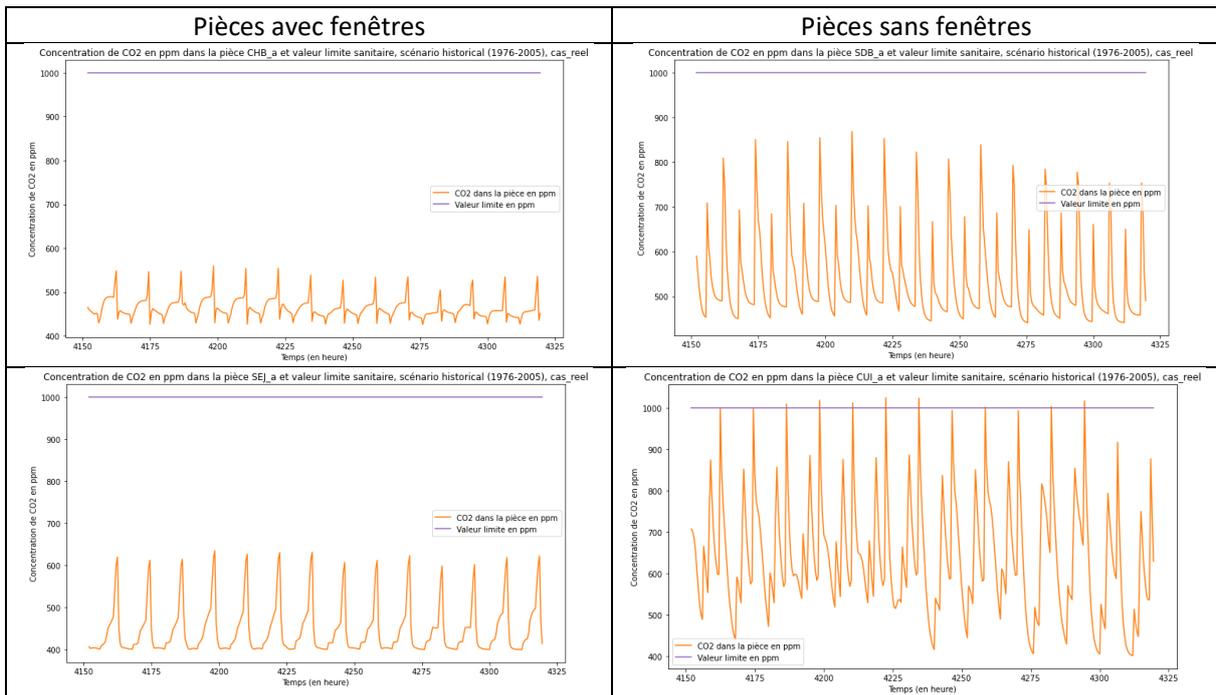


Figure 52 : Concentration de CO₂ dans les pièces, comparaison entre les pièces avec fenêtres et celles sans, scénario historique, cas réel

J'ai ensuite comparé les pièces avec fenêtres de l'étage du haut et de celui du bas. Je n'ai pas relevé de différence.

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

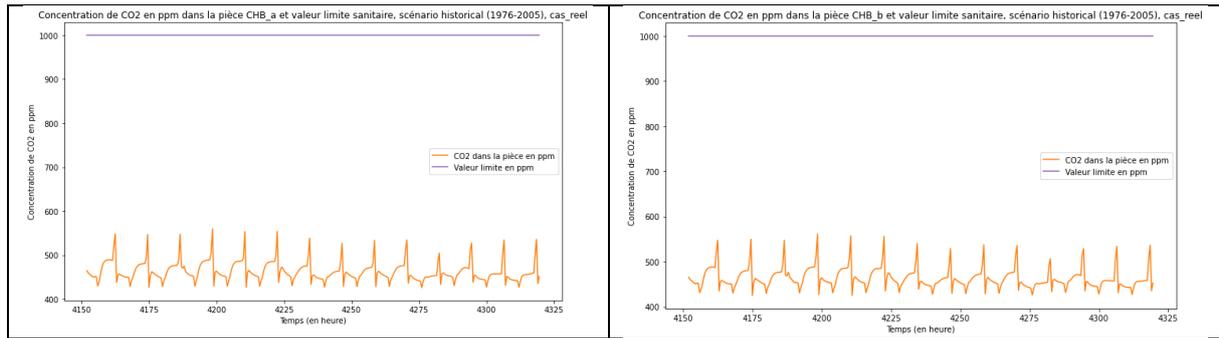


Figure 53 : Concentration de CO₂ dans les pièces, comparaison entre la chambre du haut et celle du bas, scénario historique, cas réel

Etant donné l'absence de modification modélisée du comportement des occupants ou des apports externes dans le futur, il n'y a pas de différence notable de concentration par rapport au scénario historique. Les quelques petites différences sont dues au vent du jour.

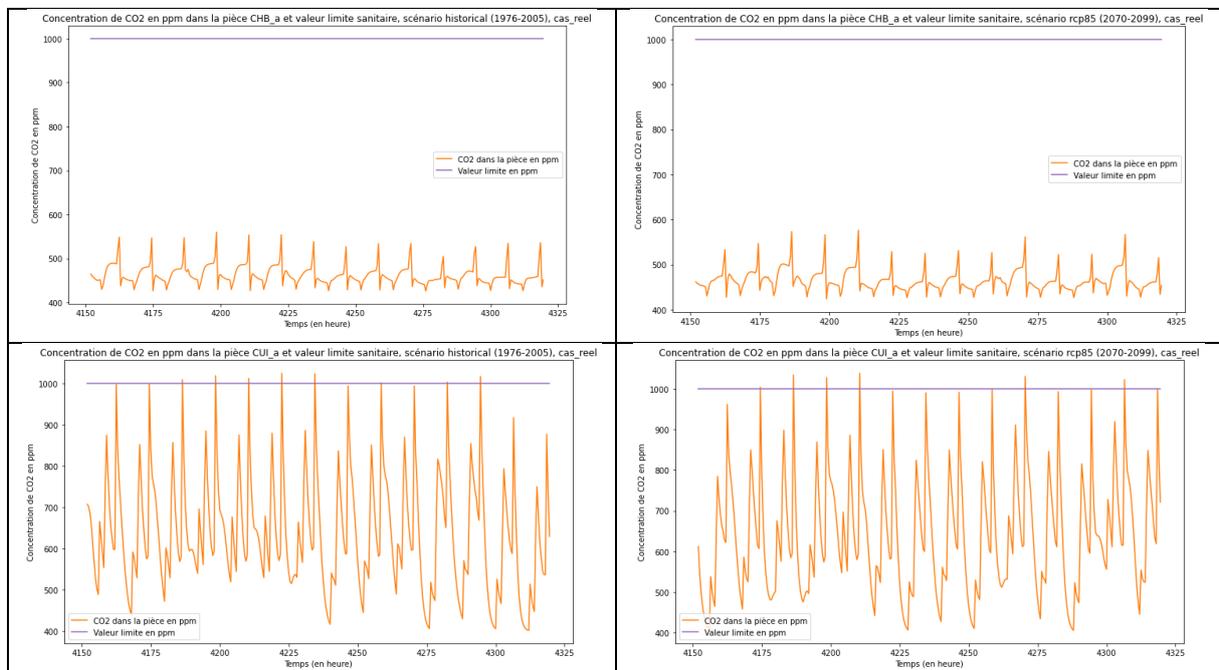


Figure 54 : Concentration de CO₂ dans la chambre et dans la cuisine du haut, comparaison entre le scénario historique et la projection RCP 8.5 pour la période 2070-2099, cas réel

J'ai également cherché à comparer les concentrations selon l'orientation du logement. En effet, l'orientation modifie les débits d'air entrants dans le logement. Toutefois, j'ai été surprise de noter une différence que très faible, d'une cinquantaine de ppm tout au plus.

Agnès Ferreira Lopes
**MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS**

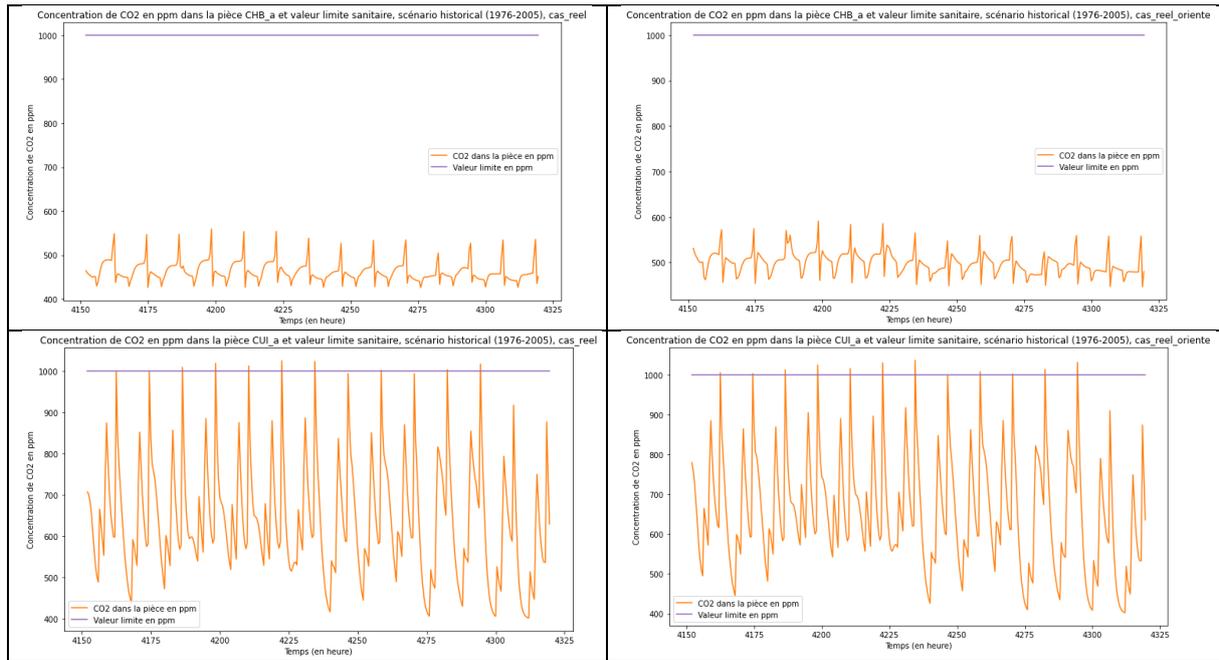


Figure 55 : Concentration de CO₂ dans la chambre et dans la cuisine du haut, scénario historique, comparaison entre le cas réel simple et celui orienté de +180°

Etant donné que ni les combles ni les deux isolations modélisées n’ont été prévues comme source de CO₂, je n’ai pas cherché à les étudier.

ii. Concentration de PM_{2.5}

J’ai d’abord regardé les deux pièces où les PM_{2.5} étaient produites, c’est-à-dire les deux cuisines. Je m’attendais à ce que la limite sanitaire soit régulièrement dépassé car l’absence de ventilation mécanique ainsi que le peu de ventilation naturelle dans le logement avait été souligné par l’étude thermique de 2015 [33]. Le dépassement est très élevé. Il est identique entre l’étage du haut et celui du bas.

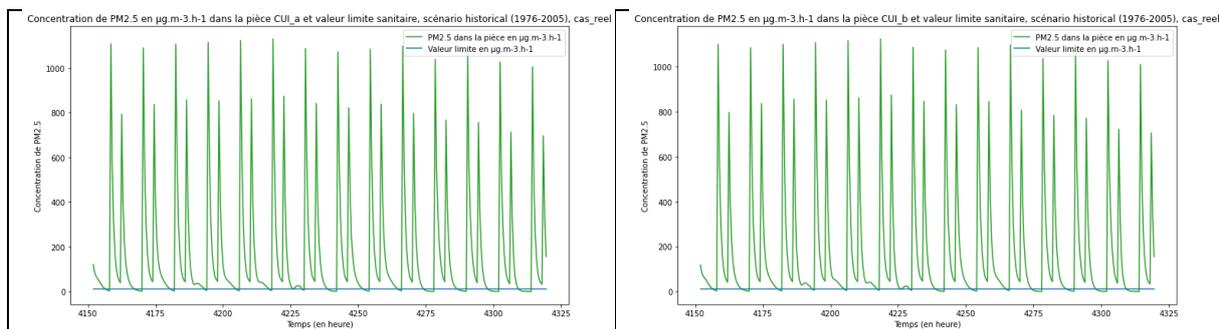


Figure 56 : Concentration de PM_{2.5} dans les pièces où celles-ci sont émises (cuisine), scénario historique, cas réel

Le constat est identique dans les pièces en lien direct avec la cuisine (entrée et séjour).

Agnès Ferreira Lopes
**MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS**

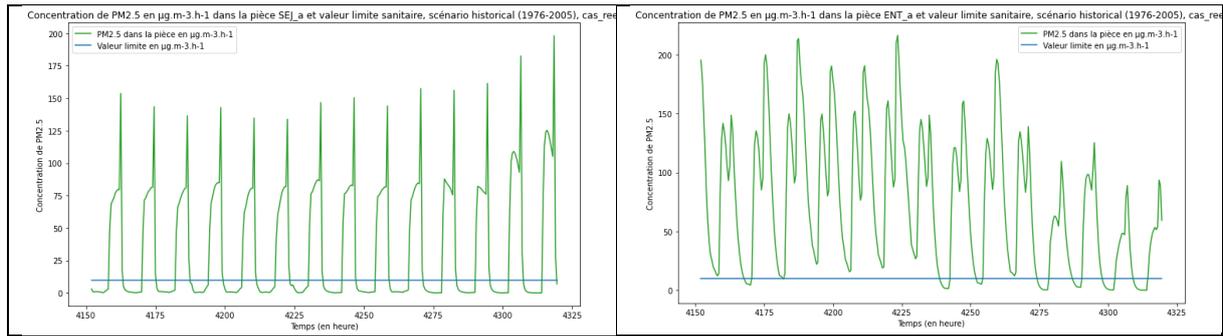


Figure 57 : Concentration de PM_{2.5} dans les pièces adjacentes à la pièce d’émission (entrée et séjour), scénario historique, cas réel

A l’inverse, la pièce la plus éloignée (salle de bain), malgré son confinement due à l’absence de fenêtre, a en moyenne une concentration inférieure à la valeur limite. Seuls 3 pics dépassent les 10 µg/(m³.h), de moins de 2 µg/(m³.h).

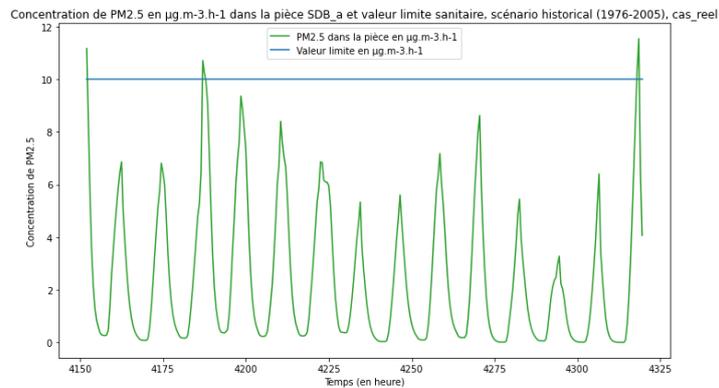


Figure 58 : Concentration de PM_{2.5} dans la pièce la plus éloignée de la pièce d’émission (salle de bain), scénario historique, cas réel

J’ai cherché à comprendre pourquoi la cuisine concentrait un tel taux de PM_{2.5}. La pièce ne possédait pas de fenêtres donnant sur l’extérieur mais avait des grilles de passage vers le séjour. J’ai regardé les débits entrants et sortants moyens de cette partie-là du logement.

Sur la capture d’écran de CONTAM (), on voit que les débits vont du séjour vers la cuisine. L’air, une fois dans cette pièce, n’a pas de possibilité de sortir. L’air sortant par le détalonnage de la porte de palier provient majoritairement de l’air circulant depuis le séjour. Il y a donc un stockage des PM_{2.5} dans la cuisine.

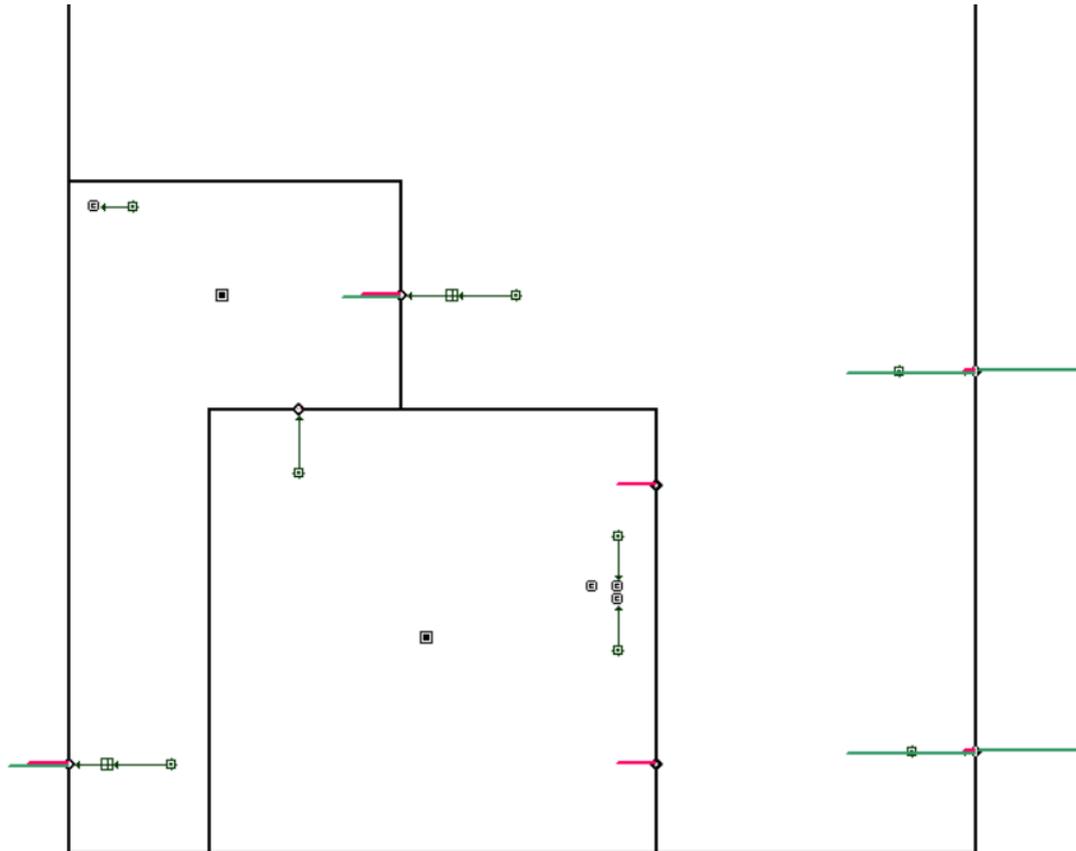


Figure 59 : Capture d'écran de CONTAM montrant le sens des débits d'air dans le séjour, l'entrée et la cuisine pour le cas réel

Afin de palier à ce problème sanitaire, on peut installer une bouche d'extraction mécanique ou alors un filtre local dans la cuisine.

Etant donné l'absence de modification modélisée du comportement des occupants ou des apports externes dans le futur, il n'y a pas de différence notable de concentration par rapport au scénario historique. Contrairement au CO₂, le vent du jour ne semble pas influencer sur la concentration dans la cuisine.

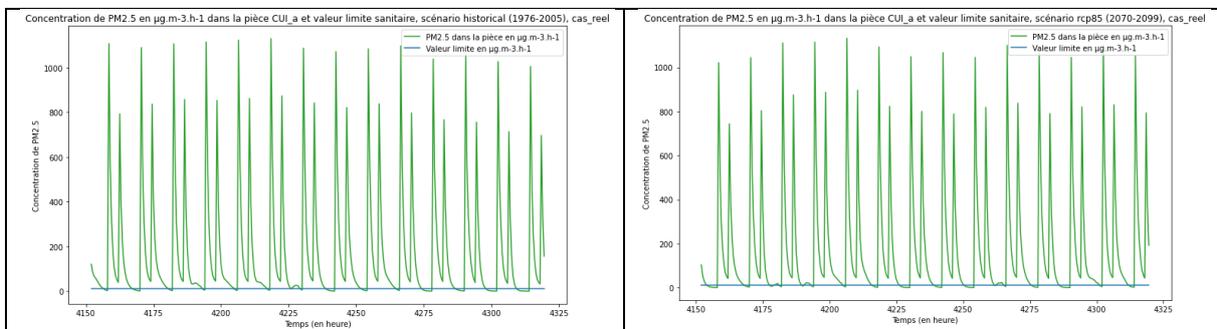


Figure 60 : Concentration de PM_{2.5} dans la cuisine, comparaison entre le scénario historique et la projection RCP 8.5 pour la période 2070-2099, cas réel

J'ai également cherché à comparer les concentrations selon l'orientation du logement, comme pour le CO₂. Plus encore que pour ce dernier, l'orientation n'influe que peu, voire pas, sur les concentrations de PM_{2.5}. Ceci est sûrement dû à la production des PM_{2.5} dans une pièce non ventilée directement depuis l'extérieur.

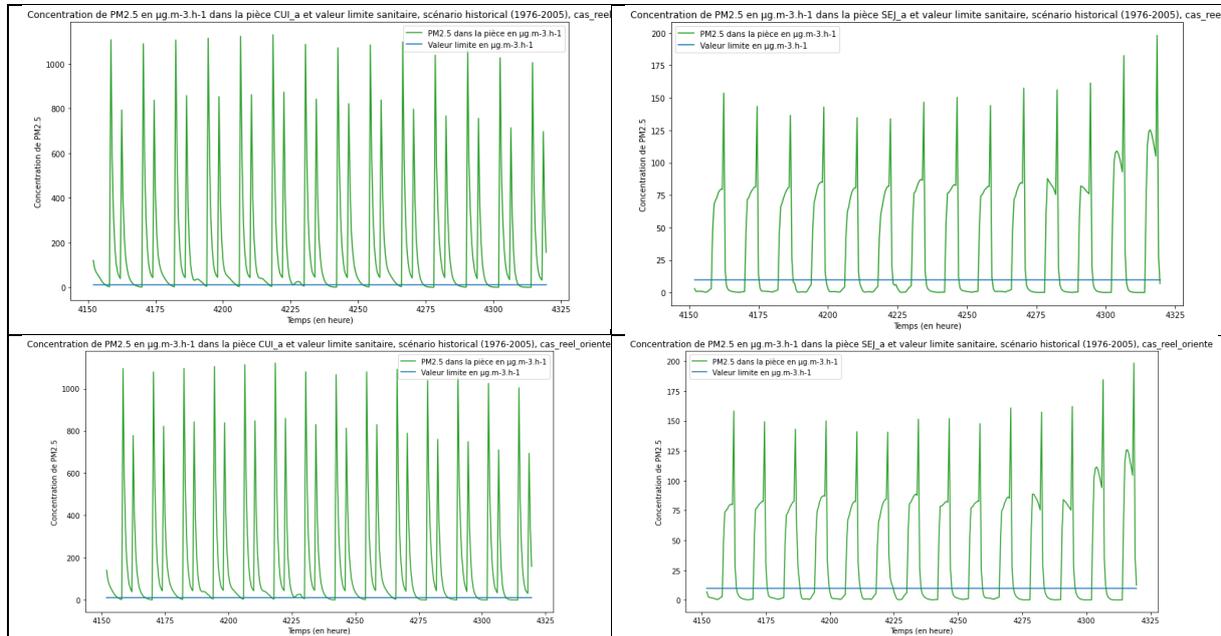


Figure 61 : Concentration de PM_{2.5} dans la cuisine et le séjour, scénario historique, comparaison entre le cas réel simple et celui orienté de +180°

Comme pour le CO₂, étant donné que ni les combles ni les deux isolations modélisées n'ont été prévues comme source de PM_{2.5}, je n'ai pas cherché à les étudier.

IV. Discussion et propositions d'amélioration

Tout d'abord, certains éléments n'ont pas pu être entièrement aboutis, et quelques incohérences ont été relevées. Notamment, le pire cas présentait des valeurs de température anormalement élevées. Après plusieurs vérifications des données saisies, je n'ai pas pu expliquer cette différence significative par rapport aux autres scénarios, rendant ce cas particulièrement incertain.

Concernant le renouvellement d'air, j'ai relevé le débit d'air global dans le logement, mais je réalise qu'il aurait été pertinent de l'analyser pièce par pièce. Cela aurait pu fournir des informations plus précises, notamment pour la cuisine, qui présente une concentration élevée de polluants et des niveaux d'humidité souvent hors de la plage de confort de 25%-60%. Les données chiffrées auraient été plus précises que celles fournies par le schéma COMTAM.

En ce qui concerne les concentrations de polluants, j'avais initialement prévu une déposition-resuspension des particules uniquement dans la cuisine, leur pièce d'émission. Cependant, il aurait été plus réaliste de considérer ce phénomène dans l'ensemble des pièces, car les particules peuvent se déplacer. De plus, il aurait été intéressant, si le temps l'avait permis, de comparer les concentrations de polluants en fonction de la présence ou non des occupants, afin de voir si celles-ci diminuent rapidement après leur départ.

Certains aspects pourraient également être améliorés pour mieux représenter les conditions réelles. J'ai utilisé le logiciel de simulation TRNSYS pour sa facilité de couplage avec CONTAM, mais ce logiciel ne prend pas en compte l'humidité dans les parois et son impact sur le confort thermique, contrairement à EnergyPlus, sur lequel je prévois de travailler durant ma thèse.

De plus, je n'ai pas intégré la perméabilité entre les deux logements superposés, un phénomène courant dans les bâtiments anciens. Cela a été mentionné dans l'étude thermique initiale [33]. Les autres logements du même palier et la cage d'escalier n'ont également pas été modélisés, alors que la Figure 22 montre que l'air entrant provient partiellement des fenêtres de la cage d'escalier.

Le logement étudié, comme beaucoup d'immeubles anciens, possède des cheminées, souvent comblées. Étudier leur impact sur le confort thermique et les effets de tirage résiduel serait un sujet de recherche à part entière.

Enfin, certains paramètres auraient pu être explorés plus en détail. Par exemple, il aurait été intéressant d'examiner l'impact des protections solaires, en faisant varier leur type (opacité et degré de fermeture) ainsi que le pourcentage d'ouverture des fenêtres. En ce qui concerne les variantes étudiées, j'ai choisi de combiner la variante 1 avec les trois autres (2-3-4), mais je n'ai pas testé de combinaisons telles que la 2 avec la 3 et la 4, pour voir si l'orientation influençait le choix du type d'isolation.

Pour l'isolation, j'ai opté pour le chanvre, un matériau étudié lors de mon master de recherche à l'université Lyon I effectué en parallèle de ma 3^{ème} année à l'ENTPE. Il aurait été pertinent de comparer cette option à d'autres matériaux plus courants, comme la laine de roche ou le polyester, afin de mettre en lumière les avantages et inconvénients d'une isolation non perspirante. Enfin, il serait intéressant de comparer ce logement non traversant avec un logement traversant similaire.

V. Conclusion

Le bâti ancien, constructions datant d'avant 1948, représente une part importante du parc résidentiel français et est un élément clef dans l'adaptation au changement climatique. L'immeuble collectif urbain ancien est confronté à des défis de confort thermique estival ainsi qu'à de problématiques de qualité d'air intérieur, exacerbés par le microclimat local. Les solutions de rafraîchissement passives se retrouvent parfois confrontées aux problèmes de la ville. Bien que les matériaux traditionnels comme la pierre et la brique offrent une bonne inertie thermique, les rénovations visant l'efficacité énergétique hivernale peuvent compromettre le confort d'été.

Les centres-villes comme celui de Lyon illustrent la complexité de concilier la préservation du patrimoine et son adaptation au changement climatique. Cette situation montre la nécessité d'une meilleure compréhension des performances thermiques du bâti ancien, en particulier face aux vagues de chaleur. Le manque de connaissances sur les caractéristiques thermiques du bâti ancien lyonnais, montre l'importance d'une modélisation efficace des performances thermiques et aérauliques, ainsi que leurs interactions, dans un contexte de changement climatique.

Dans la modélisation d'un logement vis-à-vis du confort d'été, le couplage thermo-aéraulique est essentielle. L'inter-influence des deux composantes est significative sur le confort intérieur. Il est également essentiel de prendre en compte les gains de chaleur dus à la présence des occupants, des appareils électriques et de l'éclairage. De la même manière, l'humidité générée par des activités domestiques comme la cuisine ou la lessive, ou bien les douches se doit d'être considérée.

Pour garder la fraîcheur, notamment la nuit, l'isolation extérieure est préférable à celle intérieure. Toutefois, l'isolation intérieure, en chanvre, permet de rester un peu mieux dans la plage 25%-60% d'humidité relative dans les pièces qui sont le plus sujettes à sortir de cette plage. Pour les deux types d'isolation, il est préférable de suppléer le système de ventilation déjà existant par une extraction mécanique afin de gérer l'humidité. Par ailleurs, la présence de combles perdus contribue également à protéger le dernier étage de l'exposition directe au soleil, surtout si le toit n'est pas isolé. Dans les appartements non traversants comme celui de cette étude, la ventilation naturelle est limitée, compliquant le rafraîchissement, tandis que les pièces sans fenêtre, bien que moins exposées au soleil, peine à évacuer les polluants et l'humidité.

Par ailleurs, l'absence de fenêtre dans la cuisine permettant une ventilation de la pièce lors des émissions de $PM_{2.5}$, et plus encore d'une extraction mécanique (l'ouverture des fenêtres est à proscrire en période de fortes chaleurs) empêche une bonne évacuation des $PM_{2.5}$. Une solution d'assainissement de l'air lorsque l'installation d'une bouche d'extraction n'est pas possible est l'installation d'un filtre local de $PM_{2.5}$ dans la pièce émettrice (cuisine).

Dans l'ensemble, l'adaptation aux nouvelles conditions d'habitation dues au changement climatique va être difficile, surtout si les conditions futures se rapprochent de celles établies par la projection RCP 8.5. L'isolation demeure utile, particulièrement sous les toits, plus fortement exposés.

Il serait intéressant d'étudier d'autres solutions de maintien des conditions de confort, comme l'installation de brasseur d'air, mais aussi d'étudier d'autres logements, agencés différemment, construits dans une

autre zone climatique ou à une autre époque. En effet, les constructions regroupées sous le terme bâti résidentiel urbain ancien sont nombreuses et très diversifiées.

VI. Remerciements

Je remercie le Cerema Centre Est de L'Isle d'Abeau de m'avoir accueillie dans leurs locaux.

Je remercie mon tuteur TFE, Bassam Moujalled, chercheur, pour son encadrement durant ce stage.

Je remercie le président du jury et mon tuteur école, Emmanuel Gourdon, de présider ma soutenance.

Je remercie mon experte, Héroïse Marie, du bureau d'études TRIBU, d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie Jean-Paul Harrouz, post-doctorant, pour son expertise et son aide sur Contam.

Je remercie Antoine Volland, ingénieur, et Edgar Ledoux, stagiaire, pour leur aide dans la rédaction de certains de mes scripts Python.

VII. Table des figures

Figure 1 : Infographie de synthèse du contexte des bâtiments résidentiels urbains face au réchauffement climatique	8
Figure 2 : Périodes principales de construction [10]	11
Figure 3 : Typologie d'îlots [15]	12
Figure 4 : Influence de la période de construction sur la concentration en formaldéhyde dans les logements. Valeur repère de 30 µg/m-3 : : valeur maximale proposée par le projet européen INDEX (LaSIE, 2021) [20]	17
Figure 5 : Nombre de logements par type et période à partir des données INSEE [15].....	19
Figure 6 : Principaux types architecturaux du bâti ancien et période d'apparition, répertoriés par P. Graulière [15]	19
Figure 7 : Catégories des modes constructifs relevés dans le bâti ancien [15].....	22
Figure 8 : Matrice regroupant les différentes catégories afin d'établir une typologie [15].....	23
Figure 9 : Regroupement des informations typologiques du projet CREATIV, extrait concernant le bâti ancien [20]	24
Figure 10 : Secteur Unesco et zone tampon [27]	29
Figure 11 : Carte des entités urbaines cohérentes et sous-secteurs [27]	30
Figure 12 : Croquis représentatifs du secteur de la colline de Fourvière [27]	31
Figure 13 : Croquis représentatifs du secteur de Saint-Just et Saint-Irénée [27].....	31
Figure 14 : Croquis représentatifs du secteur Renaissance Vieux-Lyon [27].....	31
Figure 15 : Croquis représentatifs du secteur Presqu'île Nord [27].....	32
Figure 16 : Croquis représentatifs du secteur Ainay [27].....	32
Figure 17 : Croquis représentatifs du secteur des Pentès [27]	33
Figure 18 : Croquis représentatifs du secteur des Chartreux [27].....	33
Figure 19 : Tableau récapitulatif des typologies de bâtiments du quartier de la Croix-Rousse	36
Figure 20 : Image satellite du 8 rue Général de Sève (Google Map).....	38
Figure 21 : Orientation du bâtiment par rapport aux axes cardinaux [27]	38
Figure 22 : PPlan type d'un étage [27]	39
Figure 23 : Schéma en coupe du 8 rue Général de Sève mettant en avant ses caractéristiques [27], les 2 logements modélisés cerclés de rouge	40
Figure 24 : Caractéristiques étudiées des parois et leur unité [33]	41
Figure 25 : Composition des murs extérieurs [33].....	41
Figure 26 : Mur de façade avec pierre de Couzon apparente à l'intérieur d'un logement [33]	42
Figure 27 : Composition du plancher bois [33]	42
Figure 28 : Composition des planchers intermédiaires [33].....	42
Figure 29 : Répartition des menuiseries et vitrage, production personnelle à partir des données du rapport d'audit énergétique [33]	43
Figure 30 : Répartition chiffrée des différents systèmes de protection solaire [33]	43
Figure 31 : Répartition sur la façade des différentes protections solaires [33]	44
Figure 32 : Tableau récapitulatif des variantes étudiées	46

Figure 33 : Methodologie pour construire les fichiers météorologiques représentant le futur climat d'un quartier urbain et intégration d'évènements extrêmes (vague de chaleur) [36]	47
Figure 34 : Tableau récapitulatif des informations nécessaires au lancement du module UWG	48
Figure 35 : Carte QGIS du cercle d'influence autour du 8 rue du général de Sève.....	48
Figure 36 : Détail de plan montrant le logement Ouest de la façade Nord-Ouest [33]	50
Figure 37 : Elément de schéma montrant la combinaison scénarios - modèles utilisés [36].....	52
Figure 38 : Diagramme boîte à moustaches (boxplot) des températures extérieures et du séjour haut pour les scénarios historiques et rcp85 2070-2099 selon les différents fichiers météo.....	53
Figure 39 : Différence de températures entre TAIR issue de TRNSYS et T issue de CONTAM en fonction du temps pour 4 pièces (les 2 chambres et séjours)	54
Figure 40 : Boxplot de la température de l'air et de la température opérative dans chaque pièce pour chaque scénario et pour le cas principal.....	55
Figure 41 : Boxplot de la température par pièce pour le scénario historique, comparaison du cas réel et du pire cas.....	56
Figure 42 : Boxplot de la température par pièce pour le scénario rcp85 de 2070-2099, comparaison du cas réel et du pire cas.....	56
Figure 43 : Boxplot de la température par pièce pour le scénario historique et les deux projections rcp85 (2035-2064 et 2070-2099).....	57
Figure 44: Boxplot de la température par pièce pour les projections rcp45 et rcp85 pour les deux périodes futures (2035-2064 et 2070-2099).....	58
Figure 45 : Boxplot de la température dans les 4 pièces les plus exposées selon le cas considéré, scénario historique	59
Figure 46 : Boxplot de la température dans les 4 pièces les plus exposées selon le cas considéré, scénario rcp85 pour la période 2070-2099	60
Figure 47 : Débit d'air total entrant dans les logements, comparatif entre le pire cas et le pire cas orienté, scénario historique.....	60
Figure 48 : Histogramme des indicateurs thermiques pour les 2 chambres, scénario historique (1976-2005)	61
Figure 49 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la cuisine et la salle de bain, scénario historique (1976-2005).....	62
Figure 50 : Histogramme des indicateurs thermiques pour le séjour pour tous les scénarios.....	63
Figure 51 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la chambre pour tous les scénarios	64
Figure 52 : Concentration de CO ₂ dans les pièces, comparaison entre les pièces avec fenêtres et celles sans, scénario historique, cas réel	65
Figure 53 : Concentration de CO ₂ dans les pièces, comparaison entre la chambre du haut et celle du bas, scénario historique, cas réel	66
Figure 54 : Concentration de CO ₂ dans la chambre et dans la cuisine du haut, comparaison entre le scénario historique et la projection RCP 8.5 pour la période 2070-2099, cas réel.....	66
Figure 55 : Concentration de CO ₂ dans la chambre et dans la cuisine du haut, scénario historique, comparaison entre le cas réel simple et celui orienté de +180°	67
Figure 56 : Concentration de PM _{2.5} dans les pièces où celles-ci sont émises (cuisine), scénario historique, cas réel	67

Figure 57 : Concentration de PM _{2.5} dans les pièces adjacentes à la pièce d'émission (entrée et séjour), scénario historique, cas réel	68
Figure 58 : Concentration de PM _{2.5} dans la pièce la plus éloignée de la pièce d'émission (salle de bain), scénario historique, cas réel	68
Figure 59 : Capture d'écran de CONTAM montrant le sens des débits d'air dans le séjour, l'entrée et la cuisine pour le cas réel.....	69
Figure 60 : Concentration de PM _{2.5} dans la cuisine, comparaison entre le scénario historique et la projection RCP 8.5 pour la période 2070-2099, cas réel.....	69
Figure 61 : Concentration de PM _{2.5} dans la cuisine et le séjour, scénario historique, comparaison entre le cas réel simple et celui orienté de +180°	70
Figure 62 : Fiche des caractéristique de la pierre calcaire issue de Couzon aux Monts d'Or (BDLisa).....	82
Figure 63 : Immeuble collectif d'avant 1915, fiche TABULA [26]	83
Figure 64 : Immeuble typique du Vieux-Lyon et de Saint-Just, tissu médiéval de la ville [27]	84
Figure 65 : Immeuble typique du Vieux-Lyon, de la Presqu'île, d'Ainay, tissu XVIIIe de la ville [27].....	85
Figure 66 : Immeuble de rapport typique de la Presqu'île et d'Ainay, tissu XIXe de la ville [27].....	86
Figure 67 : Immeuble-atelier canut typique de la Croix-Rousse (haut des Pentes + Plateau), tissu XIXe de la ville [27].....	87
Figure 68 : Immeuble art déco typique des Chartreux et de la Presqu'île, tissu XXe de la ville [27].....	88
Figure 69 : Tableaux recensant les informations nécessaires à l'élaboration des scénarios d'occupation .	94
Figure 70 : Tableaux des scénarios d'occupation pour un jour de semaine.....	96
Figure 71 : Tableaux des scénarios d'occupation pour un jour de weekend.....	97
Figure 72 : Tableaux des scénarios d'occupation pour un jour de vacances (absence)	97
Figure 73 : Capture d'écran de l'interface de Simulation Studio pour le cas réel et grossissement du type 14 utilisé pour l'occupation humaine des cuisines	98
Figure 74 : Rendu sur CONTAM de l'étage n°4 de l'immeuble étudié dans le cas réel	99
Figure 75 : Capture d'écran des 2 appartements et des combles après le passage sur CONTAM (orientation du toit non effectuée), cas réel	100
Figure 76 : Capture d'écran des 2 appartements, pire cas.....	100
Figure 77 : Infographie des scénarios pour l'évaluation des performances de ventilation dans des bâtiments résidentiels [18].....	101
Figure 78 : Compositions des parois associées à chaque scénario de rénovation étudié [34], la proposition étudiée pour ce présent rapport est entourée en rouge.....	102
Figure 79 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la cuisine et la salle de bain, scénario historique (1976-2005), grossissement.....	105
Figure 80 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la chambre du bas, scénario historique (1976-2005), grossissement.....	106
Figure 81 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la chambre pour tous les scénarios, grossissement.....	107
Figure 82 : Histogramme des indicateurs thermiques pour le séjour pour tous les scénarios, grossissement	109
Figure 83 : Concentration de CO ₂ dans les pièces, comparaison entre les pièces avec fenêtres et celles sans, scénario historique, cas réel, grossissement	111

Figure 84 : Concentration de CO2 dans les pièces, chambre du bas, scénario historique, cas réel, grossissement.....	111
Figure 85 : Concentration de CO2 dans la chambre et dans la cuisine du haut, projection RCP 8.5 pour la période 2070-2099, cas réel, grossissement	112
Figure 86 : Concentration de CO2 dans la chambre et dans la cuisine du haut, scénario historique, cas réel orienté de +180°, grossissement	112
Figure 87 : Concentration de PM2.5 dans les pièces où celles-ci sont émises (cuisine), scénario historique, cas réel, grossissement	113
Figure 88 : Concentration de PM2.5 dans les pièces adjacentes à la pièce d'émission (entrée et séjour), scénario historique, cas réel, grossissement	114
Figure 89 : Concentration de PM2.5 dans la pièce la plus éloignée de la pièce d'émission (salle de bain), scénario historique, cas réel, grossissement	114
Figure 90 : Concentration de PM2.5 dans la cuisine, projection RCP 8.5 pour la période 2070-2099, cas réel, grossissement	115
Figure 91 : Concentration de PM _{2,5} dans la cuisine et le séjour, scénario historique, cas réel orienté de +180°, grossissement.....	115

VIII. Bibliographie

- [1] Météo France, « Bilan climatique de l'année 2022 », janv. 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://meteofrance.fr/actualite/publications/2022-les-bilans-climatiques>
- [2] S. Attia *et al.*, « Resilient cooling of buildings to protect against heat waves and power outages: Key concepts and definition », *Energy Build.*, vol. 239, p. 110869, mai 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110869.
- [3] C. Y. Siu *et al.*, « Evaluating thermal resilience of building designs using building performance simulation – A review of existing practices », *Build. Environ.*, vol. 234, p. 110124, avr. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110124.
- [4] World Meteorological Organization, « WMO AIR QUALITY AND CLIMATE BULLETIN, n°2, september 2022 », sept. 2022.
- [5] ADEME et CODA STRATEGIES, « La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires, état des lieux 2020 - Synthèse », 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/4745-la-climatisation-de-confort-dans-les-batiments-residentiels-et-tertiaires.html?search_query=climatisation&results=46
- [6] N. Lauzet *et al.*, « How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 116, p. 109390, déc. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109390.
- [7] H. Vanwynsberghe, A. Sengupta, et H. Breesch, « Evaluating thermal resilience to overheating in a Belgian apartment in shock scenarios ».
- [8] C. Favre, « Etude thermo-aéraulique du potentiel de rafraîchissement naturel des galeries sur cour d'un bâtiment Renaissance du Vieux-Lyon », ENTPE, TFE, 2022.
- [9] Ville de Lyon, « Etude, recherche et développement pour la transition écologique et l'amélioration du confort d'été et d'hiver de l'immeuble lyonnais dans les Sites Patrimoniaux Remarquables. Cahier des charges de la mission. » juin 2023.
- [10] R. Cantin, J. Burgholzer, G. Guarracino, B. Moujalled, S. Tamelikecht, et B. G. Royet, « Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France », *Build. Environ.*, vol. 45, n° 2, p. 473-484, févr. 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.07.010.
- [11] ATHEBA, « Fiches ATHEBA (14) ». décembre 2010.
- [12] L. Labat, « ANALYSE DE LA FIABILITE DU MOTEUR DE CALCUL THERMIQUE TH-CE-EX POUR LA MODELISATION DU BATI ANCIEN », ENTPE, TFE, 2013.
- [13] J.-L. Salagnac, « Adaptation du cadre bâti aux condtions climatiques actuelles et futures : le cas des canicules ».
- [14] A. Chevallier et A. Rodler, « CREATIV - Tâche 3.1 - Etat de l'art sur les typologies d'environnements relativement à la qualité de l'air et à l'ICU », Cerema, TRIBU, Université d'Angers, Université de Nantes.
- [15] L. Bourru et J. Burgholzer, « Modélisation du comportement thermique du bâti ancien (avant 1948) Tâche I : État de l'art du comportement thermique du bâti ancien ».
- [16] J. Birgogne, C. Blancot, et D. Alba, « Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris, Cahier #1 », Apur, déc. 2012.

- [17] O. Ramalho, J. Ribéron, W. Wei, et C. Mandin, « Caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments, Annexe 12 Rapport de convention de recherche et développement Anses-CSTB Impact de la pollution extérieure sur la qualité de l'air intérieur », ANSES / CSTB, CSTB/DSC/2017-105b, févr. 2018.
- [18] B. Poirier, G. Guyot, M. Woloszyn, H. Geoffroy, M. Ondarts, et E. Gonze, « Development of an assessment methodology for IAQ ventilation performance in residential buildings: An investigation of relevant performance indicators », *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 103140, nov. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103140.
- [19] A. Jan, « Les bâtiments résidentiels urbains face au changement climatique : étude du comportement thermique et analyse de sensibilité », ENTPE, TFE, 2018.
- [20] J. Damerval, « CREATIV - Tâche 2.1 - Etat de l'art sur les typologies de bâtiments en lien avec l'ICU et la QAI », Cerema, TRIBU, Université d'Angers, Université de Nantes.
- [21] « CREATIV - Tâche 2.2 - Elaboration d'une typologie de bâtiment au regard des enjeux traités », Cerema, TRIBU, Université d'Angers, Université de Nantes.
- [22] J. Barre, « Soierie lyonnaise et habitat. Typologie des immeubles de la Croix-Rousse vers 1830 », *Monde Alp. Rhodan. Rev. Régionale D'ethnologie*, vol. 19, n° 2, p. 39-52, 1991, doi: 10.3406/mar.1991.1451.
- [23] « Modélisation du comportement thermique du bâti ancien (avant 1948) Rapport de Synthèse », CETE de l'Est, CETE de l'Ouest, INSA Strasbourg, ENTPE.
- [24] S. Tasca-Guernouti, J. Bertron, J. Berger, L. Bourru, et F. Janvier, « Modélisation du comportement thermique du bâti ancien (avant 1948) Tâche 2 : Rapport final ».
- [25] A. Martínez-Molina, I. Tort-Ausina, S. Cho, et J.-L. Vivancos, « Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, p. 70-85, août 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.018.
- [26] U. ROCHARD, S. SHANTHIRABLAN, C. BREJON, et M. CHATEAU LE BRAS, *Bâtiments résidentiels ; Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France*. in projet EPISCOPE. 2015.
- [27] Métropole de Lyon, Ville de Lyon, et UDAP du Rhône, « Cadrage Unesco et zone tampon, PSMV Vieux Lyon, étude de cadrage préparatoire à la révision de PSMV et à l'évolution du SPR du Vieux Lyon, secteur Unesco, phase diagnostic et enjeux », 2023.
- [28] Ademe, « Avis d'expert - La rénovation performante des logements - Recommandations de l'ADEME pour répondre aux enjeux actuel », Ademe, mai 2024.
- [29] D. Espitalier, A. Ferreira Lopes, J. Lacroix--Tréal, P. Painvin, et R. Viennet, « Projet "Rencontre Evènement Visite" de Master 2, les défis de la rénovation et de la réhabilitation des constructions en terre crue », ENTPE, mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://moodle-entpe.fr>
- [30] D. Alex, « Recognition of a heritage in danger: rammed-earth architecture in Lyon city, France », 2018.
- [31] Direction Régionale des Affaires Culturelles AURA, « La restauration des façades en pierre de taille Fiche conseil n°10 Série patrimoine / Interventions sur le bâti ancien ».

- [32] N. Halitim-Dubois, « L'urbanisation du plateau de la Croix-Rousse 1815 – 1895 : les immeubles-ateliers, Les carnets de l'Inventaire : études sur le patrimoine – Région Auvergne-Rhône-Alpes », Hypothèses. [En ligne]. Disponible sur: <https://inventaire-rra.hypotheses.org/4523>
- [33] B. Defay, « COPROPRIETE « 8 rue du Général de Sève », Audit énergétique - Rapport complet », Thermi Fluide, 2015.
- [34] M. Ruiz, « Modélisation des transferts hygrothermiques à travers les parois dans un modèle de climat urbain : application aux centres-villes historiques à réhabiliter », INSA Toulouse, Toulouse, 2023.
- [35] Ville de Lyon, « Enduits Correcteurs Thermiques ». 2024.
- [36] M. Hostein, M. Musy, B. Moujalled, et M. El Mankibi, « Impact of climate change on indoor overheating in urban context during summer and heatwave periods: an energy-efficient dwelling case study », mai 2024.
- [37] « Generateur_Scenarii_RT2012 ».
- [38] *Performance énergétique des bâtiments - ventilation des bâtiments - Partie 1 : données d'entrées d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, l'ambiance thermique, l'éclairage et l'acoustique (Module M1-6, NF EN 16798-1, AFNOR).*
- [39] M. Hendel, K. Azos-Diaz, et B. Tremeac, « Behavioral adaptation to heat-related health risks in cities », *Energy Build.*, vol. 152, p. 823-829, oct. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.063.

IX. Annexes

1. Annexe 1 : Fiche BDLisa sur la pierre de Couzon

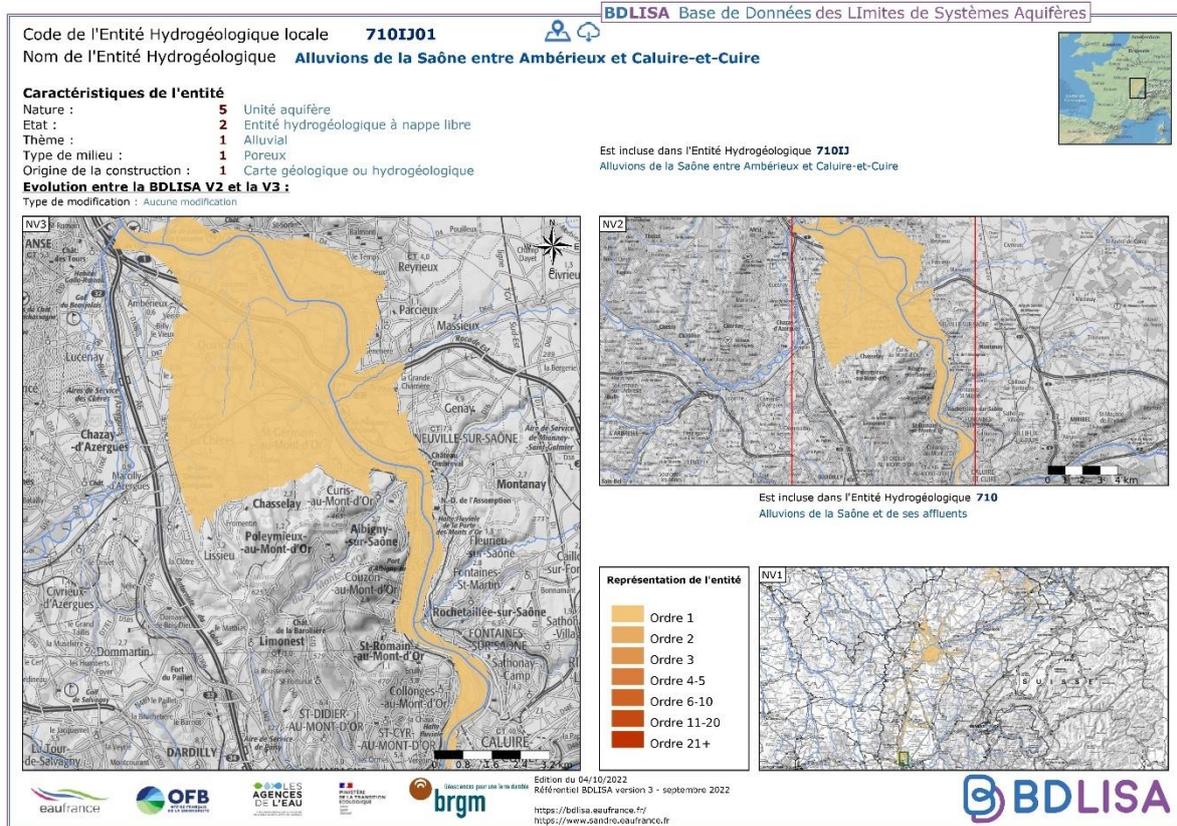


Figure 62 : Fiche des caractéristique de la pierre calcaire issue de Couzon aux Monts d'Or (BDLISA)

2. Annexe 2 : Fiches Tabula, exemple d'un immeuble collectif d'avant 1915

01 - AB

Immeuble collectif (<10 log.)

Avant 1915

FR.N.AB.01.Gen.ReEx.001

Typologie des bâtiments résidentiels en France



Description générale du type

Grand immeuble collectif, en zone urbaine, en général aligné sur rue avec mitoyenneté, type Haussmannien, faubourien, ouvrier. Construction massive (grande maçonrie) en pierre moellon ou pierre de taille, en brique ou en pan de bois, majoritairement sans revêtement extérieur. Taux de vitrage élevé. Menuiseries bois simple vitrage. Toiture mansardée. Sur cave. Sans isolation thermique.

Données statistiques pour ce type de logement en France

Nombre de logements en milliers : 609 Surface habitable en millions de m² : 35,9
 Part du parc existant : 2,1% Part du parc existant : 1,4%

Eléments de Bât	EPAI INITIAL		RENOVATION STANDARD		RENOVATION PERFORMANTE	
	Surface (m ²)	Coeff. U W/m ² K	Description	Coeff. U W/m ² K	Description	Coeff. U W/m ² K
Toiture / plancher haut	487	2,40	Tuile encastrée, rampants, sous zinc, 2 cm paille, bois solives bois avec remplissage	0,36	Isolation des rampants avec cm F&B	0,20
Facades	1 348	1,70	Pierre de taille, ventillé, 40 cm, enduit intérieur 2cm	0,37	Isolation 22 cm LMI sur plancher haut	0,10
	175	1,80	Mur appui de bois, remplissage torchis, 18 cm, enduit 2 côtés	0,37	Isolation 30 cm LMI sur plancher haut	0,23
Bases vitrées	365	4,80	Menuiserie bois avec SV	1,40	Menuiserie bois ou PVC avec DV TR Uge=1,1	1,00
	17	3,10	Pierre pleine bois ancienne	2,00	Remplacement par porte isolée Uge=2,0	1,90
Plancher bas	504	2,60	Plancher bas en solives en menuiseries	0,32	Isolation sous chape avec 7 cm PUR	0,23
	66	2,90	Plancher bas en solives en menuiseries avec grand ventilé 20 cm	0,32	Isolation sous chape avec 7 cm PUR	0,23
Chauffage		2,72	Electricité / Convecteur électrique M.C	1,26	Chauffage gaz à condensation 25/20 par radiateur individuel (55°C) isolé	1,32
Ventilation			Ventilation naturelle		VMC SF type B collective	
Eau chaude sanitaire		3,40	Chauffage électrique / Distributeur individuel, sans bouclage	1,10	FRCS individualisé par chauffe-eau individuel / Distribution individuel, sans bouclage	1,10
Production d'électricité sur site						

01 - AB

Immeuble collectif (<10 log.)

Avant 1915

FR.N.AB.01.Gen.ReEx.001

Typologie des bâtiments résidentiels en France



Description bâtiment exemple

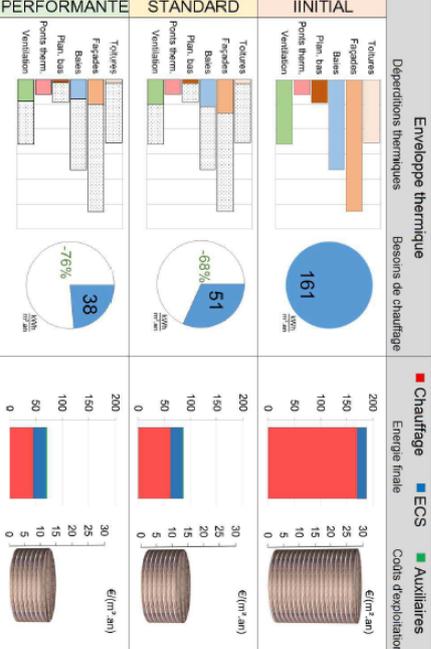
Immeuble collectif type Haussmannien du fin du 19ème siècle sur cave voûtée avec 26 logements sur 7 niveaux. Avec porche, sion mitoyen sur un pignon. Murs sur rue en pierre de taille apparentes. Murs sur cour en pan de bois avec enduit. Menuiseries bois simple vitrage. Chauffage avec convecteur électrique. Chauffe-eau électrique individuel.

BATIMENT EXEMPLE

Date de construction : Avant 1900
 Nombre de logements : 26 log
 Surface chauffée : 1713 m²
 Nombre de niveaux chauffés : 7
 Facteur de forme : 0,43
 Orientation façade principale : Ouest
 Mitoyenneté : Sur 1 côté
 Plancher bas sur : Cave

Eléments de Bât	EPAI INITIAL		RENOVATION STANDARD		RENOVATION PERFORMANTE	
	Surface (m ²)	Coeff. U W/m ² K	Description	Coeff. U W/m ² K	Description	Coeff. U W/m ² K
Toiture / plancher haut	487	2,40	Tuile encastrée, rampants, sous zinc, 2 cm paille, bois solives bois avec remplissage	0,36	Isolation des rampants avec cm F&B	0,20
Facades	1 348	1,70	Pierre de taille, ventillé, 40 cm, enduit intérieur 2cm	0,37	Isolation 22 cm LMI sur plancher haut	0,10
	175	1,80	Mur appui de bois, remplissage torchis, 18 cm, enduit 2 côtés	0,37	Isolation 30 cm LMI sur plancher haut	0,23
Bases vitrées	365	4,80	Menuiserie bois avec SV	1,40	Menuiserie bois ou PVC avec DV TR Uge=1,1	1,00
	17	3,10	Pierre pleine bois ancienne	2,00	Remplacement par porte isolée Uge=2,0	1,90
Plancher bas	504	2,60	Plancher bas en solives en menuiseries	0,32	Isolation sous chape avec 7 cm PUR	0,23
	66	2,90	Plancher bas en solives en menuiseries avec grand ventilé 20 cm	0,32	Isolation sous chape avec 7 cm PUR	0,23
Chauffage		2,72	Electricité / Convecteur électrique M.C	1,26	Chauffage gaz à condensation 25/20 par radiateur individuel (55°C) isolé	1,32
Ventilation			Ventilation naturelle		VMC SF type B collective	
Eau chaude sanitaire		3,40	Chauffage électrique / Distributeur individuel, sans bouclage	1,10	FRCS individualisé par chauffe-eau individuel / Distribution individuel, sans bouclage	1,10
Production d'électricité sur site						

PERFORMANTE STANDARD INITIAL



Enveloppe thermique

Besoins de chauffage

■ Chauffage ■ ECS ■ Auxiliaires

Energie finale Coûts décapitalisation

■ Chauffage ■ ECS ■ Auxiliaires

Energie finale Coûts décapitalisation

Eléments de Bât	EPAI INITIAL		RENOVATION STANDARD		RENOVATION PERFORMANTE	
	Surface (m ²)	Coeff. U W/m ² K	Description	Coeff. U W/m ² K	Description	Coeff. U W/m ² K
Chauffage		2,72	Electricité / Convecteur électrique M.C	1,26	Chauffage gaz à condensation 25/20 par radiateur individuel (55°C) isolé	1,32
Ventilation			Ventilation naturelle		VMC SF type B collective	
Eau chaude sanitaire		3,40	Chauffage électrique / Distributeur individuel, sans bouclage	1,10	FRCS individualisé par chauffe-eau individuel / Distribution individuel, sans bouclage	1,10
Production d'électricité sur site						

Figure 63 : Immeuble collectif d'avant 1915, fiche TABULA [26]

3. Annexe 3 : Typologie des bâtiments Lyonnais des secteurs Vieux-Lyon, Saint-Just, Presqu'île, Ainay, Croix-Rousse et Chartreux

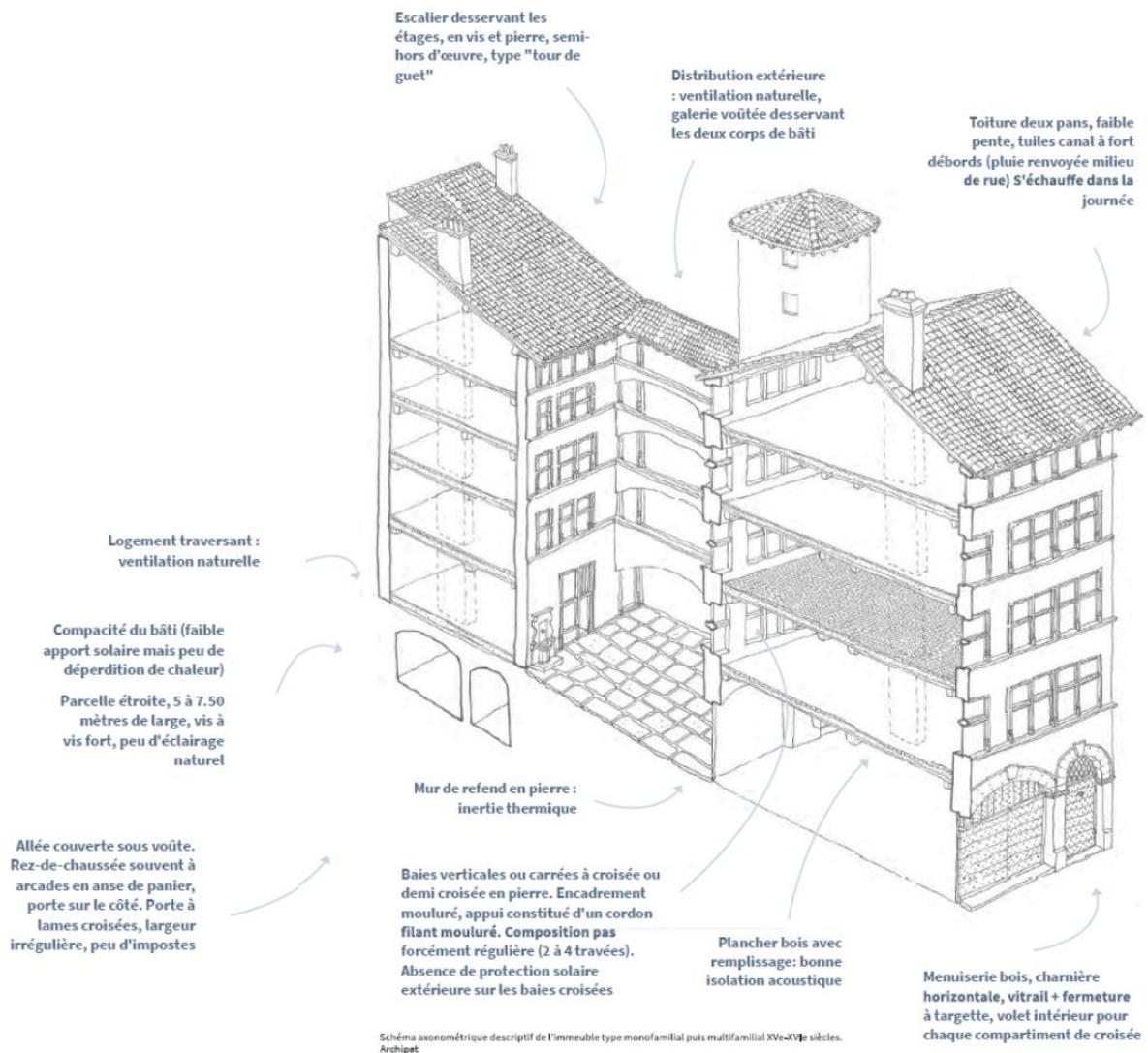


Figure 64 : Immeuble typique du Vieux-Lyon et de Saint-Just, tissu médiéval de la ville [27]

Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

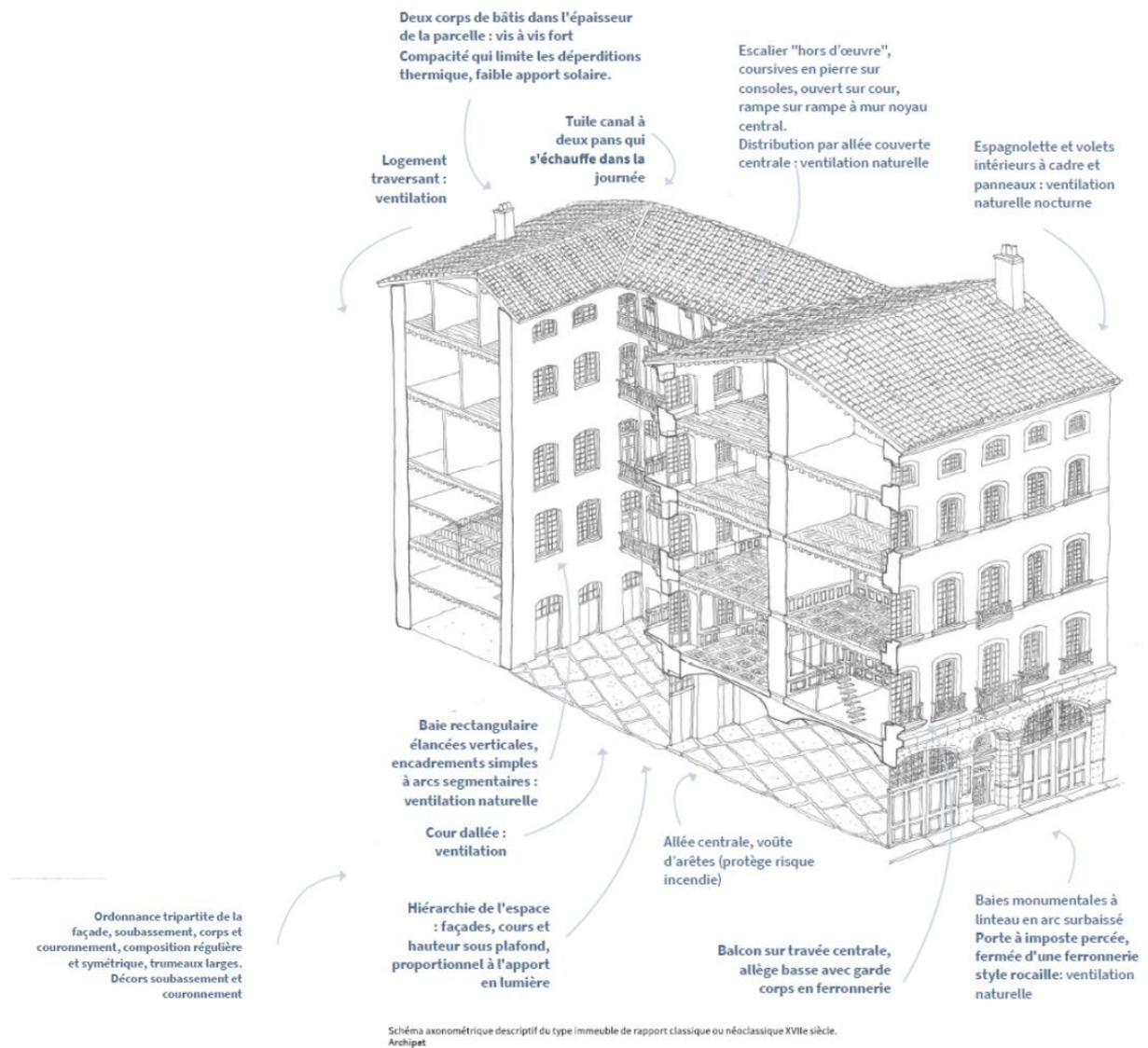


Figure 65 : Immeuble typique du Vieux-Lyon, de la Presqu'île, d'Ainay, tissu XVIIIe de la ville [27]

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

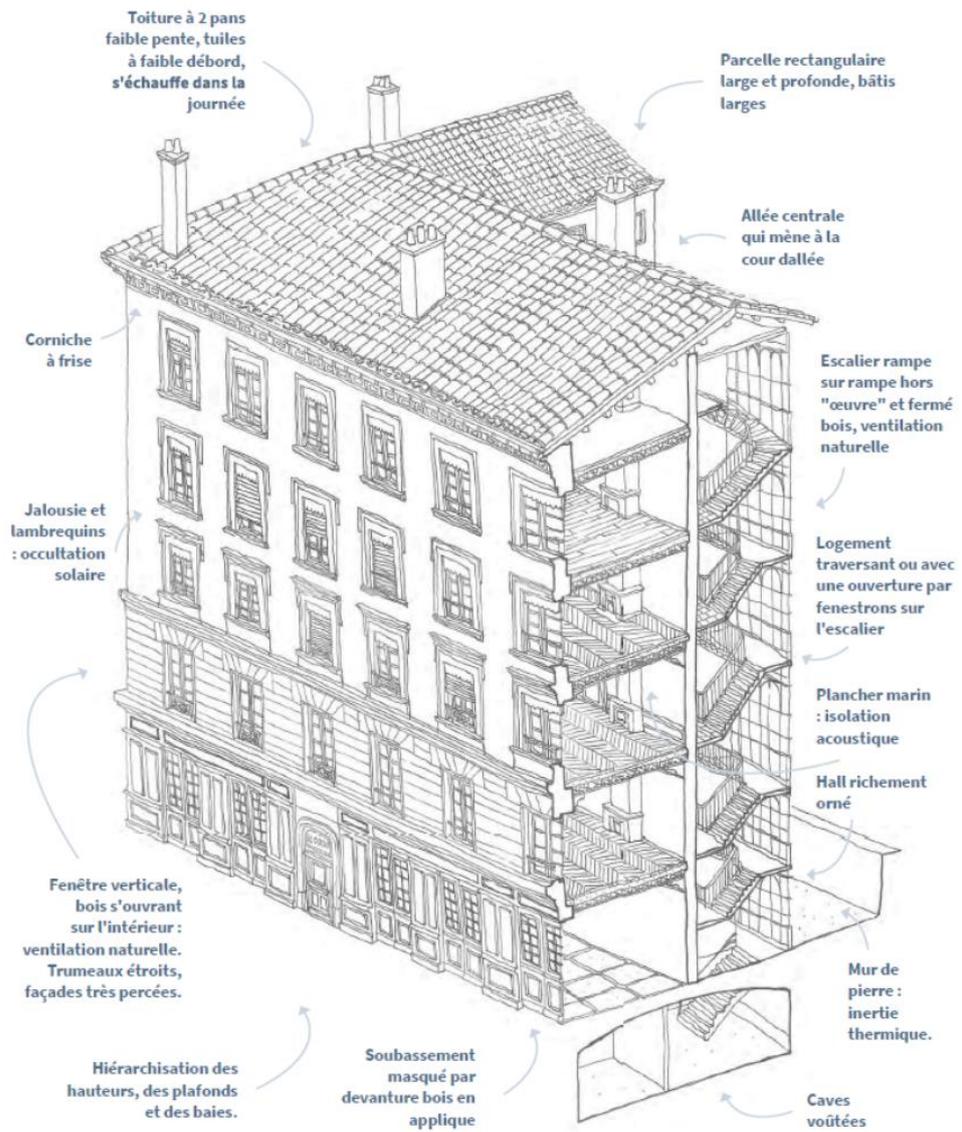


Figure 66 : Immeuble de rapport typique de la Presqu'île et d'Ainay, tissu XIXe de la ville [27]

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

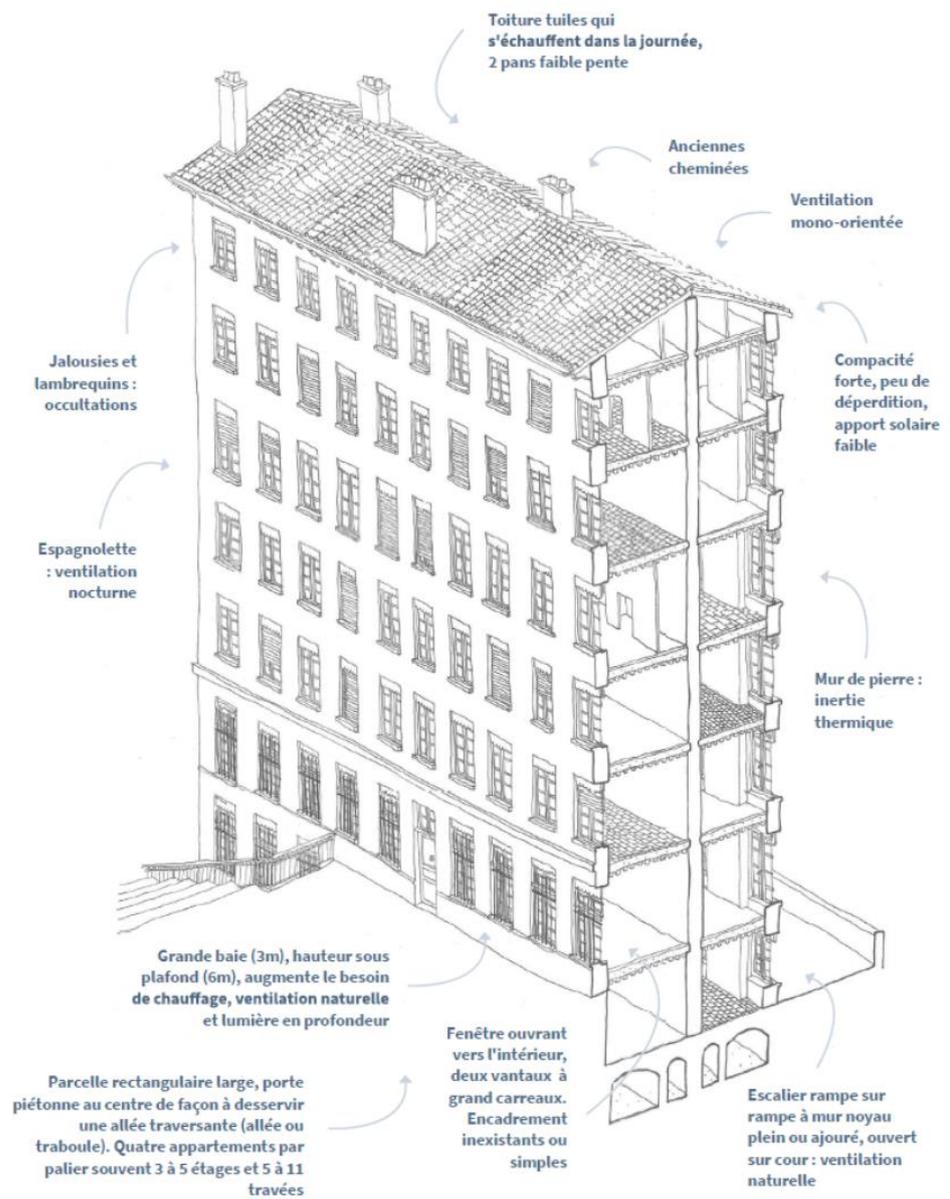


Figure 67 : Immeuble-atelier canut typique de la Croix-Rousse (haut des Pentes + Plateau), tissu XIXe de la ville [27]

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

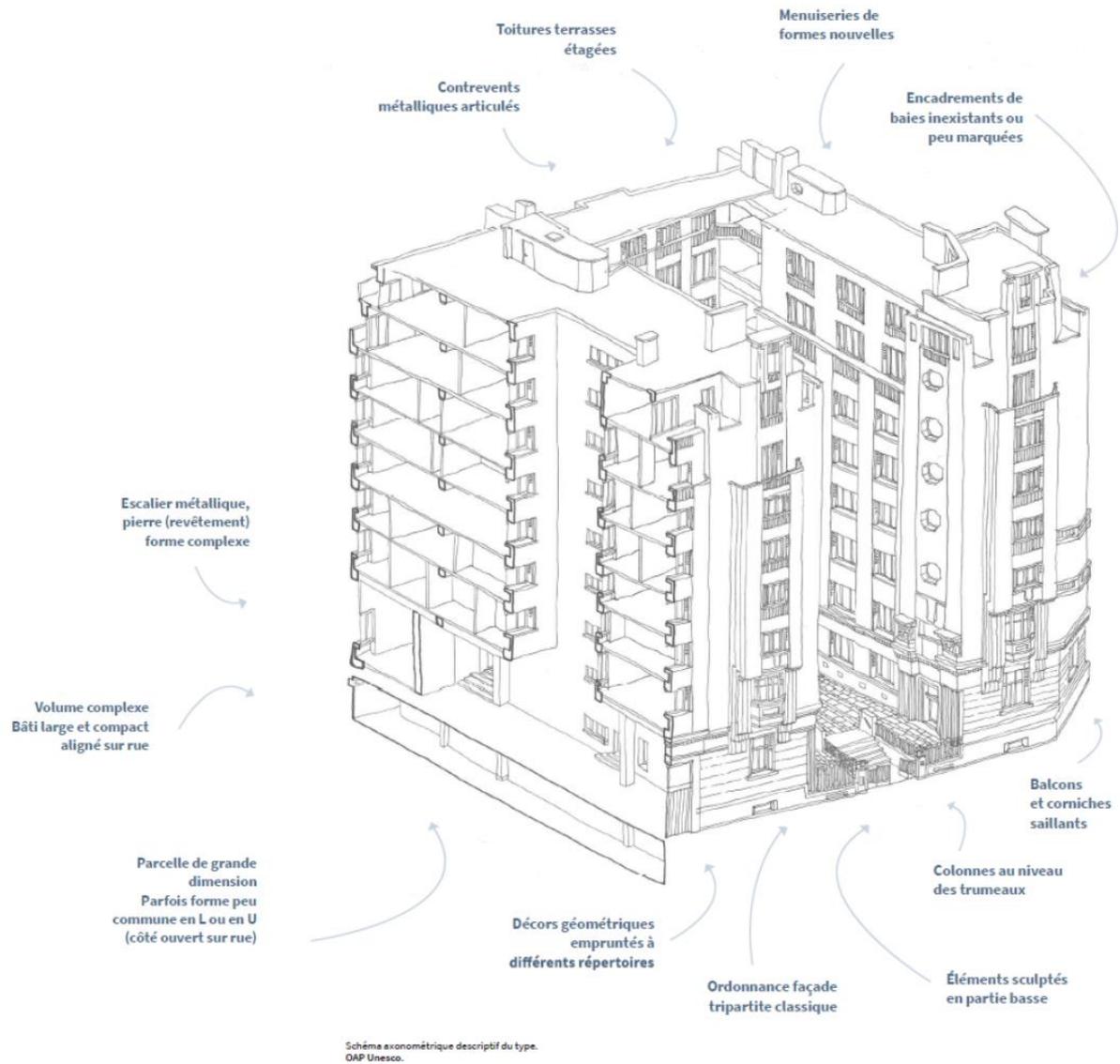


Figure 68 : Immeuble art déco typique des Chartreux et de la Presqu'île, tissu XXe de la ville [27]

4. Annexe 4 : Typologie des bâtiments de la Croix-Rousse par sous-secteur, explications détaillées

Même s'ils semblent être dotés d'une certaine unité, les immeubles de la Croix-Rousse peuvent se séparer en quatre immeubles types, correspondant aux différentes phases d'urbanisation de la colline. L'agencement intérieur des appartements (notamment le nombre de pièces), leur utilisation (locaux commerciaux, logements ou les deux simultanés), la catégorie socio-professionnelle des résidents et de l'activité dominante, généralement en rapport avec la soie permettent cette distinction [22].

b. Les immeubles à fonction commerciale prédominante du quartier des Capucins

Le quartier des Capucins est situé dans la partie inférieure des Pentes, proche des Terreaux et du quartier des affaires, sur l'emplacement de l'ex-clos de Capucins-Ursulines (2 hectares). Très vite, le quartier se spécialisera dans les activités d'organisation et de vente de la soie. La majorité des bâtiments ont été construits entre 1803 et 1830 [22].

Les constructions du quartier comptent en moyenne quatre étages avec des appartements de trois ou quatre pièces sur les deux premiers étages et des locaux à pièce unique sur les autres niveaux. Il y a une stratification selon la catégorie socio-professionnelle des chefs de ménage [22].

Les deux premiers étages possèdent des pièces hautes. Quelques ornements de façades témoignent d'une recherche architecturale due à l'aisance du commanditaire (balcon en fer forgé, pilastres à chapiteaux corinthiens, pierres de taille au rez-de-chaussée). L'existence d'un entresol est courante. De même, des immeubles possèdent des loges de portier car le revenu des locataires et la sécurité des marchandises entreposées nécessitent une surveillance accrue [22].

Les étages supérieurs sont plus bas de plafond et les locaux sont constitué d'une pièce unique. Des préparatrices de fils de soie et des ouvriers d'autres textiles constituent les principaux locataires de ces logements [22].

Si, en 1810, le quartier compte 27 immeubles neufs, en 1830 il en a 57, l'accélération maximale du rythme des constructions se produisant entre 1810 et 1823. Les immeubles ainsi bâtis entre 1810 et 1825 diffèrent de ceux de la décennie précédente. Si en 1810, 69 % des appartements étaient de taille réduite (une ou deux pièces), en 1820, on ne trouve que 57 % d'appartements de ce type dans les immeubles neufs et, pour ceux construits après, le taux chute à 43 % L'architecture de ces derniers change également. Ils comportent souvent un étage supplémentaire, un entresol et des façades plus cossues avec appuis aux fenêtres, soubassement en pierres de taille, et parfois un balcon. L'agencement des appartements varie en fonction de la clientèle [22].

Le rez-de-chaussée et l'entresol accueillent des locaux commerciaux plus vastes, de trois ou quatre pièces contre une ou deux auparavant. Les grands appartements se multiplient jusqu'aux troisièmes et quatrièmes étages, les logements à trois ou quatre pièces deviennent plus courants. Dans les niveaux plus élevés, les locations à pièce unique ou double persistent et leur hauteur reste toujours inférieure à celle des pièces situées plus bas [22].

Ce nouvel agencement traduit la spécialisation économique de plus en plus poussée du quartier, provoquant le départ et le déclin des autres catégories vers d'autres quartiers de la colline [22].

c. Les immeubles associant grand négoce et résidence de haut niveau autour de la place Sathonay

Situé au bas des Pentes et à l'ouest des Capucins, le quartier de la place Sathonay correspond en partie à l'ancien clos du couvent de la Déserte (4 hectares). Les trois hectares de jardins et terres cultivables situés à mi-Pentes seront transformés en jardin botanique ou Jardin des Plantes, tandis que la partie inférieure (1 hectare) fera l'objet d'un lotissement plus tardif que le clos précédent [22].

La place Sathonay est réalisée par la municipalité à partir de 1811. De petites rues adjacentes sont ouvertes. Les parcelles riveraines, vendues à partir de 1820, trouvent rapidement preneurs car le quartier offre des qualités résidentielles : espaces verts, configuration des rues le plaçant à l'écart des artères animées, ensemble architectural cohérent imposé [22].

La hauteur des immeubles est ici similaire à celle des constructions des Capucins mais l'aspect extérieur diffère. Les façades avec balustrades en fer forgé, les portes cochères surmontées d'imposte, les pierres de taille, pilastres et frontons sont courantes. Les fenêtres hautes persistent jusqu'au troisième étage. L'existence d'un entresol est fréquente. De même les loges de portier sont courantes, comme pour les immeubles des Capucins, car le revenu des locataires et la sécurité des marchandises entreposées nécessitent une surveillance accrue [22].

La composition intérieure change également. Les locaux commerciaux du rez-de-chaussée sont plus petits : 52 % se composent d'une seule pièce ou de deux contre 36,6 % dans le quartier des Capucins [22].

Aux premiers et deuxième étages travaillent les commissionnaires en soie, soit 26 % des chefs de ménage en 1830. Si le quartier des Capucins héberge les marchands-fabricants, celui de la place Sathonay abrite les acheteurs et vendeurs de soieries agissant pour le compte de maisons de Lyon, de Paris ou de Bordeaux. Ces professionnels investissent de grands appartements et louent en moyenne quatre à cinq pièces (4,4 pièces). D'autres classes sociales aisées logent également dans le quartier. Les classes sociales populaires occupent les derniers étages mais représentent une part faible des occupants [22].

Autour de la place Sathonay, les appartements de trois pièces et plus représentent près de 35 % des logements contre 10 % dans le quartier des Capucins. Ils se situent au deuxième, troisième ou quatrième étage et hébergent des rentiers formant le groupe social le plus nombreux (40 %) [22].

d. Les immeubles-ateliers des Canuts

Répondant aux besoins des tisseurs, les immeubles-ateliers se situent dans la partie médiane et supérieure des Pentes, dans la portion septentrionale du cours d'Herbouville bordant le Rhône, et surtout sur le Plateau. Ils représentent près des deux tiers du bâti neuf de la colline en 1830 [22].

Les premiers lots ont été ouverts sur le plateau en 1812. Certains immeubles sont construits par des soyeux souhaitant loger leurs ouvriers mais d'autres par des tisserands eux-mêmes mettant leurs économies en commun. Tous présentent des caractéristiques communes les différenciant des deux quartiers précédents.

Les immeubles s'élèvent sur cinq ou six niveaux, en pierre. L'utilisation du pisé est interdite depuis 1817 sur le plateau de la Croix-Rousse car « les bâtiments neufs doivent être en bons matériaux et bonne maçonnerie afin de lutter contre les incendies et permettre de grandes hauteurs ». Toutefois, le pisé continue parfois à être utilisé à l'intérieur, pour les derniers niveaux ou pour les façades sur cour [32].

Les soubassements et le rez-de-chaussée de immeubles-ateliers sont en pierre de taille, souvent en « pierre de Villebois », de teinte grise plus ou moins sombre. Ce calcaire très dur, exploité le long du Haut-Rhône, provient de l'île Crémieu (Isère) et de la rive droite du Rhône (Ain). Sa résistance exceptionnelle et la possibilité d'extraire des blocs très volumineux autorisent des ouvertures de grande portée, notamment pour les boutiques. La mise en œuvre de blocs monolithes pour les ouvertures des rez-de-chaussée, confère une grande simplicité aux façades, dont les formes répétitives anticipent sur les constructions industrielles modulaires postérieures. De grandes dalles verticale reliées par des agrafes constituent les murs des couloirs d'accès [32].

Les élévations sont généralement réalisées en moellons de calcaire jaune du mont d'Or (« pierre de Couzon ») recouverts d'enduits. La mise à nu des façades permet d'observer aujourd'hui le système de construction à lancia et crossettes, largement répandu à cette époque [32].

Les façades sont nues et uniformes dans des soucis d'économie et de rentabilité. Il n'y a aucune décoration extérieure afin de ne pas payer des droits de voiries. Il s'agit avant tout de loger des tisseurs et leurs métiers au moindre coût [22]. Peu d'immeubles ont des limites marquées à chaque niveau [32].

L'accueil des métiers à tisser entraîne tout de même des contraintes techniques visibles sur ces immeubles. Le tissage nécessitant un éclairage important, de préférence peu coûteux, la lumière naturelle doit être utilisée au maximum. De grandes ouvertures sont donc prévues ainsi que des hauteurs sous plafond élevées pour loger les métiers [22].

Il y a en moyenne deux fenêtres par pièce. Leur hauteur est presque double de leur largeur. Bien que les dimensions des ouvertures ne soient pas uniformes, elles mesurent souvent entre 2,30 mètres - 2,50 mètres de haut sur 1,30 mètres - 1,40 mètres de large. Ces fenêtres hautes, disposées à intervalles réguliers (entre 0,50 et 0,90 mètres) toutes identiques pour un même immeuble du premier au quatrième étage contribuent à l'homogénéité des façades [22]. Les ouvertures et les appuis de fenêtre ou les bandeaux saillants créent un rythme. Les baies sont régulièrement équipées de jalousies dont le mécanisme est dissimulé par des lambrequins [32].

Par ailleurs, le métier en bois (2 mètres de haut), surmonté de la mécanique (1,80 - 1,90 mètre pour une mécanique Jacquard) impose des pièces de 3,90 - 4 mètres de hauteur ainsi que des plafonds à la française permettant de caler l'ensemble contre les poutres afin d'éviter les vibrations [22].

A l'unité des façades s'ajoute celle des agencements intérieurs. L'appartement le plus courant n'a qu'une ou deux pièces. Si dans les constructions des quartiers Sathonay et des Capucins la proportion de tels appartements s'établissait à moins de la moitié (respectivement 43 et 49 %), pour les immeubles-ateliers,

la moyenne est de 90%. Les trois pièces et plus se raréfient et servent de logements aux propriétaires-rentiers résidant sur place, ou de locaux commerciaux, artisanaux ou d'un usage particulier (huit pièces pour une école par exemple) [22].

Les rez-de-chaussée sont de plain-pied par rapport au niveau de la rue et constitués d'arcades ou de travées rectangulaires surmontées de linteaux en pierre de taille. Ils accueillent en général des commerces. L'entresol est rare et s'il existe, il demeure l'habitat du commerçant de la boutique qu'il surplombe, et se trouve lié architecturalement à cette dernière comme pour traduire le lien fonctionnel qui unit ces deux niveaux de la maison [32].

Au-dessus s'élèvent les appartements-ateliers des tisseurs. L'appartement classique comporte une ou deux pièces séparées par une mince cloison, un galandage. Chaque pièce dispose de deux ouvertures ou plus, et contient en moyenne autant de métiers que de fenêtres [22].

A l'intérieur, les escaliers sont le plus souvent réalisés en « pierre de Saint-Fortunat ». Il s'agit d'un calcaire dur, de couleur variable (généralement gris, mais parfois brun-rouge), extrait du massif du mont d'Or. Certains bancs se distinguent par une abondance de coquilles d'huitres fossiles (gryphées). Très résistant, il peut aussi servir pour les soubassements et les linteaux. [32]

L'accès aux immeubles se fait depuis la rue par une porte latérale ou centrée si l'immeuble compte beaucoup de travées. Il s'agit en majorité de portes piétonnes puisque les parcelles sont trop petites pour avoir de larges cours et des écuries. Les portes sont à un seul vantail, suffisamment large toutefois pour permettre le passage des métiers à tisser et leurs mécaniques. Elles sont simples, rectangulaires et généralement surmontées d'une imposte, parfois cintrée, mais la plupart du temps rectangulaire et ajourée pour assurer l'éclairage de "l'allée" [32].

Ces immeubles sont emblématiques du quartier de la Croix-Rousse. Ce sont les immeubles canuts.

Aujourd'hui, ces immeubles n'accueillent plus les activités de soieries et les propriétaires se servent souvent de la hauteur sous plafond pour créer des mezzanines afin d'agrandir leur logement.

e. Les immeubles mixtes, dernière phase d'urbanisation

Ces constructions, groupant environ un septième du bâti neuf de la colline en 1830, se localisent à mi-Pentes et dans la portion méridionale du cours d'Herbouville. Certaines sont isolées ou composent de petits noyaux de deux ou trois immeubles disséminés dans les quartiers d'immeubles-ateliers ; d'autres se rassemblent le long d'une voie (rues de l'Annonciade, du Commerce, cours d'Herbouville) [22].

Les commanditaires de ces nouveaux immeubles souhaitent attirer une clientèle plus aisée et moins bruyante que celle des immeubles-ateliers. Aussi, les immeubles ont une apparence plus proche de ceux des Capucins et de la place Sathonay, contrastant avec les immeubles-ateliers [22].

Extérieurement, ces bâtisses présentent des façades ouvragées, avec un ou plusieurs balcons au premier étage et même au-dessus, parfois des moulures, des frontons en saillie, des appuis de croisées aux fenêtres. Si les ouvertures hautes dominent jusqu'au troisième ou quatrième étage, au-delà, elles cèdent la place à des fenêtres plus réduites [22].

La catégorie des une ou deux pièces regroupe entre 50 et 71 % des appartements contre 90 % en moyenne pour les immeubles-ateliers. Ils se localisent surtout dans le bas et dans le haut des constructions. Dans les étages intermédiaires dominent les appartements de trois pièces et plus [22].

Ces bâtiments ne sont pas construits pour des tisseurs. Toutefois, aucune activité ne prédomine. Les ouvriers côtoient des professions libérales. Contrairement aux immeubles des trois types précédents, les immeubles-mixtes ne se caractérisent pas par une activité prédominante, ils ont d'abord une fonction de logement, de résidence, complétée par des activités diverses, d'importance et d'effectifs variables, selon la conception des appartements, la situation géographique des constructions : plus on gravit les Pentes, plus la fonction de travail domine [22].

5. Annexe 5 : Tableaux récapitulatif des scénarios

Parcours d'un occupant dans la journée										
Weekday			Weekend			Hollyday				
hr	pièce	Etat	hr	pièce	Etat	hr	pièce	Etat		
00:00	CHB	sommeil	00:00	CHB	sommeil	00:00	AMBT	absent		
07:30	SDB	éveillé	08:30	SDB	éveillé	24:00:00	AMBT	absent		
07:50	CUI	éveillé	08:50	CUI	éveillé					
08:20	AMBT	absent	09:20	SEJ	absent					
12:30	CUI	éveillé	12:30	CUI	éveillé					
13:20	AMBT	absent	13:20	SEJ	absent					
18:20	SEJ	éveillé	19:20	SDB	éveillé					
19:20	SDB	éveillé	19:50	CUI	éveillé					
19:50	CUI	éveillé	20:40	SEJ	éveillé					
20:40	SEJ	éveillé	22:10	CHB	sommeil					
22:10	CHB	sommeil	24:00:00	CHB	sommeil					
24:00:00	CHB	sommeil								
Basic info										
		Gain	val (W)	val (kJ/h)						
		Personne	90	324						
		Equipement	5,7	20,52						
		Eclairage	2	7,2						
Humidité										
par occ	éveillé	0,055	kg/h	Cooking	val. high (40'	2,844	val. med.(30	2,268	val. low (15')	1,512
	sommeil	0,0385	kg/h	nb personne	2					
Tous les jour	SDB(douche)	hr	%	kg/h	hr	%	kg/h			
		00:00	0	0	00:00	0	0			
		07:30	1	1,44	08:30	1	1,44			
		07:40	0	0	08:40	0	0			
		19:20	1	1,44	19:20	1	1,44			
		19:30	0	0	19:30	0	0			
	CUI(cuisine)	hr	%	kg/h	hr	%	kg/h			
		00:00	0	0	00:00	0	0			
		07:50	1	2,268	08:50	1	2,268			
		08:20	0	0	09:20	0	0			
		12:30	1	2,268	12:30	1	2,268			
		13:00	0	0	13:00	0	0			
		19:50	1	2,268	19:50	1	2,268			
		20:20	0	0	20:20	0	0			
Weekend	SDB(laundry)	hr	%	kg/h						
		00:00	0	0						
		06:30	1	0,252						
		08:30	0	0						
	SEJ(dry)	hr	%	kg/h						
		00:00	0	0						
		08:30	1	0,1368						
		19:30	0	0						

Figure 69 : Tableaux recensant les informations nécessaires à l'élaboration des scénarios d'occupation

Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

Figure 70 : Tableaux des scénarios d'occupation pour un jour de semaine

OCC														
% sommeil		0,7	% eveil		1	% absent		0	nb occ :		2			
CHB_gain			SDB			CUI			SEJ					
hr	%	% * occ	hr	%	% * occ	hr	%	% * occ	hr	%	% * occ			
00:00	0,7	1,4	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0			
08:30	0	0	08:30	1	2	08:50	1	2	09:20	1	2			
22:10	0,7	1,4	08:50	0	0	09:20	0	0	12:30	0	0			
00:00	0,7	1,4	19:20	1	2	12:30	1	2	13:20	1	2			
			19:50	0	0	13:20	0	0	19:20	0	0			
			00:00	0	0	19:50	1	2	20:40	1	2			
						20:40	0	0	22:10	0	0			
						00:00	0	0	00:00	0	0			
CHB_CO2														
hr	%	% * occ												
00:00	1	2												
08:30	0	0												
22:10	1	2												
00:00	1	2												
EQU														
% sommeil		0,193	% eveil		1	% absent		0,193						
CHB			SDB			CUI			SEJ					
hr	%		hr	%		hr	%		hr	%				
00:00	0		00:00	0		00:00	0,193		00:00	0,193				
08:30	0		08:30	0		08:50	1		09:20	1				
22:10	0		08:50	0		09:20	0,193		12:30	0,193				
00:00	0		19:20	0		12:30	1		13:20	1				
			19:50	0		13:20	0,193		19:20	0,193				
			00:00	0		19:50	1		20:40	1				
						20:40	0,193		22:10	0,193				
						00:00	0,193		00:00	0,193				
ECL														
% sommeil		0	% eveil		1	% absent		0						
CHB			SDB			CUI			SEJ					
hr	%		hr	%		hr	%		hr	%				
00:00	0		00:00	0		00:00	0		00:00	0				
08:30	0		08:30	1		08:50	1		09:20	1				
22:10	0		08:50	0		09:20	0		12:30	0				
00:00	0		19:20	1		12:30	1		13:20	1				
			19:50	0		13:20	0		19:20	0				
			00:00	0		19:50	1		20:40	1				
						20:40	0		22:10	0				
						00:00	0		00:00	0				
PM2,5														
% pas cuisine		0	% cuisine		1	% absent		0	val. high :	2,55	val. med. :	1,91	val. low :	1,26
CHB			SDB			CUI			SEJ					
hr	%	% * val	hr	%	% * val	hr	%	% * val	hr	%	% * val			
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0			
08:30	0	0	08:30	0	0	07:50	0	0	09:20	0	0			
22:10	0	0	08:50	0	0	08:20	0	0	12:30	0	0			
00:00	0	0	19:20	0	0	12:30	1	1,91	13:20	0	0			
			19:50	0	0	13:00	0	0	19:20	0	0			
			00:00	0	0	13:20	0	0	20:40	0	0			
						19:50	1	1,91	22:10	0	0			
						20:20	0	0	00:00	0	0			
						20:40	0	0						
						00:00	0	0						
Fenêtres (et inverse pour SP)														
% sommeil		1	% [10;20]h		0	% [20;10]h		1	% absent		0			
CHB + SEJ														
hr	%													
00:00	1													
09:20	0													
21:30	1													
00:00	1													

Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

Figure 71 : Tableaux des scénarios d'occupation pour un jour de weekend

OCC											
% sommeil	0,7	% eveil	1	% absent	0	nb occ :	2				
CHB			SDB			CUI			SEJ		
hr	%	% * occ	hr	%	% * occ	hr	%	% * occ	hr	%	% * occ
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0
EQU											
% sommeil	0,193	% eveil	1	% absent	0,193	(hors vacs où tout est éteint)					
CHB			SDB			CUI			SEJ		
hr	%	%	hr	%	%	hr	%	%	hr	%	%
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0
ECL											
% sommeil	0	% eveil	1	% absent	0						
CHB			SDB			CUI			SEJ		
hr	%	%	hr	%	%	hr	%	%	hr	%	%
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0
PM2,5											
% pas cuisine	0	% cuisine	1	% absent	0	val. high :	2,55	val. med. :	1,91	val. low :	1,26
CHB			SDB			CUI			SEJ		
hr	%	% * val	hr	%	% * val	hr	%	% * val	hr	%	% * val
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0
00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0	00:00	0	0
Fenêtres (et inverse pour SP)											
% sommeil	1	% [10;20]h	0	% [20;10]h	1	% absent	0				
CHB + SEJ											
hr	%										
00:00	0										
00:00	0										

Figure 72 : Tableaux des scénarios d'occupation pour un jour de vacances (absence)

6. Annexe 6 : Capture d'écran de l'interface SimulationStudio de TRNSYS pour le Cas Réel

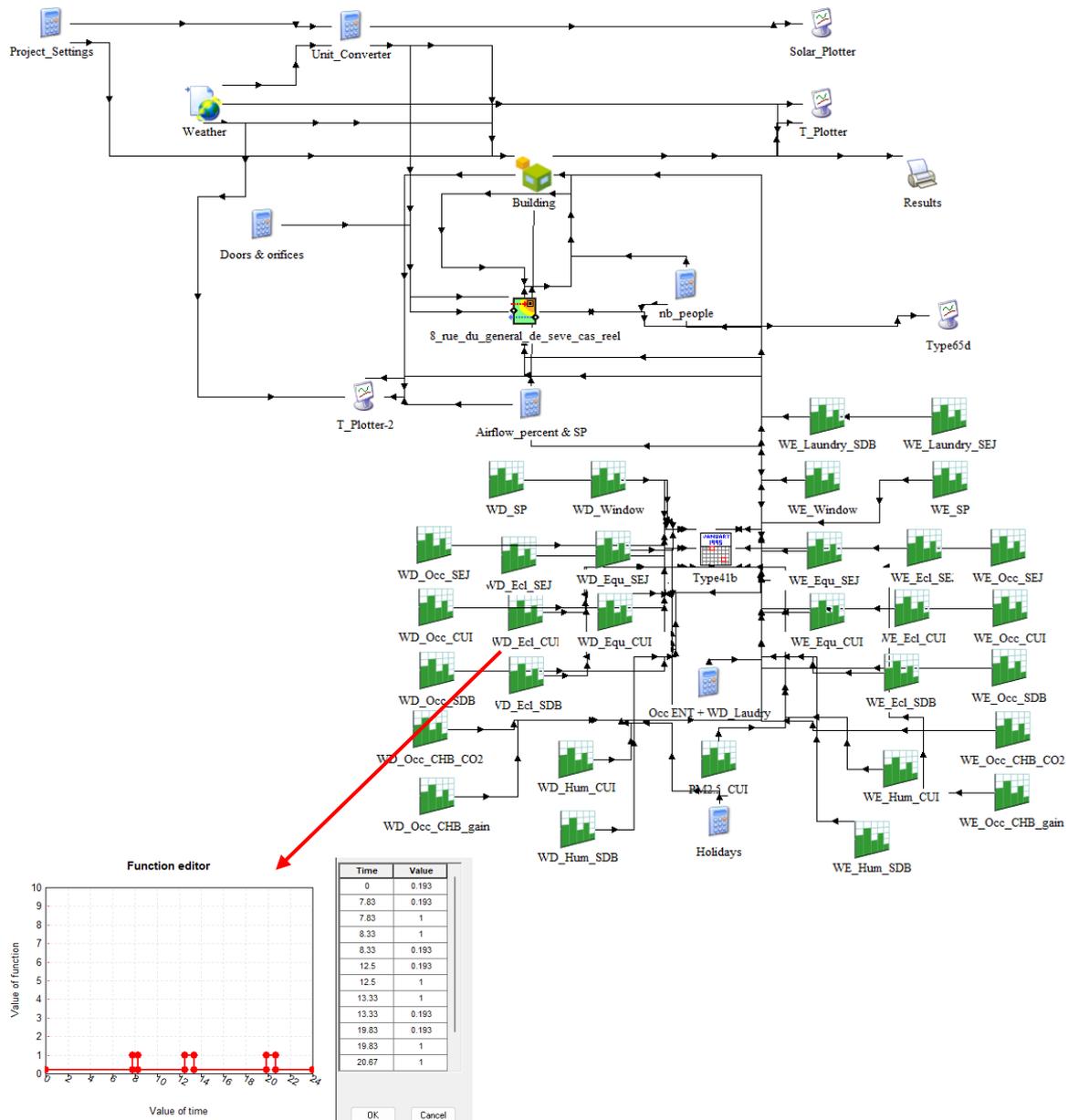


Figure 73 : Capture d'écran de l'interface de Simulation Studio pour le cas réel et grossissement du type 14 utilisé pour l'occupation humaine des cuisines

7. Annexe 7 : Rendu sur CONTAM du cas réel, étage n°4

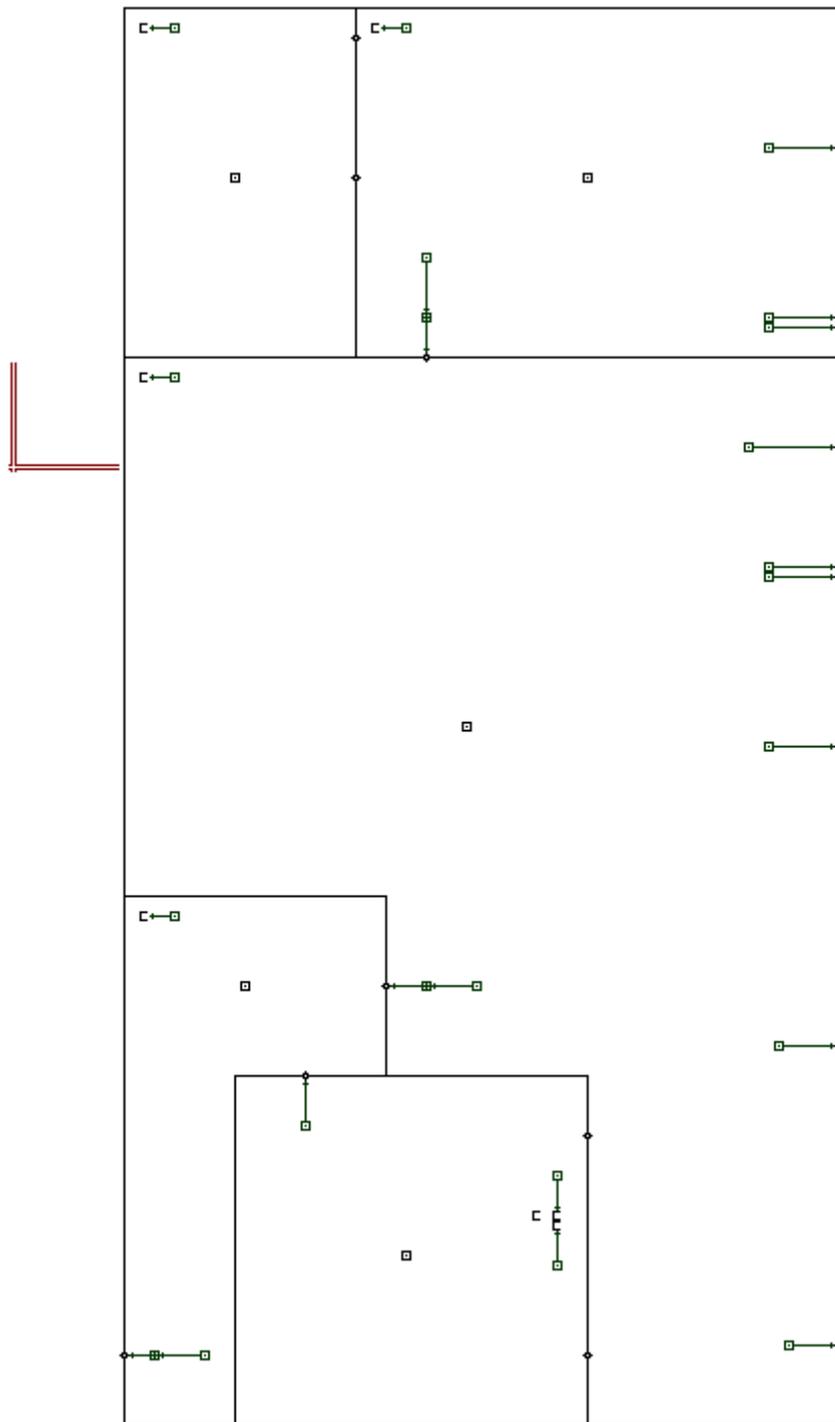


Figure 74 : Rendu sur CONTAM de l'étage n°4 de l'immeuble étudié dans le cas réel

8. Annexe 8 : Rendu sur SketchUp de la modélisation des 2 appartements

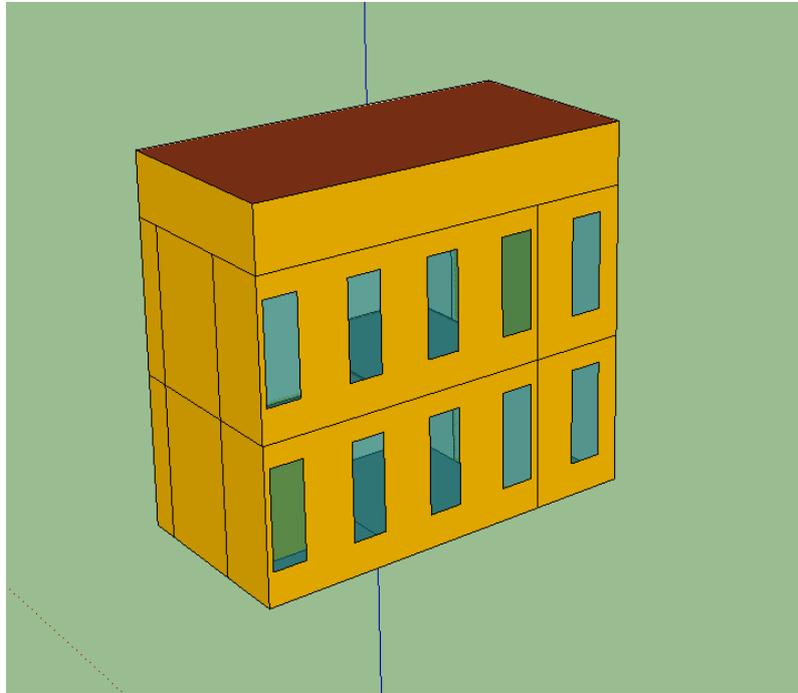


Figure 75 : Capture d'écran des 2 appartements et des combles après le passage sur CONTAM (orientation du toit non effectuée), cas réel

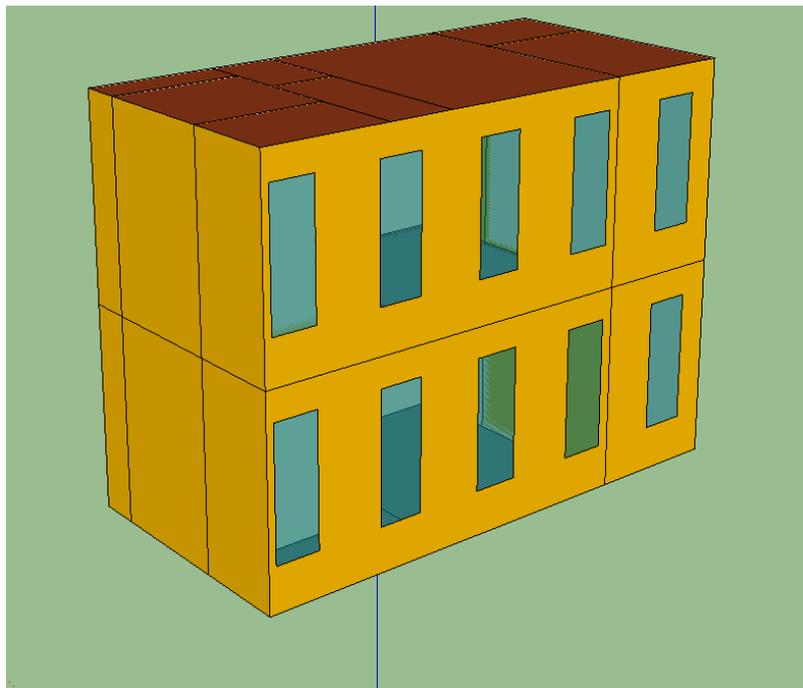


Figure 76 : Capture d'écran des 2 appartements, pire cas

9. Annexe 9 : Infographie de Baptiste Poirier sur la production d'humidité et de polluants par l'occupant [18]

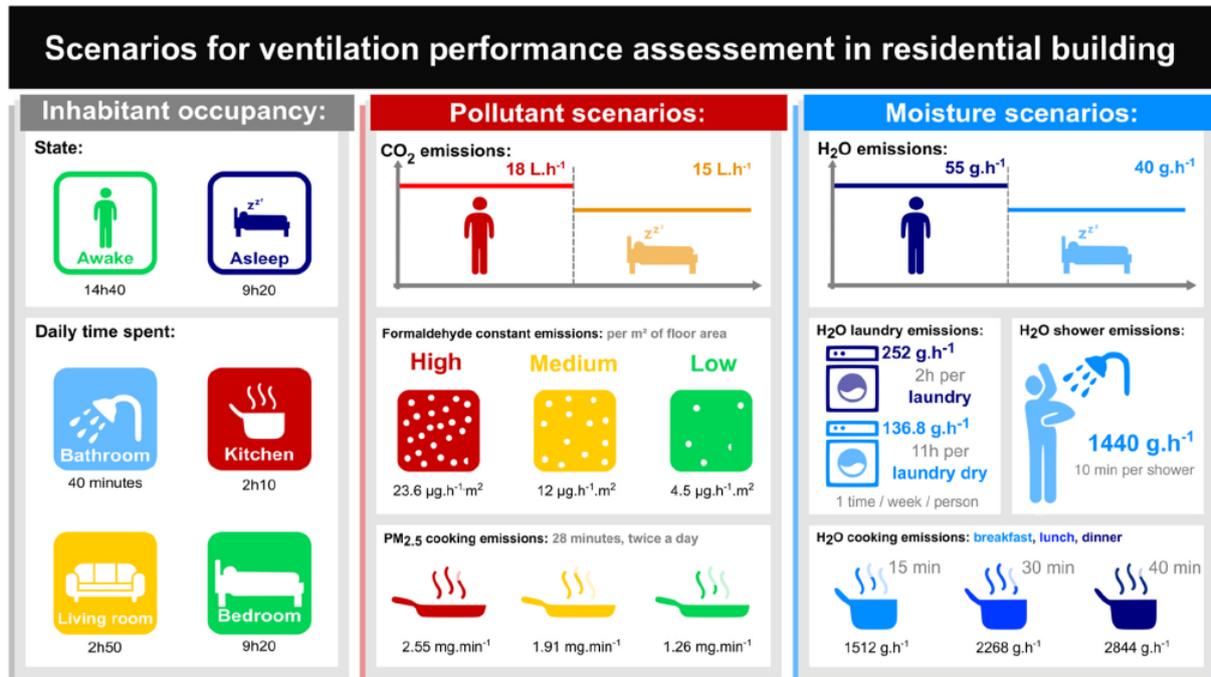


Figure 77 : Infographie des scénarios pour l'évaluation des performances de ventilation dans des bâtiments résidentiels [18]

10. Annexe 10 : Schéma d'isolation au chanvre issu de la thèse de Margot Ruiz [34]

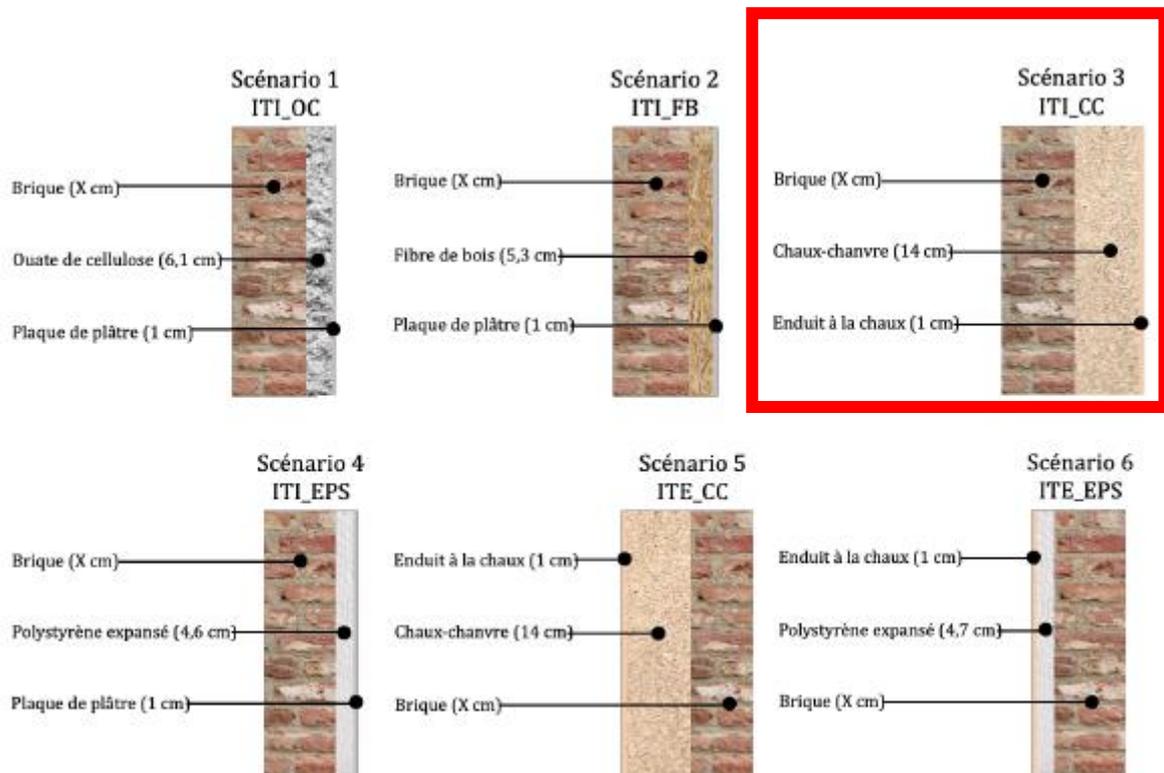
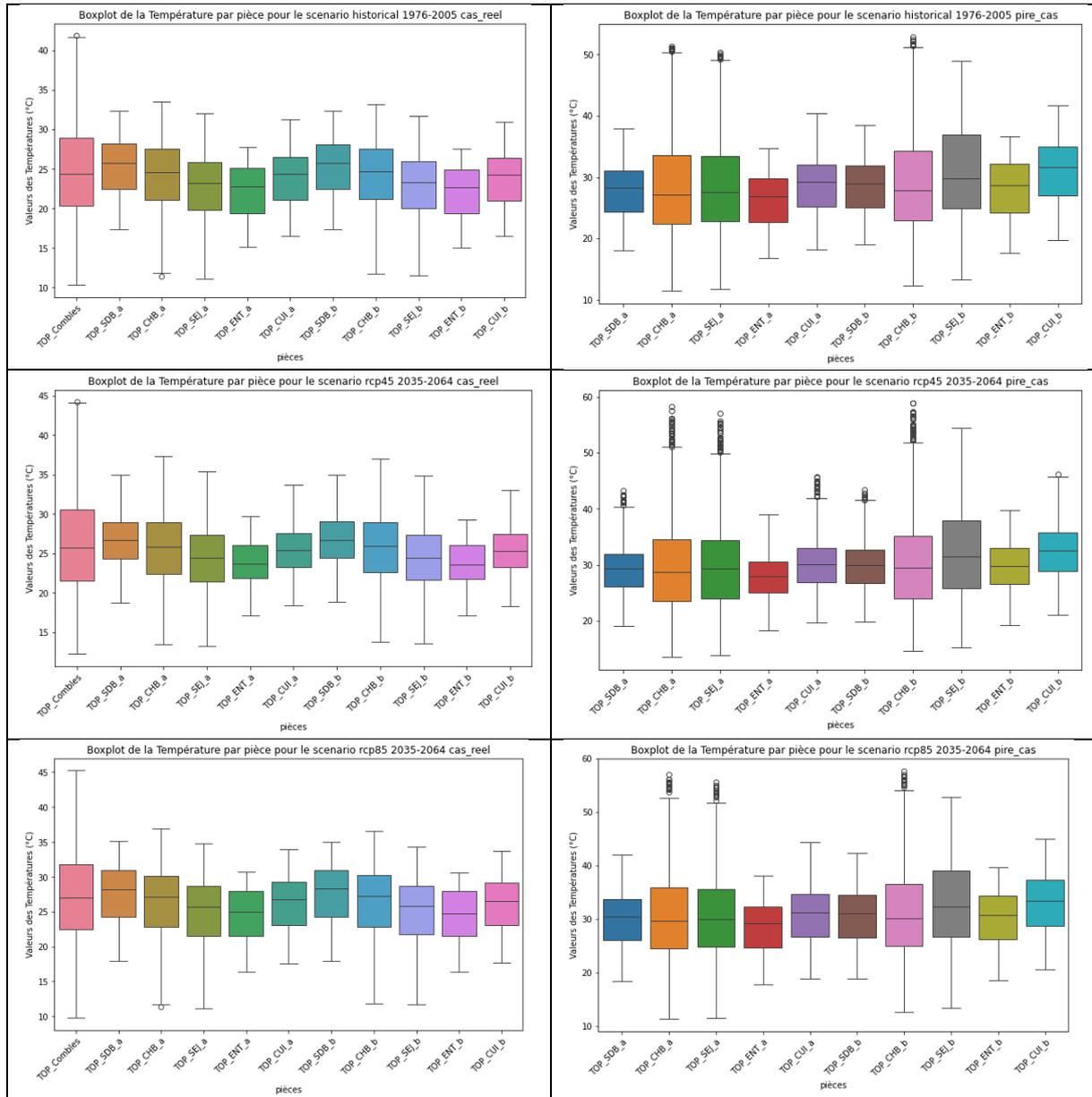
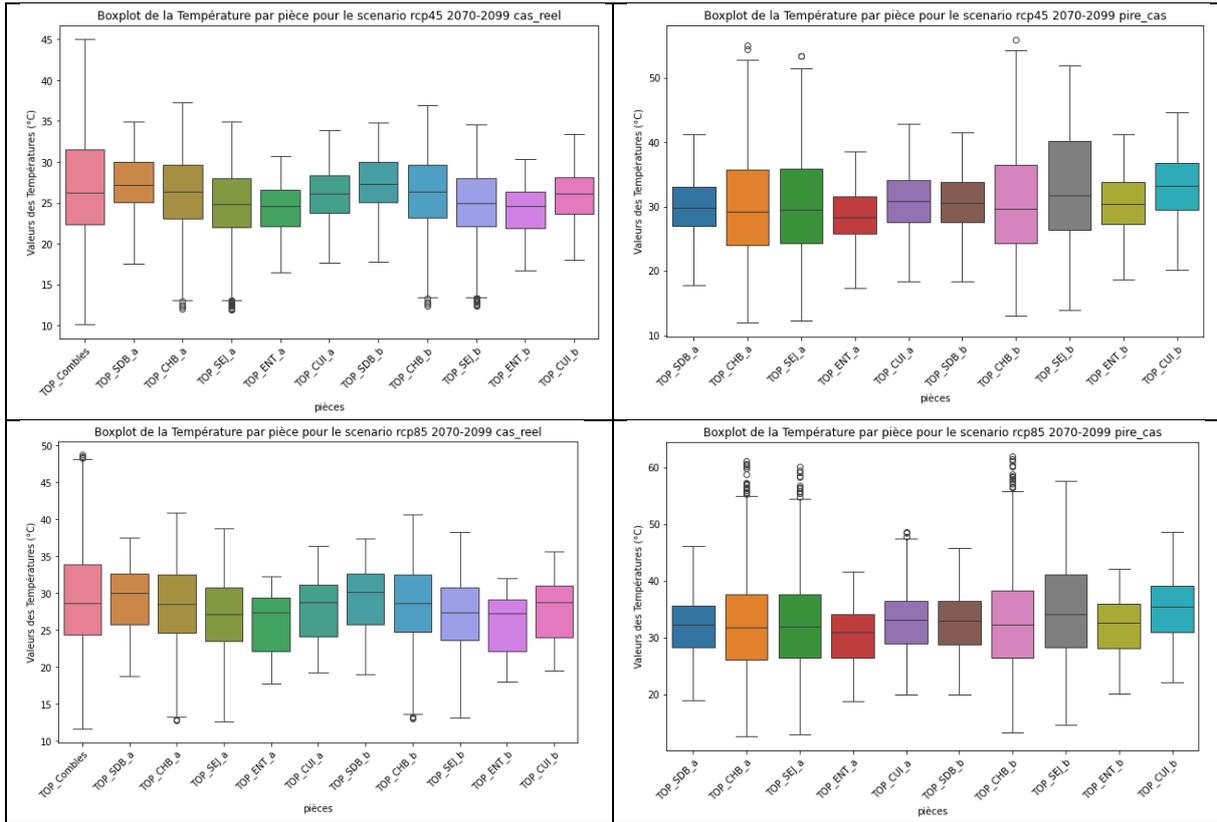


Figure 78 : Compositions des parois associées à chaque scénario de rénovation étudié [34], la proposition étudiée pour ce présent rapport est entourée en rouge

11. Annexe 11 : Diagrammes boites à moustaches des différentes températures dans les pièces selon les différents scénarios pour le cas réel et le pire cas



Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS



12. Annexe 12 : Histogrammes des indicateurs thermiques, agrandissement

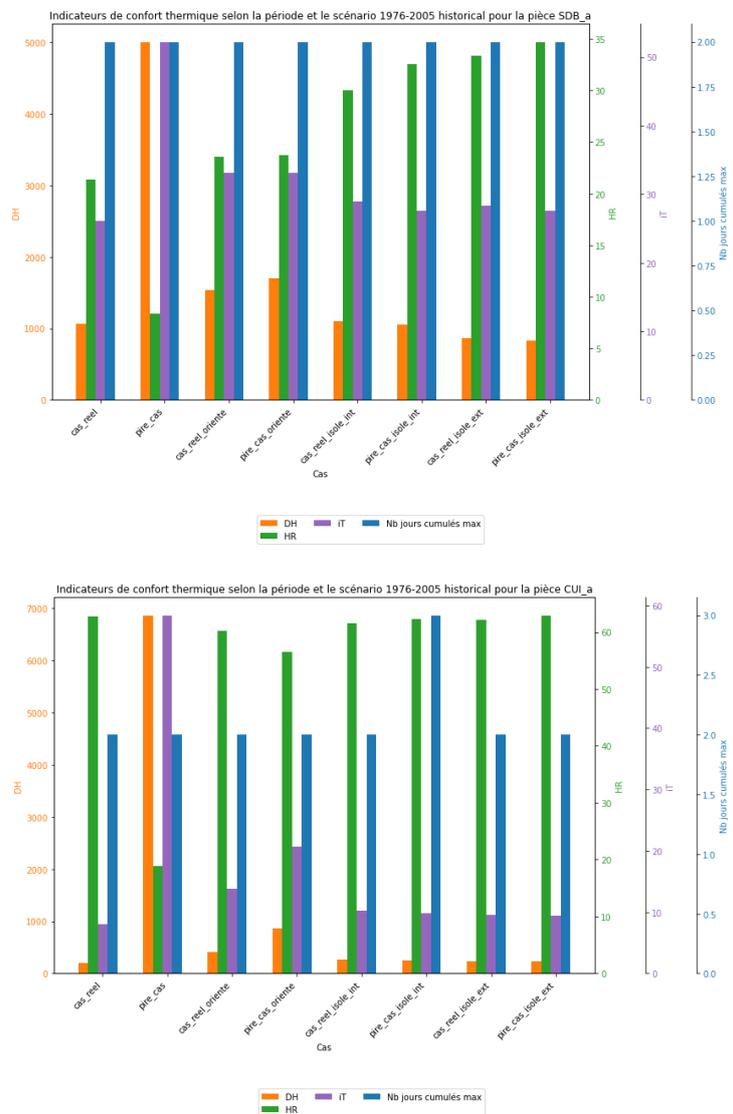


Figure 79 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la cuisine et la salle de bain, scénario historique (1976-2005), grossissement

Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

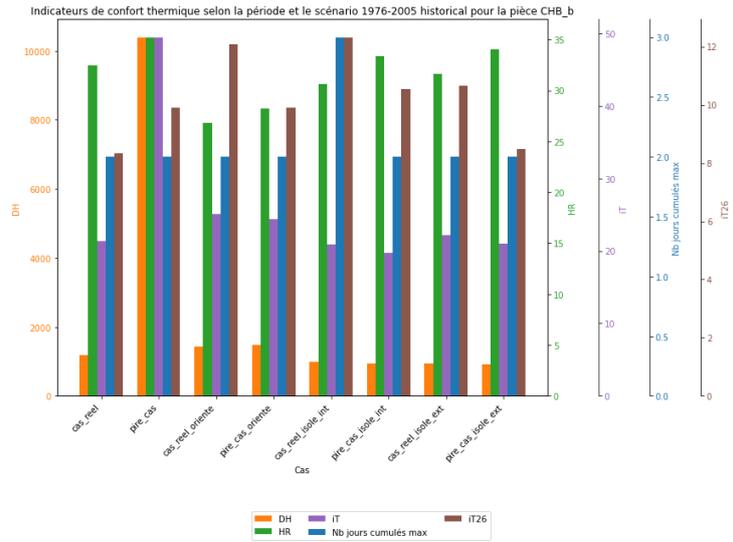
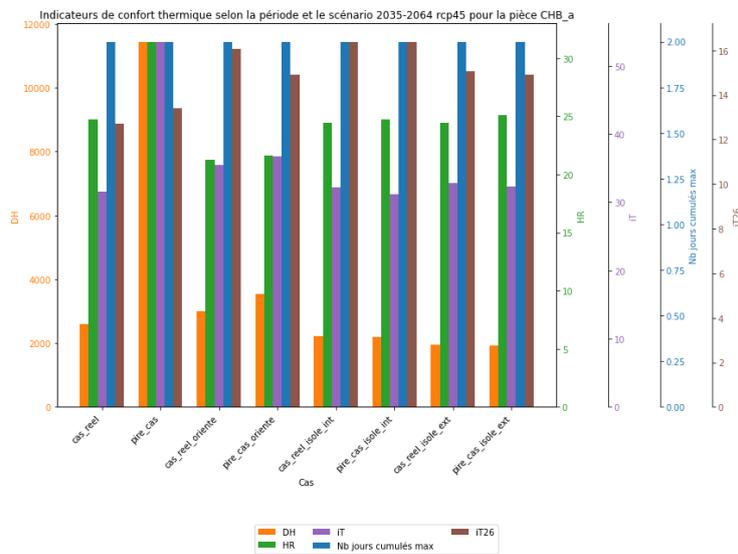
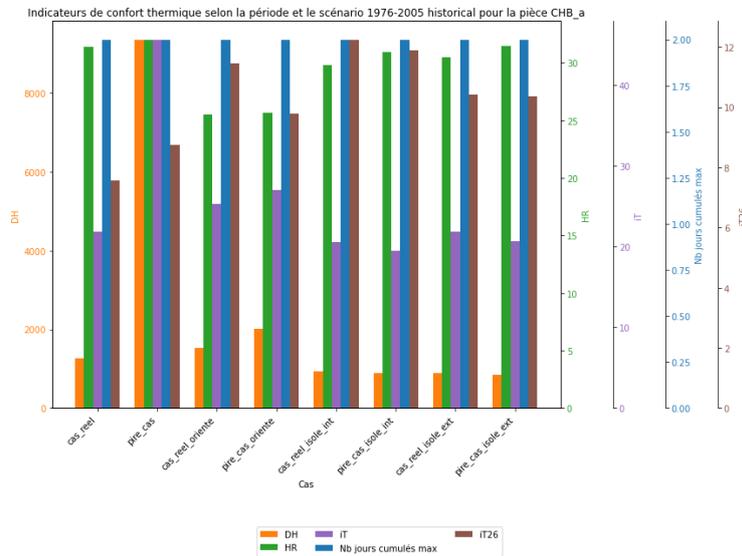


Figure 80 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la chambre du bas, scénario historique (1976-2005), grossissement



Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

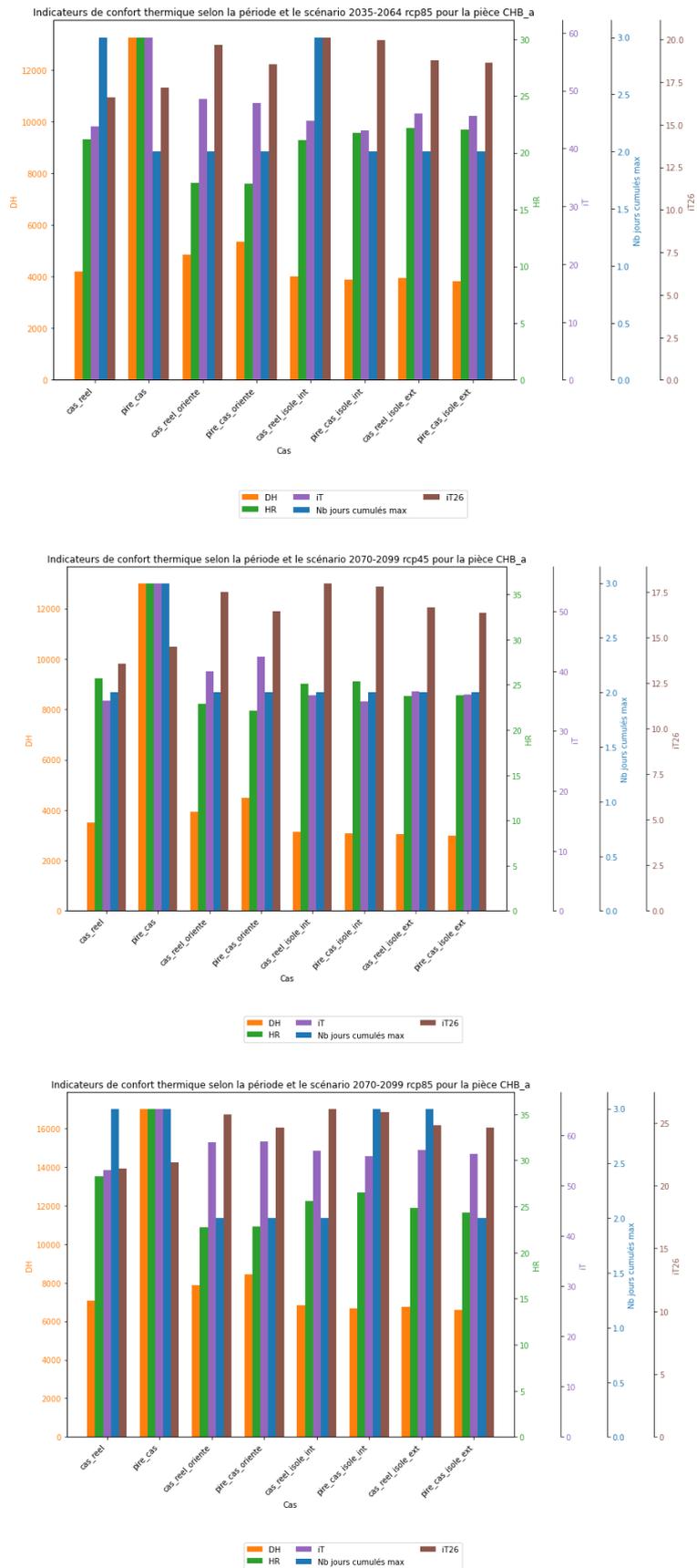
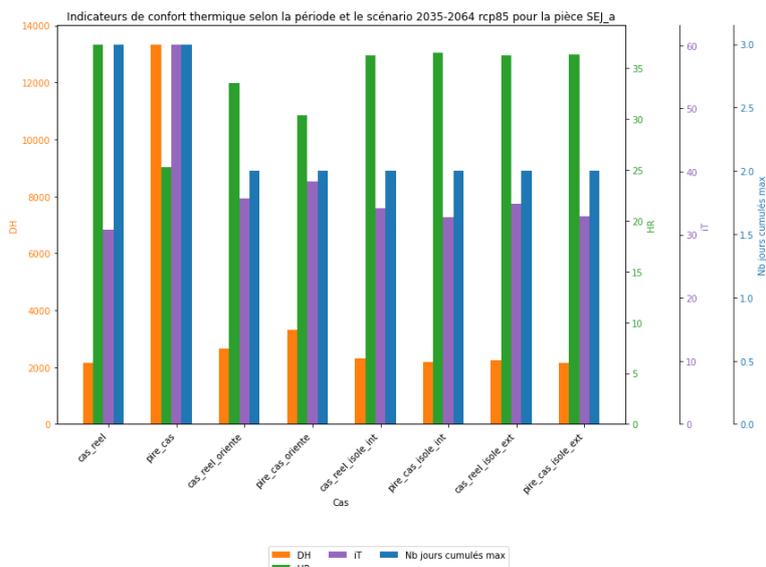
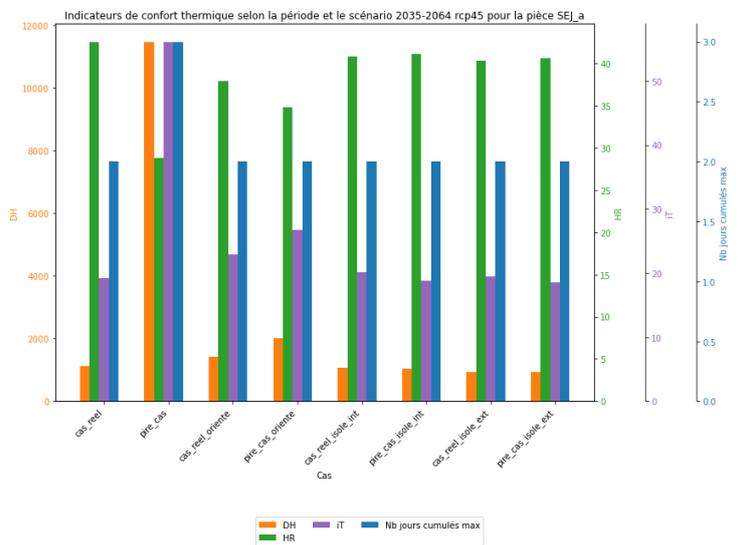
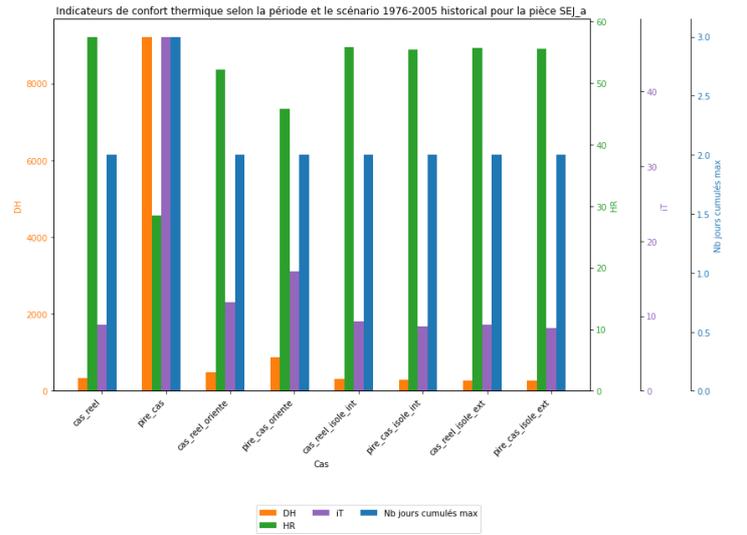


Figure 81 : Histogramme des indicateurs thermiques pour la chambre pour tous les scénarios, grossissement

Agnès Ferreira Lopes

MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL ANCIEN LYONNAIS



Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

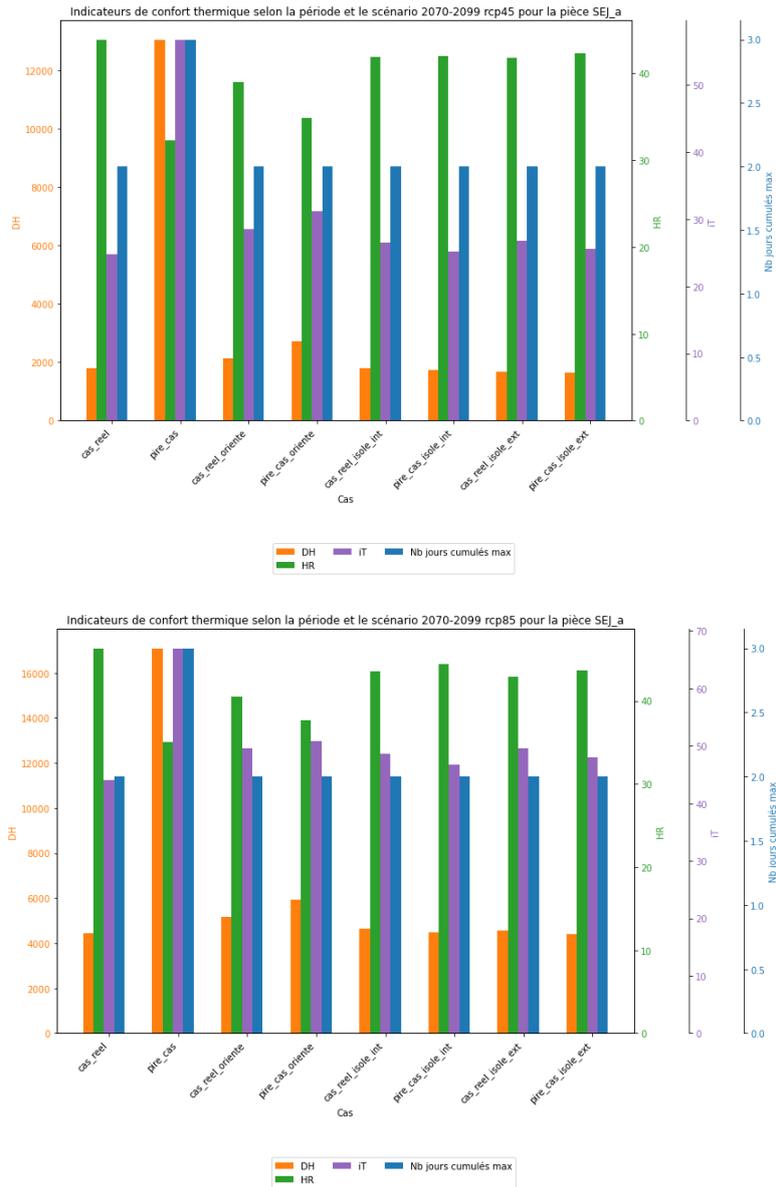
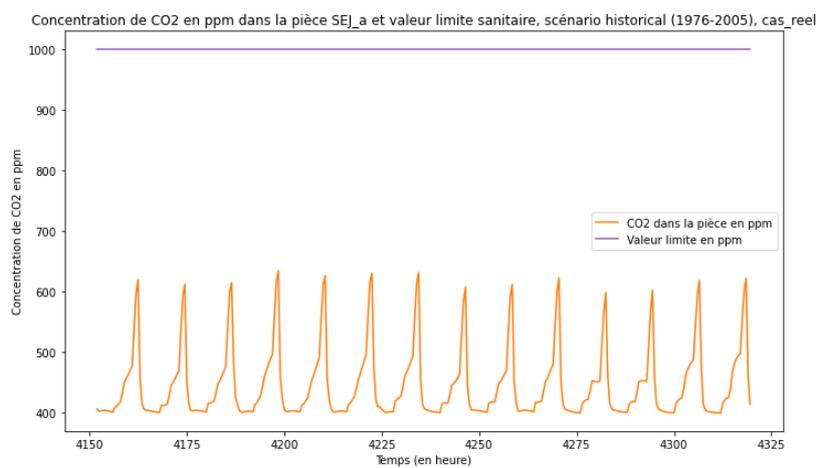
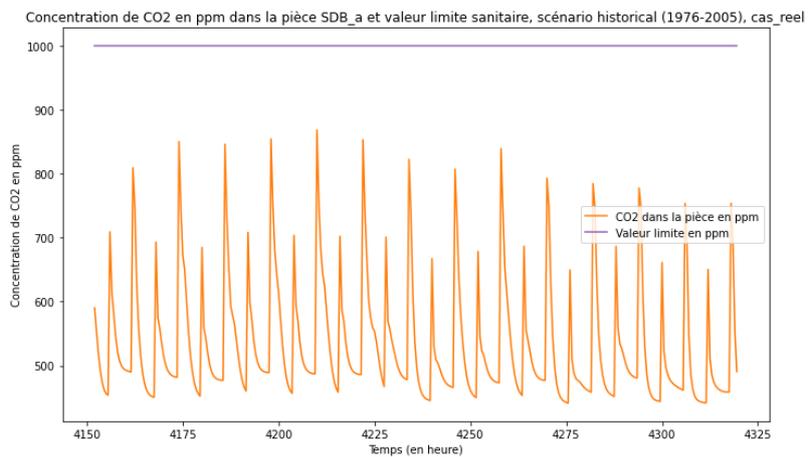
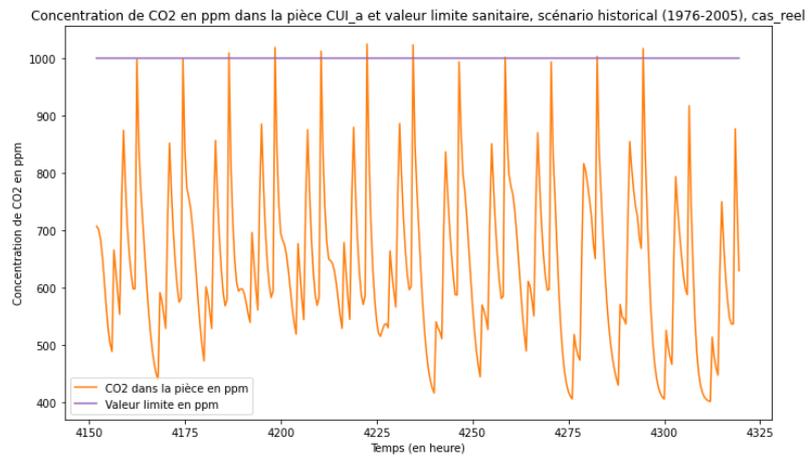


Figure 82 : Histogramme des indicateurs thermiques pour le séjour pour tous les scénarios, grossissement

13. Annexe 13 : Graphiques des indicateurs de QAI, agrandissement



Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

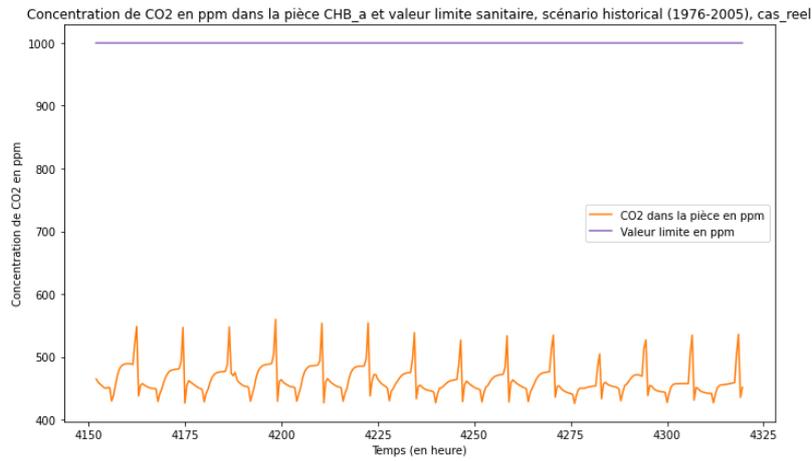


Figure 83 : Concentration de CO2 dans les pièces, comparaison entre les pièces avec fenêtres et celles sans, scénario historique, cas réel, grossissement

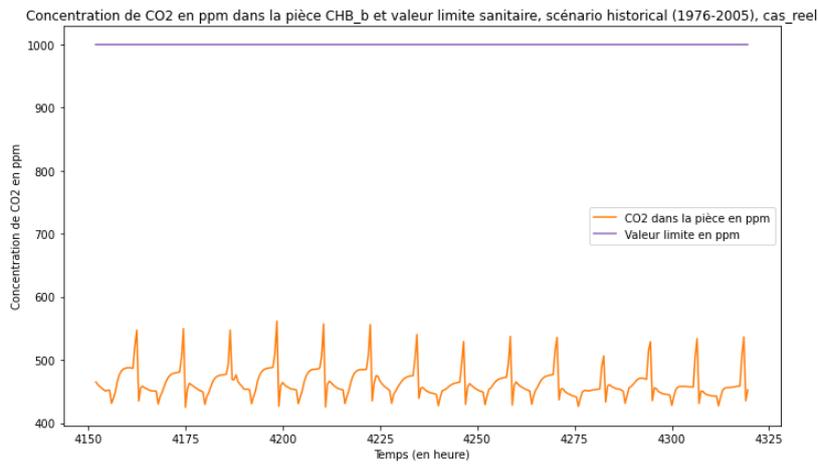
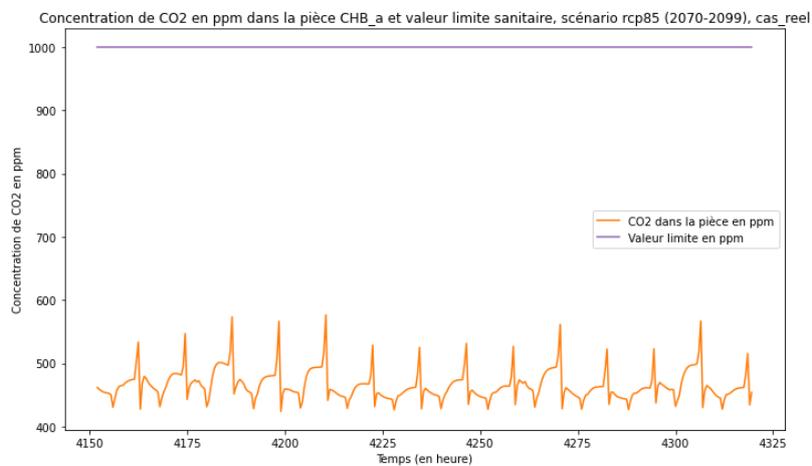


Figure 84 : Concentration de CO2 dans les pièces, chambre du bas, scénario historique, cas réel, grossissement



Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

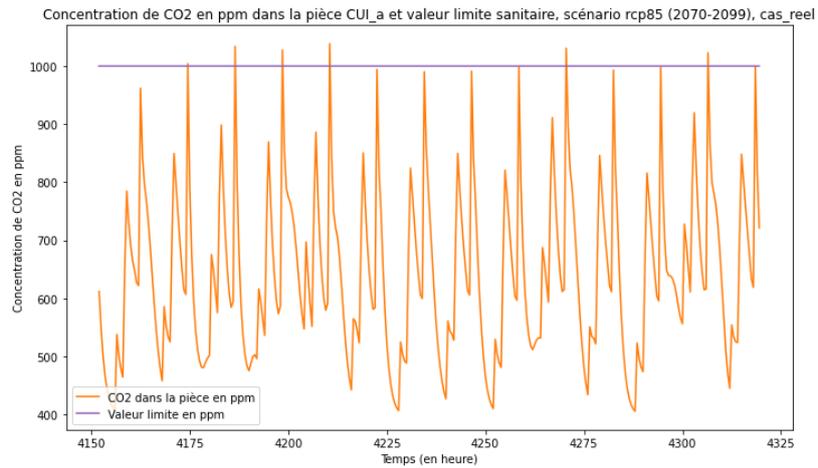


Figure 85 : Concentration de CO2 dans la chambre et dans la cuisine du haut, projection RCP 8.5 pour la période 2070-2099, cas réel, grossissement

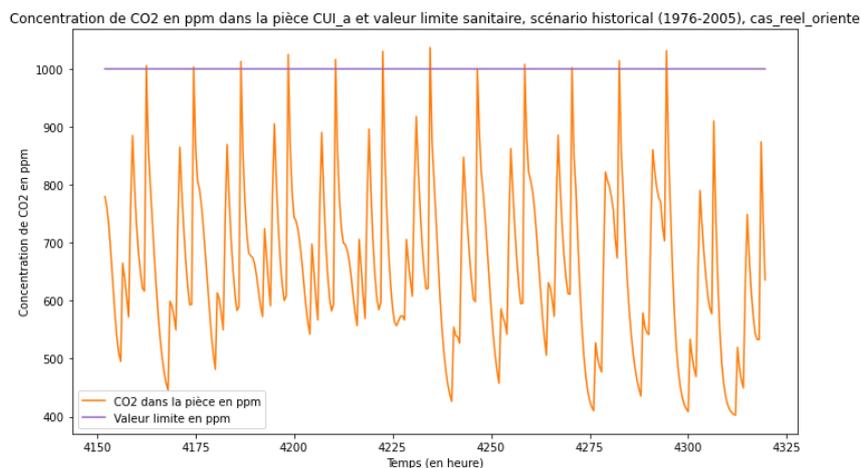
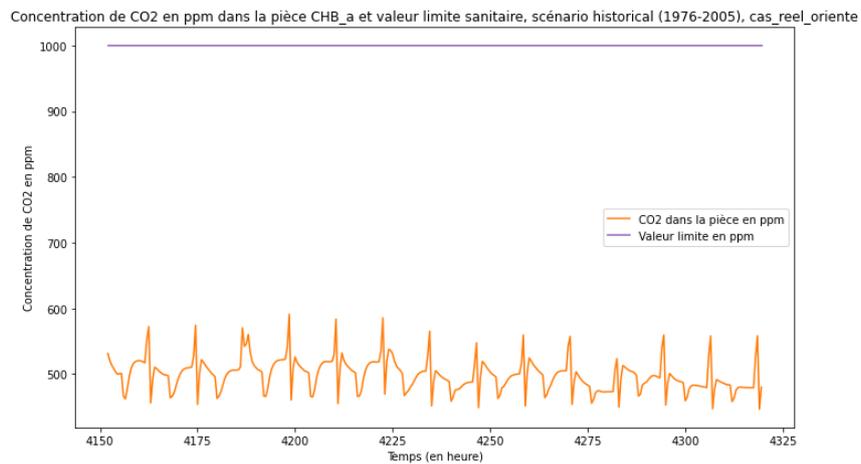
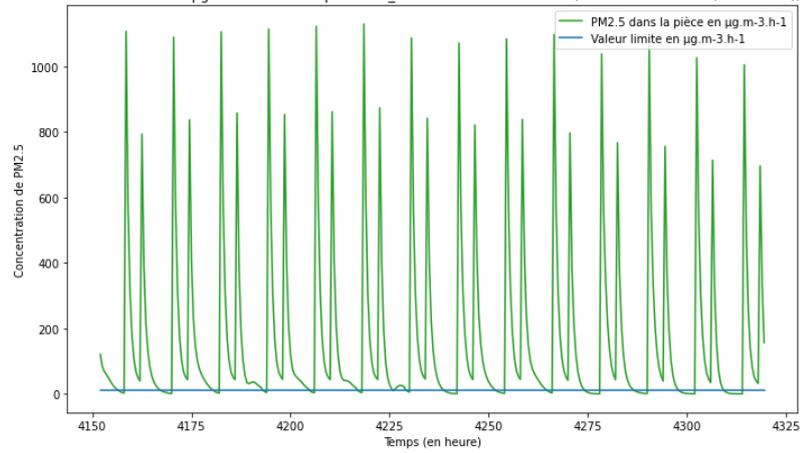


Figure 86 : Concentration de CO2 dans la chambre et dans la cuisine du haut, scénario historique, cas réel orienté de +180°, grossissement

Agnès Ferreira Lopes
MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAIQUES DU BATI RESIDENTIEL
ANCIEN LYONNAIS

Concentration de PM2.5 en $\mu\text{g.m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ dans la pièce CUI_a et valeur limite sanitaire, scénario historique (1976-2005), cas_reel



Concentration de PM2.5 en $\mu\text{g.m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ dans la pièce CUI_b et valeur limite sanitaire, scénario historique (1976-2005), cas_reel

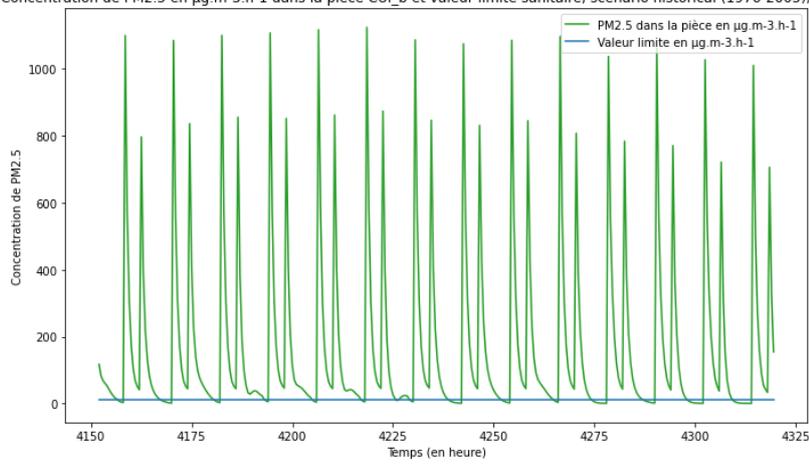
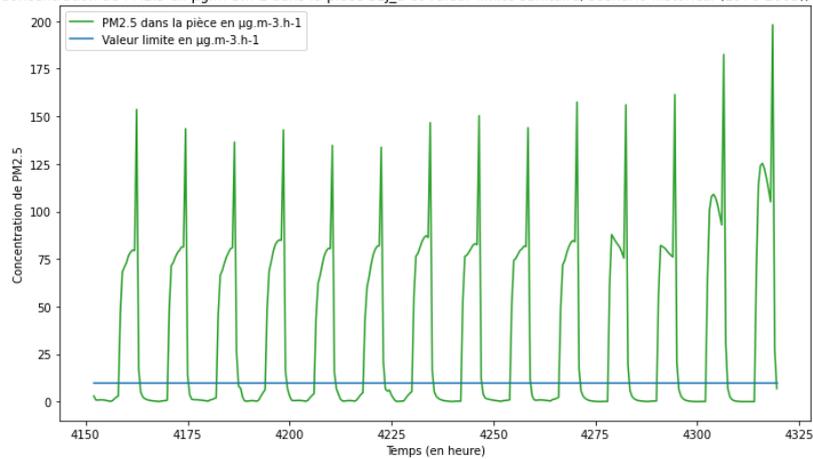


Figure 87 : Concentration de PM2.5 dans les pièces où celles-ci sont émises (cuisine), scénario historique, cas réel, grossissement

Concentration de PM2.5 en $\mu\text{g.m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ dans la pièce SEJ_a et valeur limite sanitaire, scénario historique (1976-2005), cas_reel



Agnès Ferreira Lopes
 MODELISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES ET AERAULIQUES DU BATI RESIDENTIEL
 ANCIEN LYONNAIS

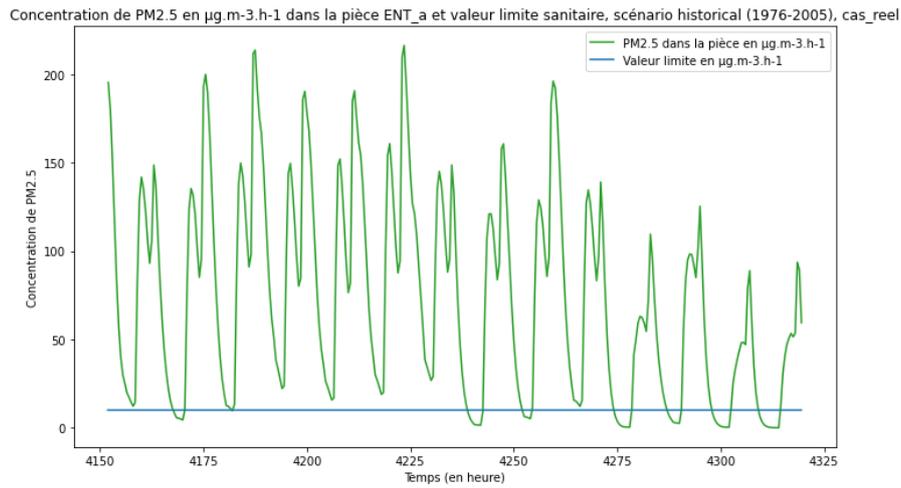


Figure 88 : Concentration de PM2.5 dans les pièces adjacentes à la pièce d'émission (entrée et séjour), scénario historique, cas réel, grossissement

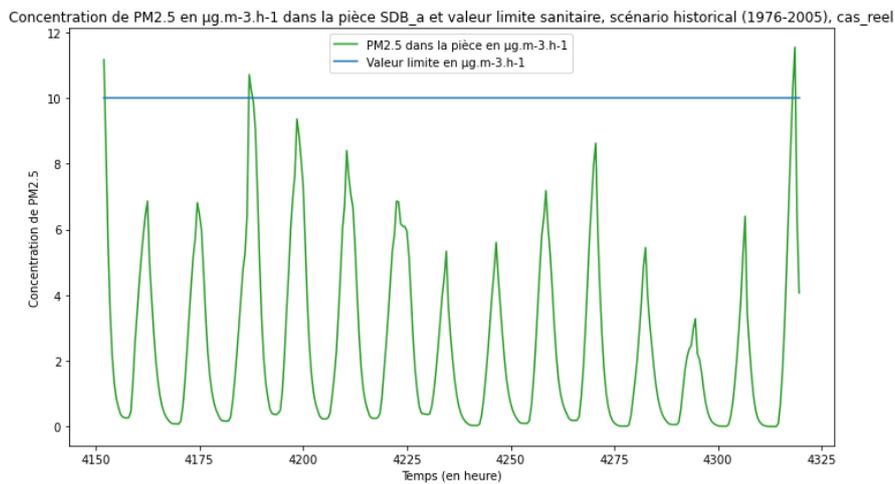


Figure 89 : Concentration de PM2.5 dans la pièce la plus éloignée de la pièce d'émission (salle de bain), scénario historique, cas réel, grossissement

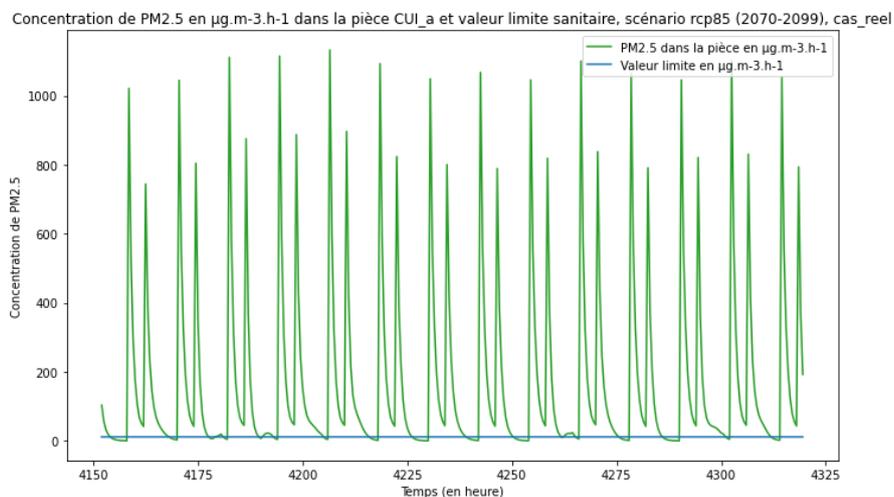


Figure 90 : Concentration de PM2.5 dans la cuisine, projection RCP 8.5 pour la période 2070-2099, cas réel, grossissement

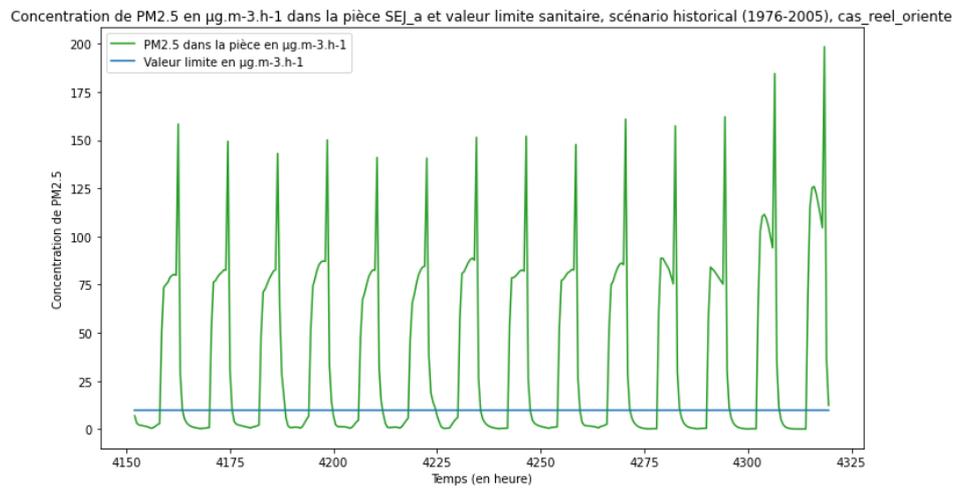
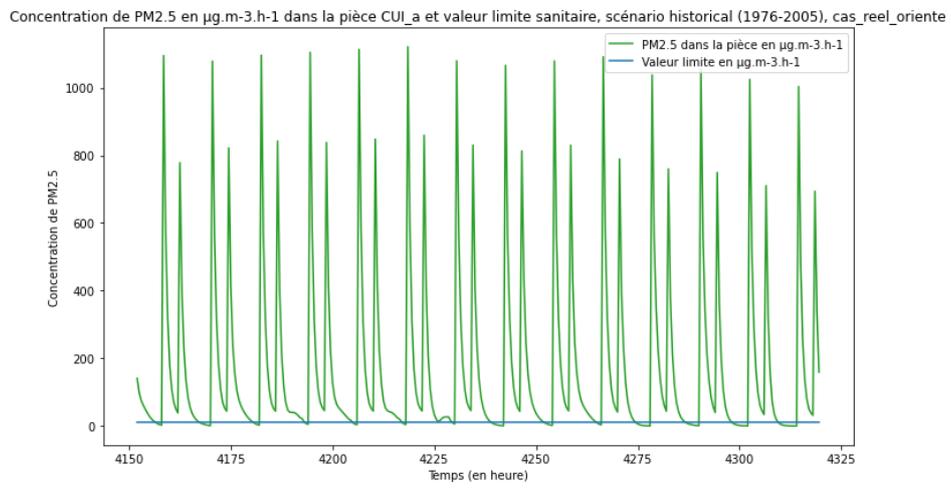


Figure 91 : Concentration de PM_{2.5} dans la cuisine et le séjour, scénario historique, cas réel orienté de +180°, grossissement