

PROJET I-HEROS

LIVRABLE TACHE D2.5

EDUDE DES CARACTERISTIQUES
TECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTALES
DES SOLUTIONS DE RENOVATION EN
FONCTION DES TYPOLOGIES DE
BATIMENTS TOULOUSAINES.

VERSION FINALE



INSA
TOULOUSE

LUCAS ESTAY
STEPHANE GINESTET
MARION BONHOMME
CLAIRE OMS MULTON

06 - FEV - 22

SUIVIT DES REVISIONS

Indice	Date	Motif et description de la modification
Version 1	09/07/2021	Chapitres 1,2,3,
Version 2	09/11/2021	Correction Chapitres 1,2,3 Rédaction chapitres4,5,6
Version Finale	05/02/2022	Corrections et ajout résumé

RESUME

La commission européenne estime que les bâtiments résidentiels, qui couvrent environ 75% de la surface totale des bâtiments en Europe sont responsables de 68% de la consommation énergétique du parc immobilier, soit 27% de la consommation européenne globale. En France, on estime que les $\frac{3}{4}$ du parc de logements de 2050 existe déjà, et pourtant plus de 35% des logements ont plus de 50 ans. Le facteur clé de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment est donc la rénovation thermique et de l'efficacité énergétique du parc immobilier existant.

La rénovation est donc le levier le plus important de l'efficacité énergétique du parc de bâtiments existant. C'est un des enjeux majeurs du succès des objectifs de maîtrise énergétique européens. Pour les entités mettant en place des services d'accompagnement de rénovations, il n'est pas rare d'avoir recours à des aides ou solutions industrielles adaptées au territoire dans le cadre d'un guichet unique. Il est donc primordial de comprendre l'impact de ces solutions sur les plans énergétique, environnementale, hydrique, confort thermique, qualité de l'air, etc.

Détailler et analyser un catalogue de solutions est une aide indispensable pour choisir la solution la plus adaptée aux besoins d'un bâtiment. Pourtant toutes les solutions de rénovations ne sont pas adaptables à tous les climats ou tous les bâtiments.

L'objectif de ce travail a été d'étudier l'impact et d'estimer la qualité de différentes solutions de rénovations pour un parc de logements avec les caractéristiques propres à la région toulousaine. Les bâtiments ont été simulés sur Energy+ et ont été sélectionnés pour être les plus représentatifs du territoire.

Plusieurs scénarios de travaux ont été simulés numériquement et comparés pour obtenir un compromis afin de limiter les consommations énergétiques liées au chauffage et d'optimiser le confort thermique estival. Les conclusions obtenues permettent de prioriser les opérations de rénovation pour éviter le recours à la climatisation.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	11
2. ETUDE DU PARC DE BATIMENT DE TOULOUSE METROPOLE	12
2.1. CARACTERISTIQUE CONSTRUCTIVES DU PARC TOULOUSAIN	12
2.2. METHODE DE REPRESENTATION DES PARCS DE BATIMENTS	14
2.3. MODELISATION DU PARC DE BATIMENT TOULOUSAIN	15
2.3.1. REPARTITION PAR CLASSE D'AGE.....	15
2.3.2. REPARTITION PAR FORMES ARCHITECTURALES.....	16
2.3.3. IDENTIFICATION DES CLASSES DE CONSTRUCTIONS.....	17
3. HYPOTHESES DE SIMULATION ET MODELISATION INITIALE	23
3.1. SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE	23
3.2. COMPARAISON DES DIFFERENTS LOGICIELS DE STD.....	23
3.3. METHODE DE REPRESENTATION DES DIFFERENTS INDIVIDUS.....	26
3.4. IDENTIFICATION D'UN INDIVIDU REPRESENTATIF PAR CLASSE TYPOLOGIQUE	27
3.4.1. ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE	27
3.4.2. DETERMINATION DES VARIABLES UTILES A L'ETUDE MORPHOLOGIQUE.....	28
3.4.3. IDENTIFICATION D'UN INDIVIDU REPRESENTATIF DANS LE PARC DE BATIMENT	29
3.5. HYPOTHESES GEOMETRIQUES	31
3.5.1. BATIMENT PAVILLONAIRES.....	31
3.5.2. IMEUBLE D'HABITATION	32
3.6. HYPOTHESES DE CONSTRUCTIONS	34
3.6.1. BATIMENT PAVILLONAIRES.....	35
3.6.2. IMEUBLE D'HABITATION	36
3.7. HYPOTHESES DE MODELISATION	37
3.8. VALIDATION DE LA SIMULATION INITIALE	38
4. ETUDE DES RESULTATS DE SIMULATION.....	42
4.1. ETUDE DE L'IMPACT DE L'ORIENTATION : BATIMENT COLLECTIF.....	42
4.2. ETUDE DE L'IMPACT DE LA VENTILATION SUR LE CONFORT THERMIQUE D'ETE : BATIMENT COLLECTIF	43
4.3. ETUDE THERMIQUE ET ENERGETIQUE DES SOLUTIONS DE RENOVATIONS COURANTES : TOUTES	
TYPOLOGIES.....	45
4.3.1. DESCRIPTIF DES SENARIOS DE RENOVATIONS.....	45
4.3.2. GAIN ENERGETIQUE SUR LES CONSOMMATIONS DE CHAUFFAGE	46
4.3.3. ETUDE DE L'EVOLUTION DES TEMPERATURES D'AIR	47
4.3.4. ETUDE DU CONFORT THERMIQUE D'ETE	50
4.4. ETUDE DE L'IMPACT DU CLIMAT	52
4.4.1. ETUDE DE LA SIMULATION SOUS DIFFERENTS CLIMATS	52
4.4.2. CARACTERISTIQUE DES DIFFERENTS CLIMATS.....	54
4.5. OPTIMISATION DE LA SOLUTION DE RENOVATION : TOUTES TYPOLOGIES.....	57
4.6. MODIFICATION DU SYSTEME DE CHAUFFAGE : BATIMENTS PAVILLONAIRES.....	61

4.6.1.	ETUDE DU MODE DE CHAUFFAGE	61
4.6.2.	ETUDE DU TYPE DE SYSTEME DE CHAUFFAGE	63
5.	<u>RENTABILITE ENVIRONEMENTALE.....</u>	63
5.1.	IMPACT ENVIRONEMENTAL.....	63
5.1.1.	INVENTAIRE CARBONE DES SOLUTIONS DE RENOVATION	64
5.1.2.	CALCUL DE RENTABILITE ENVIRONEMENTALE	68
5.1.3.	PRESENTATION DES RESULTATS.....	69
6.	<u>CONCLUSION.....</u>	71

TABLE DE FIGURES

Figure 1 : Ancienneté et répartition du parc immobilier toulousain (Base de Donnée INSEE 2022 [8])	12
Figure 2 : Répartition des consommations énergétiques de Toulouse Métropole en fonction du type de logement [90].....	13
Figure 3 : Répartition typologique des différentes morphologies de bâtiment à Toulouse	17
Figure 4 : Répartition des caractéristiques énergétiques DPE des bâtiments toulousains en fonction de l'âge et la typologie	20
Figure 5 : Répartition des caractéristiques environnementales associés DPE des bâtiments toulousains en fonction de l'âge et la typologie	20
Figure 6 : Détermination des classes de construction ayant le plus d'impact.	21
Figure 7 : Logigramme de fonctionnement d'une STD[24]	23
Figure 8 : Modèle urbain simplifié selon Martins [27].....	26
Figure 9 : Identification du bâtiment représentatif parmi l'ensemble des pavillons discontinus sur le territoire Toulouse Métropole	30
Figure 10 : Localisation du bâtiment représentatif pour la classe morphologique pavillon discontinu.....	30
Figure 11 : Photo du bâtiment représentatif de la classe typologique pavillon discontinu toulousain	31
Figure 12 : Plan du bâtiment modélisé pour la typologie architecturale bâtiment pavillonnaire.....	32
Figure 13 : Localisation du bâtiment représentatif pour la classe morphologique immeuble continu	33
Figure 14 : Photo du bâtiment représentatif de la classe typologique immeuble continu toulousains	33
Figure 15 : Etude des courbes de températures d'air de la modélisation initiale par zones thermiques bâtiment pavillonnaire	39
Figure 16 : Etude des courbes de températures d'air de la modélisation initiale par zones thermiques immeuble d'habitation	40
Figure 17 : Consommation énergétique des modèles de simulation initiaux	41
Figure 18 : Etude des températures d'air et des consommations de chauffage en fonction de l'orientation du bâtiment ICIO.....	42
Figure 19 : Evolution des températures d'air annuelle dans le bâtiment ICIO, Etude de l'impact de la ventilation	43
Figure 20 : Etude de l'impact de la ventilation sur le confort d'été annuel dans le bâtiment ICIO.....	44
Figure 21 : Simulation des consommations en fonction des solutions de rénovations M1 et M2.....	46
Figure 22 : Évolution des températures d'air pavillon individuel pour les solutions M1 et M2.....	48
Figure 23 : Évolution des températures d'air immeuble collectif pour les solutions M1 et M2.....	49
Figure 24 : Étude du confort thermique, bâtiment pavillonnaire, modification M1 et M2	50
Figure 25 : Étude du confort thermique, bâtiment collectif, modification M1 et M2	51
Figure 26 : Comparaison des températures d'air estivales pour deux climats différents..	53
Figure 27 : Diagramme bioclimatique pour le climat de Toulouse.....	54
Figure 28 : Diagramme bioclimatique pour le climat de Hambourg.....	55
Figure 29 : Diagramme bioclimatique pour la projection de climat RCP 4.5 2040 à Toulouse.....	56

Figure 30 : Fiche de conseil CAUE Occitanie pour les protections solaires des baies [76]	58
Figure 31 : Evolutions des températures d'air dans la pièce de vie pour la simulation de la solution de rénovation optimisé M3	59
Figure 32 : confort thermique maison individuelle scénario de modélisation 3	60
Figure 33 : Simulation des consommations des scénarios confort thermique.....	60
Figure 36 : Consommation systèmes CVC en fonction des solutions de chauffages.....	63
Figure 37 : Bilan environnemental matériaux d'isolation à résistance thermique équivalente $R=5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (kg CO ₂ e /m ² . 50ans)	65
Figure 38 : Bilan environnemental matériaux de finition (kg CO ₂ e /m ² . 50ans)	65
Figure 39 : Bilan environnemental matériaux de constructions divers (kg CO ₂ e /m ² . 50ans)	66
Figure 40 : Bilan environnemental types menuiseries (kg CO ₂ e /m ² . 50ans).....	66
Figure 41 : Bilan environnemental systèmes CVC.....	67
Figure 43 : Etude de corrélation des différentes variables de la base de données Mapuce.	81
Figure 44 : Corrélation des données projetées sur les valeurs propres et des données réelles	82
Figure 45 : Représentation des contributions de chaque variable sur les deux axes retenus de l'ACP.....	83

TABLE DES TABELAUX

Tableau 1 : Description et représentation des classes typologiques en fonction des morphologies urbaines	18
Tableau 2 : Comparaison des différents logiciels de STD	25
Tableau 3 : Variables de la base de données Mapuce à l'échelle du bâtiment.....	29
Tableau 4 : Données caractéristiques typologiques des PD de la base de données Mapuce	31
Tableau 5 : Données caractéristiques typologiques des IC de la base de données Mapuce	34
Tableau 6 : Présentation des hypothèses de construction pour la modélisation PD	35
Tableau 7 : Présentation des hypothèses de construction pour la modélisation IC.....	36
Tableau 9 : Compositions simulés pour les cas de rénovation 1 et 2 pour le bâtiment pavillonnaire.....	45
Tableau 10 Compositions simulés pour les cas de rénovation 1 et 2 pour l'immeuble collectif.....	46
Tableau 11 : Facteur d'émission par type de mode de chauffage.....	68
Tableau 12 : Calcul du cout environnemental associé à une solution de rénovation.....	68
Tableau 13 : Calcul du facteur d'émission et du TRI environnemental d'une solution de rénovation	69
Tableau 14 : Temps de retour sur investissement environnemental des solutions de rénovations étudiés	69
Tableau 15 : Temps de retour sur investissement environnemental en fonction du type de système de chauffage utilisé en rénovation	69
Tableau 16 : Méthode de calcul des solveurs de STD en fonction des logiciels[26]	80
Tableau 8 : Résumé des hypothèses de simulations retenues pour la modélisation des bâtiments d'habitations. Exemple pour un jour typique. (Part des apports totaux)	84

1. INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, la réduction des consommations énergétiques est l'un des axes centraux des problématiques de recherche à l'échelle européenne, voire mondiale. Chaque jour une partie de l'énergie est dédiée au Chauffage, à la Climatisation et à la Ventilation (CVC) des bâtiments. Selon les estimations de la commission européenne, les systèmes CVC sont responsables de 40% de la consommation énergétique globale et de 36% des émissions de CO₂ en Europe [1].

Les bâtiments résidentiels, qui couvrent environ 75% de la surface totale des bâtiments en Europe sont responsables de 68% de la consommation énergétique du parc immobilier, soit 27% de la consommation européenne globale [2]. En parallèle, le Conseil général de l'environnement et du développement durable a établi en 2013 que sur le territoire français, les émissions de gaz à effet de serre doivent être divisés par 4 d'ici à 2050 [2].

On estime que les $\frac{3}{4}$ du parc de logements de 2050 existe déjà [3], et pourtant plus de 35% des logements ont plus de 50 ans [4]. Un facteur clé de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment est donc la rénovation de l'efficacité énergétique du parc immobilier existant [5]. Dans ce contexte, la rénovation représente un enjeu majeur de l'efficacité énergétique et environnementale du parc de bâtiments existant.

Il existe par ailleurs un très grand nombre de méthodes de mise en œuvre de solutions techniques qui engendrent des modifications dans les interactions des différents paramètres du bâtiments [6], [7].

L'objectif de ce document est de comparer les différentes solutions techniques de rénovation envisageables sur le territoire de Toulouse métropole en fonction de différents critères : Thermique, Environnemental, Financier, Énergétique, Confort thermique d'été

Les premières parties, basées sur les résultats des travaux déjà effectués à l'INSA et par les partenaires du projet I-HEROS ont permis de dresser le bilan de l'état d'avancement de la rénovation du stock logements privé de Toulouse.

La deuxième partie s'intéresse à l'identification et la modélisation numérique d'un couple bâtiment théorique étant censé représenter la majorité des caractéristiques constructives associée au parc bâtiment. Les hypothèses et les limites des simulations sont aussi détaillés dans cette partie.

La troisième partie s'intéresse à l'étude des résultats de la simulation des différentes solutions de rénovations sous la forme d'étude de sensibilité de différents paramètres : impact de l'orientation, impact du climat, impact d'une solution de chauffage...ect

2. ETUDE DU PARC DE BATIMENTS DE TOULOUSE METROPOLE

L'introduction qui dresse l'état de l'art du domaine de la rénovation à l'échelle mondiale, européenne et nationale. Cette partie détaille le cas particulier de la ville de Toulouse et des caractéristiques de son parc de logements

2.1. CARACTERISTIQUES CONSTRUCTIVES DU PARC TOULOUSAIN

La métropole de Toulouse, 4^e métropole après Paris, Marseille et Lyon comptabilise :

- 37 communes
- 746 900 habitants
- 458 km² (Soit 1 630 habitants/km²)

A titre de comparaison, la densité de population à Lille est de 6 692 modifier les hab./km² et celle de la métropole du grand pari de 8 689 hab./km²

Plus spécifiquement, le secteur résidentiel se compose principalement de maisons individuelles 31,4 % et d'appartement 67,8 %. Sur les 446 996 logements recensés, 90% sont considérés comme des résidences principales. La Figure 1 représente la répartition et l'ancienneté du parc de logement toulousain.

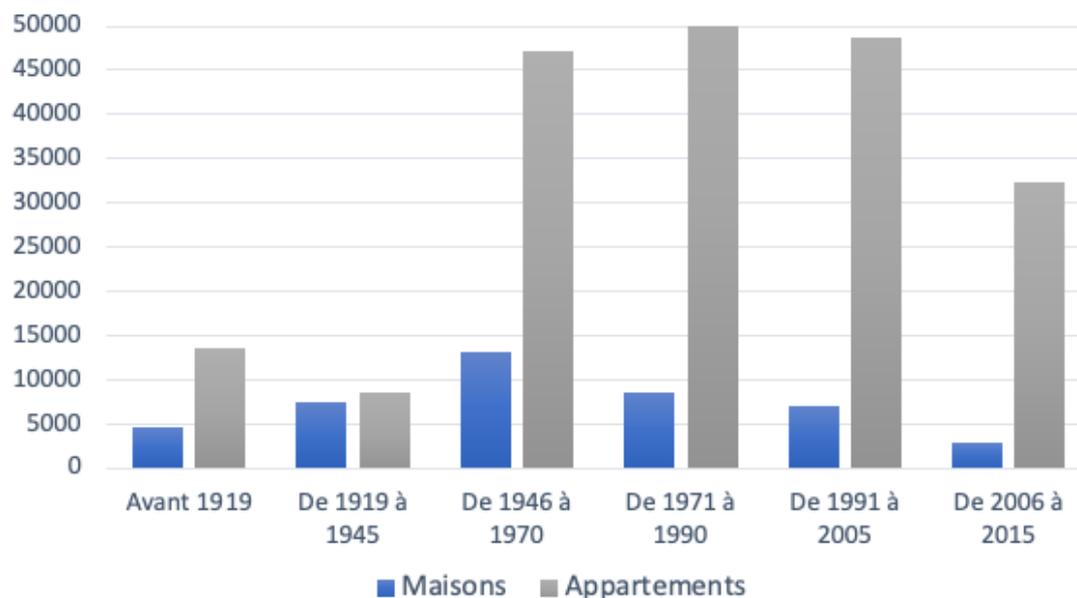


Figure 1 : Ancienneté et répartition du parc immobilier toulousain (Base de Donnée INSEE 2022 [8])

On distingue trois grandes périodes de construction : les logements construits avant 1945, les logements construits pendant les 30 glorieuses et ceux construit après 1975. Le parc toulousain est relativement récent puisque plus de la moitié des logements sont dans cette dernière catégorie. De plus, la Figure 1 montre que la majorité des logements ont été construits avant l'existence des réglementations thermique. Étudier les solutions de

rénovation associée à ces types de bâtiments est un levier important pour réduire les consommations énergétiques du parc.

En s'intéressant plus en détail à la répartition énergétique en fonction du type de logement, on constate que, bien que les maisons individuelles soient deux fois moins nombreuses, leur consommation énergétique est presque deux fois plus importante que celle des appartements (voir Figure 2)¹. Cependant, les appartements étant deux fois plus nombreux, ils représentent une cible privilégiée et ne sont donc pas à négliger. Cette disparité peut s'expliquer par la meilleure compacité des logements collectifs et la mutualisation des systèmes de chauffage pour une bonne part des appartements.

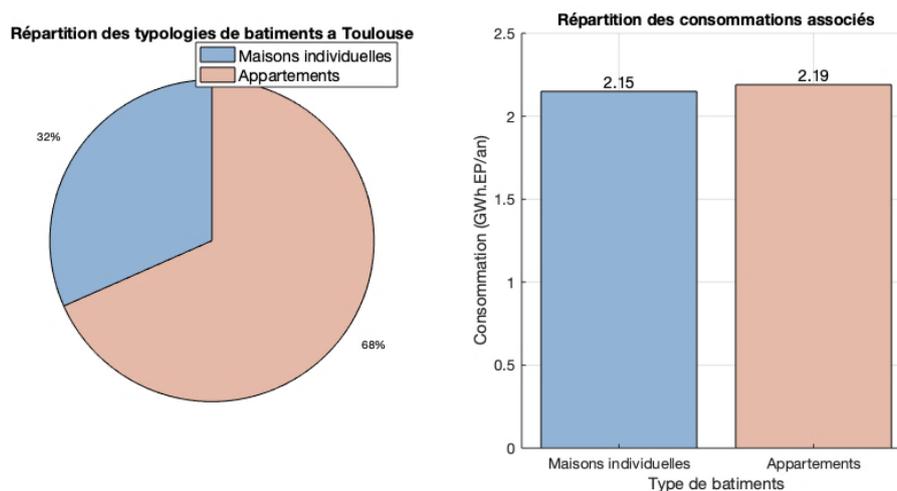


Figure 2 : Répartition des consommations énergétiques de Toulouse Métropole en fonction du type de logement [90]

¹ En comparant la part de logements individuels par rapport aux logements collectifs par villes, on constate que la proportion de maison individuelle est plus importante à Toulouse que dans d'autres grandes villes françaises. Par exemple la part de maison individuelle du parc de la métropole de Grenoble ou de Lyon est inférieure à 20 %. [9], [10]

2.2. METHODE DE REPRESENTATION DES PARCS DE BATIMENTS

Pour étudier les caractéristiques d'un parc de bâtiment et comprendre les enjeux liés à la rénovation de son territoire, il est nécessaire d'en avoir une représentation aussi fiable que possible : géométrie des bâtiments, composition de leur enveloppe, équipements, usages, etc... Or, étant donné la quantité de bâtiments considérée, il est difficile d'obtenir toutes ces informations pour l'ensemble du parc bâti. Il est alors nécessaire de faire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Pour le cas du parc de Toulouse, deux approches sont possibles. :

- L'une basée sur le relevé sur site des différentes classes de bâtiments. Les bâtiments sont ensuite classés en fonction de ce relevé.
- L'autre méthode est basée sur représentation numérique de forme architecturales simples. Les bâtiments existants seront alors classés à partir de ces formes théoriques. Proposer des solutions de rénovations pertinentes et adaptées doit donc passer par l'étude de ces deux méthodes.

Approche typologique type « relevé sur site »

L'approche de type « relevé sur site » est la plus courante. Elle permet par exemple la caractérisation des matériaux de constructions pour estimer les performances énergétiques. Cette technique permet de classer les bâtiments en fonction de leur âge, du type de construction, de la taille... ou tout autre critère prédéfini. Chaque typologie représente une classe spécifique à partir de laquelle il sera possible d'extrapoler les impacts environnementaux et définir les meilleures solutions de rénovations.

Elle revient donc à faire un relevé qualitatif et quantitatif d'un nombre limité de bâtiments existants sur le territoire. Ces initiatives souvent portées par les collectivités territoriales aboutissent à des documents de références pour déterminer des procédés de rénovations standards en fonction des types de bâtiments concernés

Différents documents traitant de la rénovation sur le territoire de l'Occitanie proposent des procédés de rénovation « standard » en fonction des types de bâtiments concernés. Par exemple l'Union régionale des Conseils d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement d'Occitanie avec le livrable : « Bâti du XXème siècle, Stratégies pour une rénovation adaptée en Occitanie » [11]. Ou encore la DREAL Occitanie avec les fiches pratiques par typologies de bâtiment « Rénovation du bâti ancien en Occitanie » [12].

Cependant ces documents sont souvent issus de démarches en faveur de la simplification des solutions de rénovation, et ne permettent donc pas d'accéder à un grand niveau de détail des différentes typologies du parc.

Approche numérique

La deuxième approche consiste à définir des caractéristiques géométriques théoriques associés à des classes typologiques. Ce classement architectural a été étendu à la totalité des

bâtiments concernés. Pour obtenir un résultat représentatif de la réalité, l'étude des critères spécifiques peut devenir complexe sur un parc de bâtiments nombreux.

Le projet MApUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Energie) [13], [14] utilise par exemple ce type d'approche. Le moteur de calcul, appelée GENIUS (GENERator of Interactive Urban blockS), permet de caractériser des types de formes urbaines à partir de données géo-spatiales propres au bâtiment. En recoupant cette typologie et l'année de construction avec la base de données des bâtiments du Laboratoire de Recherche en Architecture de Toulouse, il est possible d'apprécier les techniques de construction associées à un bâtiment. Cette base de données recense les techniques de constructions et les caractéristiques physiques des matériaux représentatives du parc de bâtiment toulousain. On y retrouve des données sur les parois, les toitures, les planchers, les vitrages, ainsi que sur la présence ou le type de ventilation mécanique.

Ce type de modélisation rend compte des caractéristiques spécifiques d'un logement en fonction de sa morphologie (emprise au sol, hauteur, compacité...), de son environnement proche ou encore de sa situation en ville.

Nous proposons dans le cas de cette étude une méthode hybride qui permet un compromis entre ces deux approches. La méthode numérique permet le classement par forme architecturale et le relevé sur site permet l'identification des méthodes de construction.

2.3. MODELISATION DU PARC DE BATIMENTS TOULOUSAIN

L'objectif de cette partie est de définir les différentes classes de bâtiments du parc de bâtiment de Toulouse. L'intérêt d'étudier les caractéristiques de constructions est la chercher des solutions de rénovations adaptées au territoire.

Plusieurs études proposent des classements de bâtiments en fonction des formes de bâtis, de dates de constructions ou de méthodes de constructions pour étudier leur efficacité environnementale. C'est notamment le cas du projet Tabula [95], Genius [96] ou encore du programme Pacte [92].

A terme, l'analyse des modélisations des consommations des bâtiments d'un territoire peut permettre d'estimer l'impact de la rénovation et l'optimisation de son impact environnemental.

2.3.1. REPARTITION PAR CLASSE D'AGE

D'après les travaux de Mailhac [14] et Tornay *et al* [13], il est généralement admis que, en France, l'évolution des techniques de construction a été fortement impactée par l'évolution du coût de l'énergie et la succession des différentes réglementations thermiques. Par conséquent, sept périodes sont retenues pour étudier la matérialité des parcs immobiliers :

- Avant 1948 : Période d'avant-guerre
- 1948/1973 : Politique de reconstruction
- 1974/1981 : 1^{er} Crash pétrolier, apparition de la 1^{ère} réglementation thermique : Politique d'économie d'énergie.
- 1982/1989 : 2^{ème} Crash pétrolier, apparition de la 2^{ème} réglementation thermique : Politique d'économie d'énergie

- 1989/2000 : Application de la 3^{ème} réglementation thermique : politique de maîtrise de l'énergie.
- 2001/2012 : Application de la 4^{ème} réglementation thermique : réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- A partir de 2013 : Application de la 5^{ème} Règlementation thermique. Mise en place d'objectifs de consommation énergétique et de production de GES à l'échelle nationale : horizon 2040.
- A partir de 2022 : Apparition de la 6^{ème} réglementation thermique

2.3.2. REPARTITION PAR FORMES ARCHITECTURALES

Mailhac reprend dans son étude les typologies GENIUS du projet MApUCE proposées par Bonhomme en 2013 [15] puis retravaillées en 2015 [13]. Le parc de bâtiments est réparti en 10 types de morphologies, elles-mêmes réparties dans 4 classes [14]. Les différentes typologies de bâtiments toulousains peuvent être classés sous :

- La classe Pavillon : elle comprend les bâtiments d'habitation de faible hauteur
- La classe Immeuble : elle s'intéresse aux bâtiments de hauteur moyenne
- La classe Immeuble de Grande Hauteur (IGH) : ce sont des bâtiments qui ont au minimum 12 étages.
- La classe des bâtiments d'activités : elle correspond aux bâtiments industriels, agricoles ou commerciaux.

La Figure 3 présente la répartition typologique par quartier, pour la ville de Toulouse.

Le centre de la ville de Toulouse est principalement composé de bâtiments historiques de type immeuble continu. La couronne suivante est principalement composée d'un mélange d'immeubles continus et discontinus. Une faible part de résidences pavillonnaire est également présente sur cette zone. Le reste du territoire est composé majoritairement de pavillons discontinus ou d'immeubles discontinus. La part respective de chaque typologie peut varier en fonction de la commune. On constate néanmoins que les terrains les plus éloignés du centre de Toulouse sont ceux comportant le plus de pavillons discontinus.

Par exemple, la ville de Toulouse comprend environ 195.000 appartements et 43.500 maisons (soit 82% d'appartements pour 18% de maisons individuelles). Pour une commune comme Grangentour, la quantité maisons individuelles est de 1.238 maisons individuelles pour 76 logements collectifs (soit 94% de maisons individuelles) [87].

Cette répartition typologique est cohérente avec le gradient de densité de population généralement observé dans les villes monocentriques comme Toulouse. Selon l'article de Le Néchet, la classification interne de la densité de population peut être définie plus spécifiquement comme étant monocentrique discontinue [16]. Il évoque notamment l'éclatement de la structure métropolitaine autour des différents centres historique. Ceci se traduit par un étalement urbain important sans continuité du bâti. L'urbanisation peut être diffuse, avec des densités dispersées.

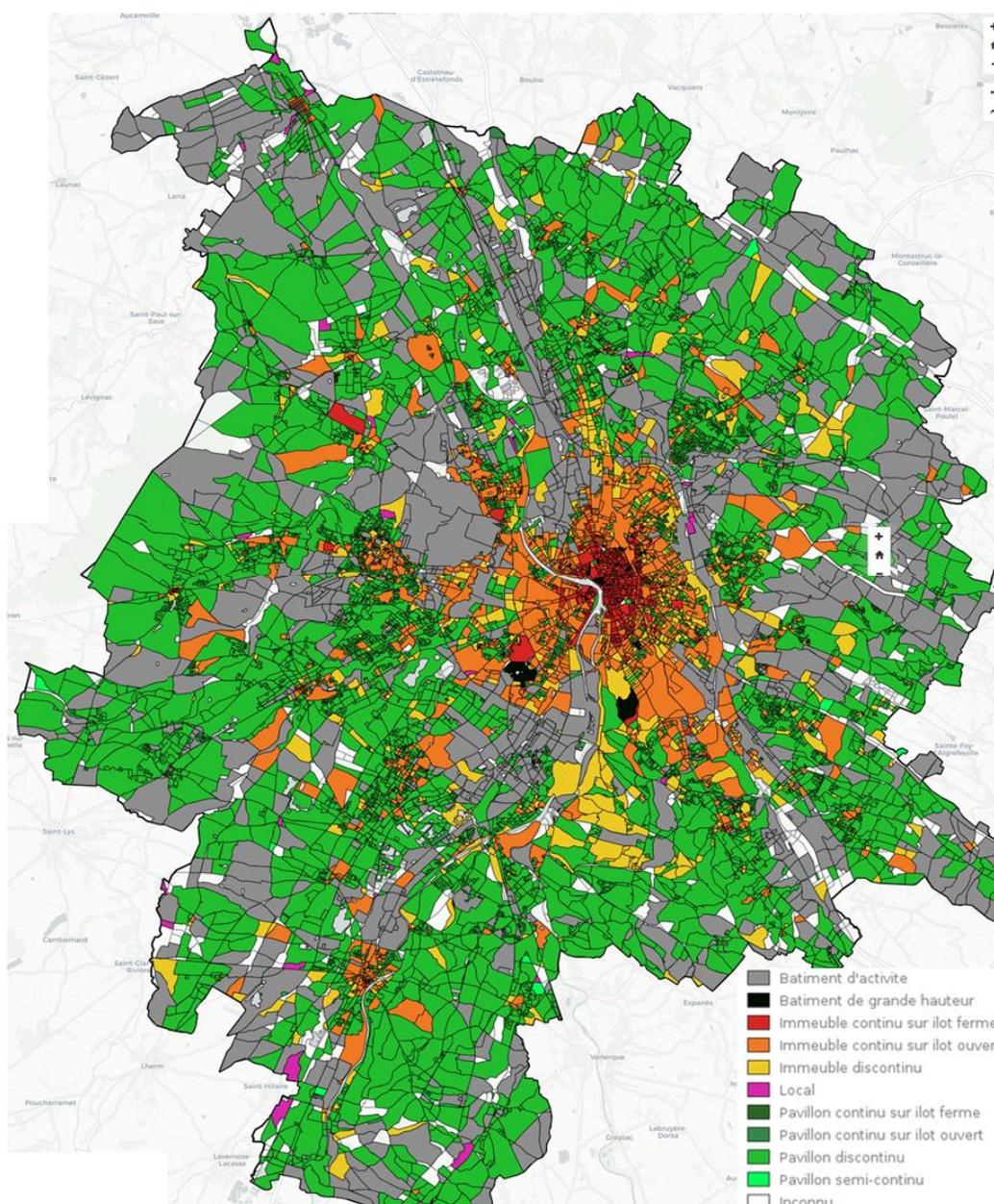


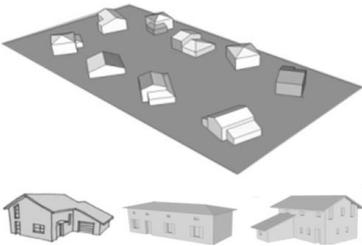
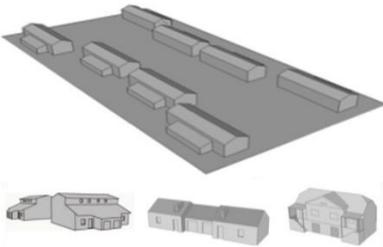
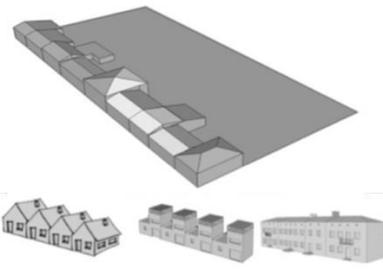
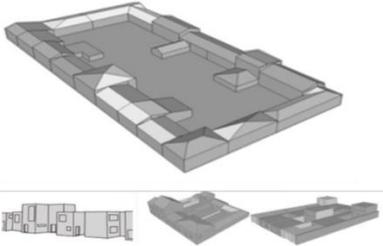
Figure 3 : Répartition typologique des différentes morphologies de bâtiment à Toulouse

2.3.3. IDENTIFICATION DES CLASSES DE CONSTRUCTIONS

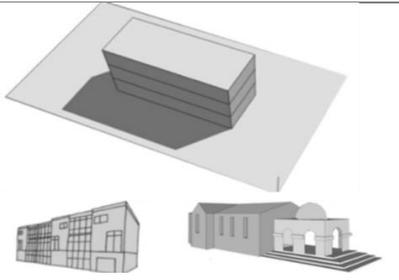
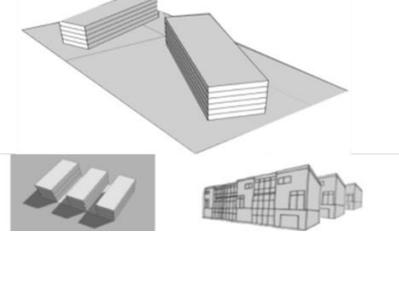
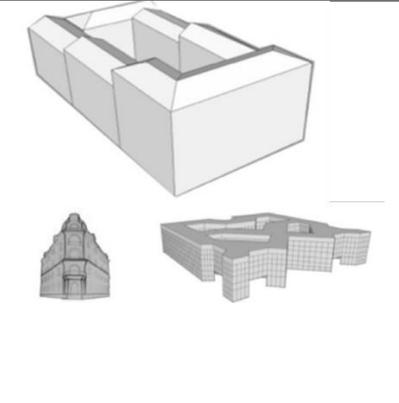
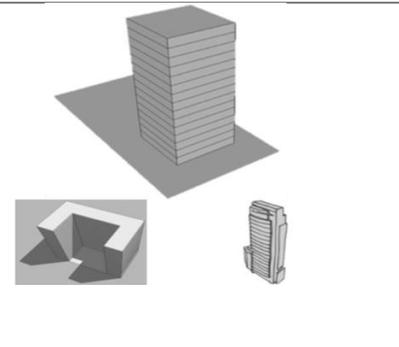
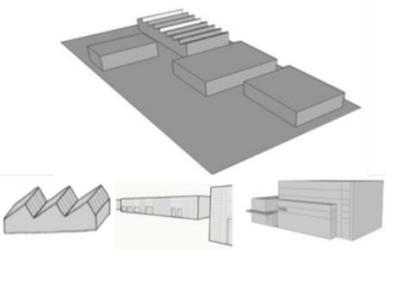
Comme cela a été fait dans le projet MApUCE, nous proposons de croiser la date de construction et morphologie pour définir des classes de bâtiments représentatives du parc toulousain. Ce sont d'ailleurs des critères retenus par Le Néchet et Sahraoui et al. pour quantifier les espaces urbain et leurs espaces résidentiels [16], [17]. Il est alors désormais possible d'attribuer des caractéristiques moyennes pour chaque classe de bâtiments : matériaux de construction, équipements, etc. ; nous permettant de modéliser le comportement énergétique des bâtiments et des scénarios de rénovation.

Cependant, les 10 classes obtenues (voir Tableau 1) couplée avec les 7 périodes de constructions génèrent un trop grand nombre de possibilités de simulations. Nous avons donc choisi de nous concentrer sur les classes de bâtiments présentant des enjeux particuliers sur le territoire Toulousain.

Tableau 1 : Description et représentation des classes typologiques en fonction des morphologies urbaines

Classe	Typologie	Description	Représentation
Pavillon	Pavillon détaché	Îlot urbain avec des maisons au moins quatre façades, en rez-de-chaussée ou R+1, elles sont souvent implantées dans le centre de la parcelle de terrain	
	Pavillon semi continu	Ce sont des typologies correspondantes à des environnements de lotissements ou des maisons jumelées	
	Pavillon continu sur îlot ouvert	Correspond aux maisons en bande de quartiers en banlieue ou en ville avec la rue d'un côté et les jardins de l'autre.	
	Pavillon continu sur îlot fermé	Correspond à l'habitat intermédiaire typique. Maison mitoyenne en bandes avec patio ou certains centre ancien	

Pavillon

	<p>Immeuble discontinu</p>	<p>Corresponds à des bâtiments de villes avec 4 façades. Ils sont souvent implantés aux centres des îlots</p>	
	<p>Immeubles continus sur îlots ouverts</p>	<p>Désigne un ensemble de bâtiments en partie aligné sur la rue dans les centres-villes ou sur les aires urbaines</p>	
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Immeuble de petite hauteur</p>	<p>Immeubles continus sur îlots fermés</p>	<p>Corresponds aux bâtiments de villes implantés un îlot fermé. Peut correspondre à un centre historique ou a des bâtiments post révolution industrielle</p>	
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Immeuble de grande hauteur</p>	<p>Immeuble de grande hauteur</p>	<p>Représente les tours ou les barres de grand immeuble. Doit disposer d'au moins 12 niveaux pour être considéré comme tel</p>	
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Bâtiment Industriels</p>	<p>Bâtiment d'activité</p>	<p>Cette typologie représente des bâtiments industriels, agricoles, des établissements de sport, etc....</p>	

Bâtiments informels Ce sont des constructions éphémères non représentés sur les plans de cadastres.

Les Figure 4 et Figure 5 représentent les proportions de logements par classes énergétique et environnementale DPE en fonction des typologies et des classes d'âges. Les classes énergétiques et environnementales correspondent aux consommations de chauffage, clim et eau chaude sanitaire. Les données obtenues proviennent d'un croisement avec la base de donnée des DPE [18].

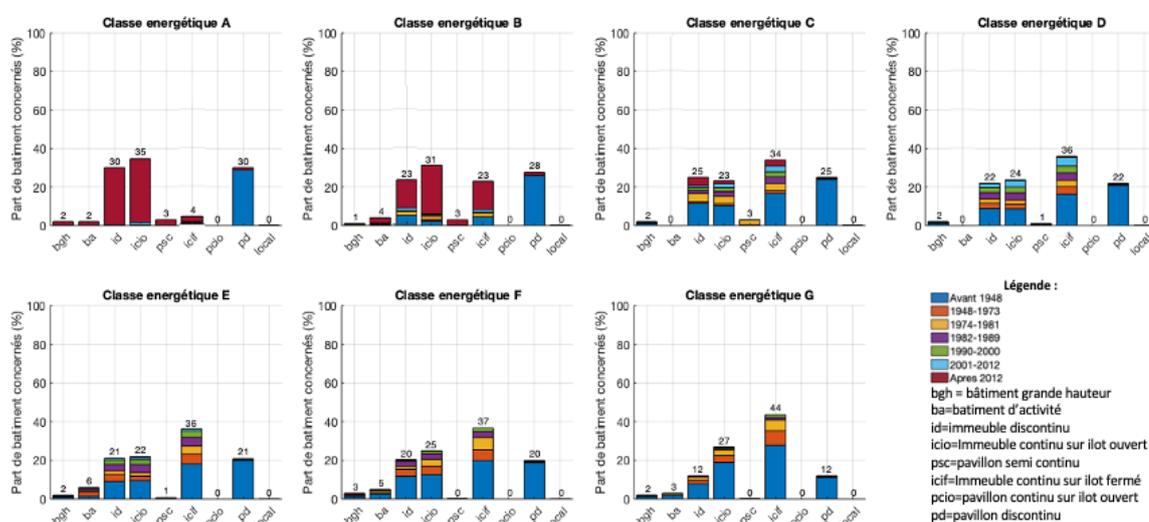


Figure 4 : Répartition des caractéristiques énergétiques DPE des bâtiments toulousains en fonction de l'âge et la typologie

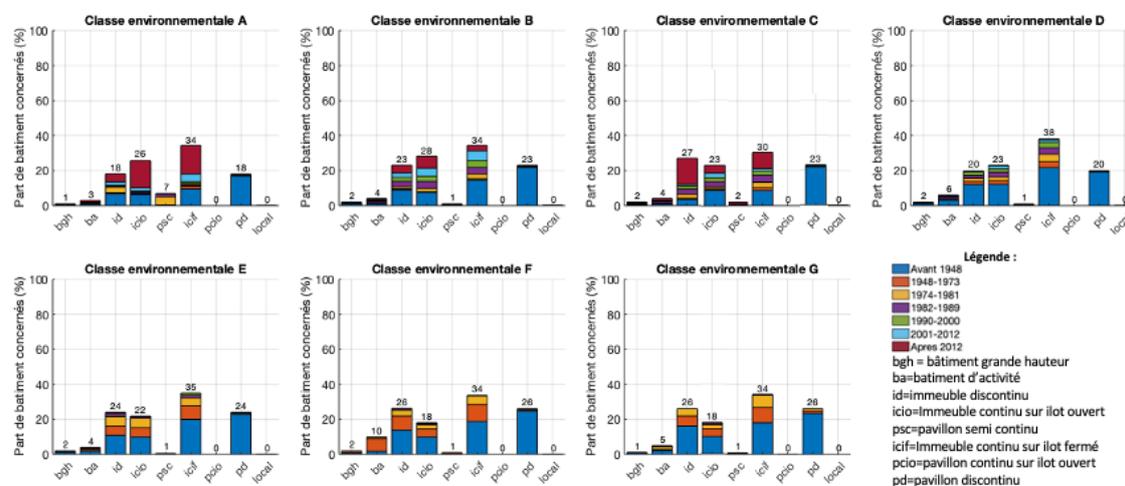


Figure 5 : Répartition des caractéristiques environnementales associées DPE des bâtiments toulousains en fonction de l'âge et la typologie

Les classes les plus efficaces (A et B) sont principalement composées de bâtiments récents alors que les moins efficaces (F et G) sont principalement représentés par des bâtiments anciens. Il est important de noter que la part de bâtiments anciens dans les premières classes montre qu'il existe un potentiel pour des rénovations ambitieuses, même sur le bâti ancien. Les classes intermédiaires sont composées de toutes les tranches d'âges.

Bien que les résultats des Figure 4 et Figure 5 soient conditionnés par le résultats du couplage de deux bases de données, les résultats obtenus semblent cohérents avec les résultats de l'étude de préfiguration menée par la ville de Toulouse [19].

En s'intéressant plus en détail à l'impact des différentes classes de constructions il est possible de définir les classes ayant le plus d'importance sur la répartition des consommations. La Figure 6 détaille cette représentation pour les classes énergétique E, F et G.

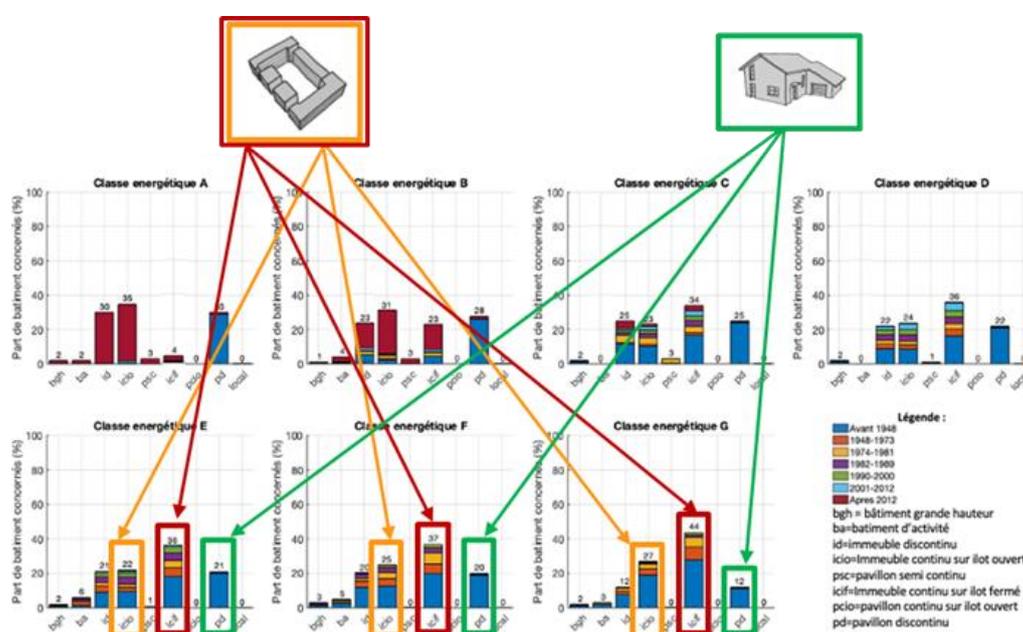


Figure 6 : Détermination des classes de construction ayant le plus d'impact.

Pour la détermination des classes de constructions morphologiques retenues, les formes architecturales retenues sont :

- Les bâtiments pavillonnaires
- Les ilots continus

Les classes d'âges les plus représentés sont :

- Avant 1948
- 1948/1973
- 1974/1981

De nombreux articles suggèrent que les logements sont partiellement ou en totalité rénovés tous les 30 à 50 ans. [20]–[23]. Il est donc légitime de penser que la majorité des bâtiments construits avant 1973 aient déjà subi des modifications. La base de construction des

bâtiments modélisé sera donc basée sur les techniques de constructions des années 1974 à 1981.

Nous avons dans cette partie sélectionné les éléments pouvant permettre de classer les documents pour étudier quels sont ceux qui ont un potentiel en rénovation sur le territoire toulousain.

La suite du document détaille la méthode de modélisation et le comportement thermique des bâtiments sur les différents scénarios de rénovations.

3. HYPOTHESES DE SIMULATION ET MODELISATION INITIALE

L'objectif de cette partie est de définir les hypothèses de modélisation et les différentes données d'entrées de la simulation thermique dynamique.

3.1. SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

Apparue dans les années 70, la simulation thermique dynamique s'est développée en parallèle des premières réglementations thermiques. La STD est définie par Bahar dans son article[24] comme un système qui prends en entrées un certain nombre de paramètres pour calculer les consommations énergétiques, le comportement thermique et le confort des occupants. La représentation de ce processus et le détail des entrées de l'algorithme sont représentés en Figure 7

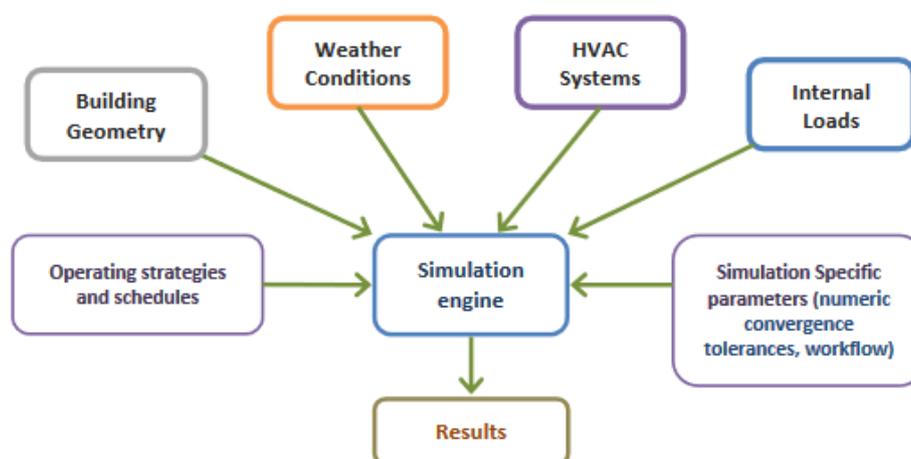


Figure 7 : Logigramme de fonctionnement d'une STD[24]

Les STD estiment les flux thermiques et énergétiques des bâtiments simulés segmentés en différentes zones thermiques. Les modèles existants se différencient par leur niveau de précision pour la prise en compte des transferts par conduction à travers les parois, de la modélisation des flux d'air, du zonage thermique, des apports internes, des apports solaires et des systèmes de CVC. Le postulat de base est que les résultats obtenus sont fidèles au comportement réel du bâtiment.

3.2. COMPARAISON DES DIFFERENTS LOGICIELS DE STD

Nous avons évoqué dans la partie précédente que les résultats d'une STD ne pouvaient être utilisables que s'il était admis que le comportement simulé était proche du comportement réel. Afin de confirmer ce principe, il est important de s'assurer d'utiliser le bon moteur de calcul et dans les bonnes conditions. Il existe en effet différents logiciels fonctionnant avec des solveurs différents. Cette partie a pour objectif la justification du moteur de calcul choisi.

Plusieurs articles s'intéressent à la comparaison des nombreux logiciels de STD[24]–[26]. Parmi le panel d'outils les trois présentés dans le Tableau 2 ont été présélectionnés sur des

critères de gamme d'utilisation et d'accessibilité. Le Tableau 2 détaille les différents domaines d'application de ces logiciels, les interfaçages disponibles et les limites d'utilisation associées.

Les méthodes de calcul utilisés dans chaque module présentés dans l'article de Mazzeo et al.[26] sont disponibles en annexe (Tableau 15). Compte tenu des objectifs de simulation et des contraintes, le simulateur retenu est EnergyPlus avec un interfaçage OpenStudio.

Tableau 2 : Comparaison des différents logiciels de STD

Logiciel	Utilisation	Interfacage	Limites
EnergyPlus	Simulation énergétique, conception et analyse thermique, charges de chauffage et de refroidissement, contrôle solaire, ombrage, éclairage naturel et artificiel, températures radiantes et opérationnelles moyennes, évaluation de cycle de vie, ACV, scheduling,	Sketchup OpenStudio DesignBuilder ArchiCad Revit	La saisie de texte la rend plus difficile à utiliser que les autres interfaces graphiques.
TRNSYS	Conception environnementale, modèle 3D, conception et analyse thermique, charges de chauffage et de refroidissement, contrôle solaire, ombre portée, vents dominants et flux d'air, systèmes électriques, photovoltaïques et à hydrogène, ACV.	Sketchup	Aucune hypothèse sur le bâtiment ou le système n'est faite (bien que des informations par défaut soient fournies). L'utilisateur doit donc disposer d'informations détaillées sur le bâtiment et le système et saisir ces informations dans l'interface TRNSYS.
Design Builder	DesignBuilder Conception environnementale, modèle 3D (conception 3D), conception et analyse thermique, charges de chauffage et de refroidissement, éclairage naturel et artificiel, qualité de l'air intérieur, températures radiantes et opérationnelles moyennes, humidité, émissions de CO ₂ , protection solaire, transmission de la chaleur, protection solaire, programmation.	Sketchup ArchiCad Revit	Une gamme de systèmes CVC courants est disponible à partir de l'interface utilisateur de DesignBuilder, mais les utilisateurs qui ont besoin d'une gamme plus large de différents types de CVC doivent exporter les fichiers d'entrée IDF d'EnergyPlus.

3.3. METHODE DE REPRESENTATION DES DIFFERENTS INDIVIDUS

Cette partie s'intéresse au choix des différents bâtiments sélectionnés pour représenter le cas du parc toulousain. Quel sera le bâtiment modélisé et comment s'assurer que les conclusions obtenues puissent être étendues à l'autre bâtiment de Toulouse.

De manière théorique, deux choix sont possibles :

- **La modélisation de bâtiments théoriques** censés être une représentation moyenne des caractéristiques de l'intégralité des bâtiments concernés dans le parc : Cette méthode a l'avantage d'être plus facile à appliquer et à étendre à l'ensemble des bâtiments du parc. Son caractère théorique permet de s'affranchir de la grande quantité de documents nécessaires aux entrées de la STD. Elle requiert en revanche la définition de critères morphologiques et la génération de formes urbaines simplifiées. Les résultats obtenus seront aussi moins précis au cas par cas, car applicables au plus grand nombre de bâtiments. A titre d'exemple, on peut citer Tathiane Martins qui détaille un modèle dans sa these (voir Figure 8) [27].

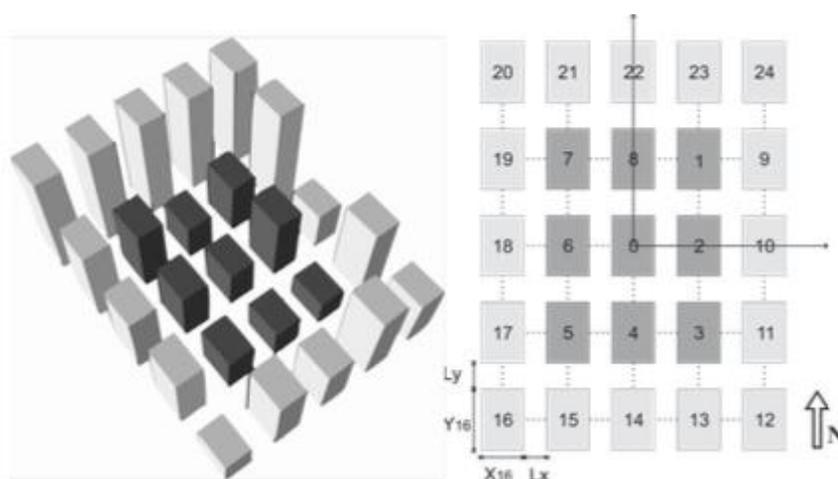


Figure 8 : Modèle urbain simplifié selon Martins [27].

- **La modélisation de bâtiments réels** représentatifs de leurs classes morphologiques : Cette approche a l'avantage d'être plus précise sur la simulation en elle-même. Étant basé sur des données de constructions réelle, les résultats obtenus seront donc eux aussi plus proche de la réalité. La modélisation est donc plus facile et se présente plus comme une étude de cas. De fait, il ne sera pas possible d'étendre les résultats aux restes de bâtiments de la même typologie pour calculer des indices d'améliorations globaux. C'est par exemple la méthode que proposent Cornaro et al. dans leur article sur la rénovation du bâti ancien [28]. Les résultats obtenus ne sont valides que pour ce bâtiment précis.



Nous avons évoqué dans un précédent rapport qu'un processus de rénovation nécessitait de faire des choix sur des domaines corrélés. Que choisir un matériau ou un équipement CVC a un impact sur les consommations énergétique, l'impact environnemental, la qualité de l'air, le confort thermique... etc [29].

C'est pour cette raison que cette démarche doit se faire au cas par cas pour correspondre aux besoins des occupants et du bâtiment. De ce point de vue la modélisation de bâtiments réels pourrait sembler la plus adaptée pour représenter les améliorations possibles en rénovation.

Pourtant, pour établir un guide des bonnes pratiques, il est important de pouvoir étendre les résultats obtenus au reste des bâtiments qui ont la même technologie de construction. L'étude doit donc revêtir un certain caractère théorique.

La méthode retenue est donc une hybridation entre les deux méthodes. Les modélisations seront théoriques mais basées sur des formes de bâtiments existantes dans des quartiers existants. Les données issues des bases de données IGN, INSEE et du moteur de calcul GENIUS serviront à identifier le bâtiment le plus représentatif d'une classe morphologique. La géométrie de ce bâtiment et de ses masques proches seront reproduits. Les données constructives seront elles théoriques pour être applicables au plus grand nombre de bâtiments. Cette méthode sera détaillée et explicitée pour la première classe typologique. Par soucis de redondance elle se ne sera pas détaillée pour les autres typologies.

3.4. IDENTIFICATION D'UN INDIVIDU REPRESENTATIF PAR CLASSE TYPOLOGIQUE

Cette partie s'intéresse à la détermination d'un bâtiment représentatif dans l'ensemble de son groupe d'individus. Les données constructives associées seront étudiées dans un second temps.

3.4.1. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse en composante principale est une méthode statistique de réduction de dimensions pour l'étude de grandes quantités de données. Elle permet de construire des modèles pour représenter graphiquement un grand nombre d'individus (ici les bâtiments) décrits par un grand nombre de variables (ici, les variables sont les caractéristiques morphologiques des bâtiments : hauteur, surfaces, compacité, etc.).

Étudier une base de données d'individus (ici les bâtiments du parc toulousain) qui sont décrits par plus de 3 variables corrélées limite les modes de représentations des données. Il faudrait à tracer autant de graphiques qu'il existe de corrélations. Une ACP permet de

passer l'espace de la base de donnée à n dimensions en un espace dimension réduite tout en déformant le moins possible la réalité. Pour cela, de nouvelles variables sont construites à partir de la combinaison des anciennes. Graphiquement, les axes correspondants à ces variables permettent une projection de tous les individus dans un espace réduit (en 2 dimensions par exemple). C'est pour cette raison que l'ACP est une méthode dite d'analyse factorielle linéaire. De manière générale, les opérations à réaliser pour réaliser une ACP sont les suivantes :

- Le centrage et la réduction des données pour uniformiser les effets des unités.
- Mesure des distances euclidiennes entre chaque individu
- Recherche de la direction spatiale dans laquelle le nuage de point est le plus dispersé. Ce sera le premier axe principal.
- On modélise un sous espace dans le plan orthogonal a cet axe principal.
- Toutes les données sont projetées dans ce nouveau plan. La deuxième direction principale sera définie comme la direction ou le nuage de point sera le plus dispersé dans le plan du sous espace
- Cette méthode est réitérée jusqu'à avoir couvert l'intégralité des dimensions de la base de données.
- En fonction de l'inertie du nuage de point il est possible de sélectionner les variables de représentation du nuage de point projeté

3.4.2. DETERMINATION DES VARIABLES UTILES A L'ETUDE MORPHOLOGIQUE

Comme expliqué précédemment, la réalisation d'une analyse en composantes sur les données des bâtiments du parc de Toulouse Métropole permet d'identifier le bâtiment le plus représentatif de la classe de construction. Nous souhaitons sélectionner un bâtiment représentatif de chaque classe de bâtiment sectionnée au chapitre « **2.3.3 Identification des classes de constructions** ». La première étape est de sélectionner les variables les plus significatives pour faire ce choix.

Dans un premier temps, l'objectif est de trier les différents critères de classifications typologiques. Les différentes variables à notre disposition dans la base de données Mapuce sont disponibles dans le Tableau 3. Ce sont ces critères qui serviront a déterminer les bâtiments les plus représentatifs de chaque classe.

Le processus d'ACP est ici détaillé pour la classe des pavillons discontinus. Bien que les graphiques d'études ne soient pas présentés ici, la méthodologie est similaire pour les autres classes.

Tableau 3 : Variables de la base de données Mapuce à l'échelle du bâtiment.

Variable	Description
hauteur_origin	Hauteur de la Bd Topo
hauteur	Hauteur corrigée (formule)
nb_niv	Nombre de niveaux (formule)
perimeter	Périmètre du bâtiment
area	Surface au sol du bâtiment
floor_area	Surface de plancher
vol	Volume du bâtiment
compactity_r	Compacité brute
compactity_n	Compacité nette
compactness	Compactness
form_factor	Facteur de forme
concavity	Concavité
main_dir_deg	Direction principale (en degré)
b_floor_long	Longueur de façade (= périmètre)
b_wall_area	Surface de mur
p_wall_long	Longueur de façade mitoyenne
p_wall_area	Surface de façade mitoyenne
nb_neighbor	Nombre de bâtiments voisins
free_p_wall_long	Longueur de façade libre
free_ext_area	Surface de façade libre
contiguity	Contiguïté
p_vol_ratio	Volume passif
fractal_dim	Dimension fractale
min_dist	Distance minimale à une autre bâtiment
mean_dist	Distance moyenne ...
max_dist	Distance maximale ...
std_dist	Ecart-type de la distance ...
num_points	Nombre de points de la géométrie
l_tot	Périmètre extérieur (sans les trous)
l_cvx	Longueur convexe du bâtiment
l_3m	Longueur de façade à moins de 3m d'une route
l_ratio	Ratio entre l_tot et l_3m
l_ratio_cvx	Ratio entre l_cvx et l_3m
insee_individus	Nombre d'individus calculé à partir des données carroyées (200m) de l'INSEE

L'étude de corrélation des variables sur les différents axes en annexe permet de sélectionner les différentes variables d'études retenues. Ce travail, détaillé en annexe B est conforme à l'étude menée par Alexandre AMOSSÉ dans la cadre du projet européen Mapuce [30].

3.4.3. IDENTIFICATION D'UN INDIVIDU REPRESENTATIF DANS LE PARC DE BATIMENT

L'étude d'une typologie de bâtiment revient à définir un élément représentatif d'une classe d'individus et écarter les individus atypiques pour obtenir une représentation de la réalité. Identifier un bâtiment réel représentatif de cette caractérisation théorique revient à définir

les caractéristiques médianes du parc pour chaque classe architecturale. Connaître les caractéristiques des bâtiments les plus classiques permet ici de cibler l'étude sur territoire toulousain et étudier dans les simulations les solutions les plus adaptées à ses caractéristiques architecturales.

La méthode statistique retenue pour cette identification est un algorithme de recherche du médoïde. Le médoïde correspond à l'individu (ici le bâtiment) le plus proche de la moyenne Euclidienne théorique. Pour cela l'algorithme calcule la distance euclidienne pour définir le centre théorique du nuage de points. Le point le plus proche de ce centre sera considéré comme étant le plus représentatif.

Dans le cadre de notre parc de notre parc de bâtiments, le calcul du centre du nuage de point est fait sur les variables sélectionnées grâce à l'ACP et au projet Mapuce [30]. Le graphique d'identification est disponible en Figure 9. Grace aux coordonnées GPS associées à la base de données Mapuce, il est possible de connaître l'adresse du bâtiment. Sa localisation est disponible en Figure 10.

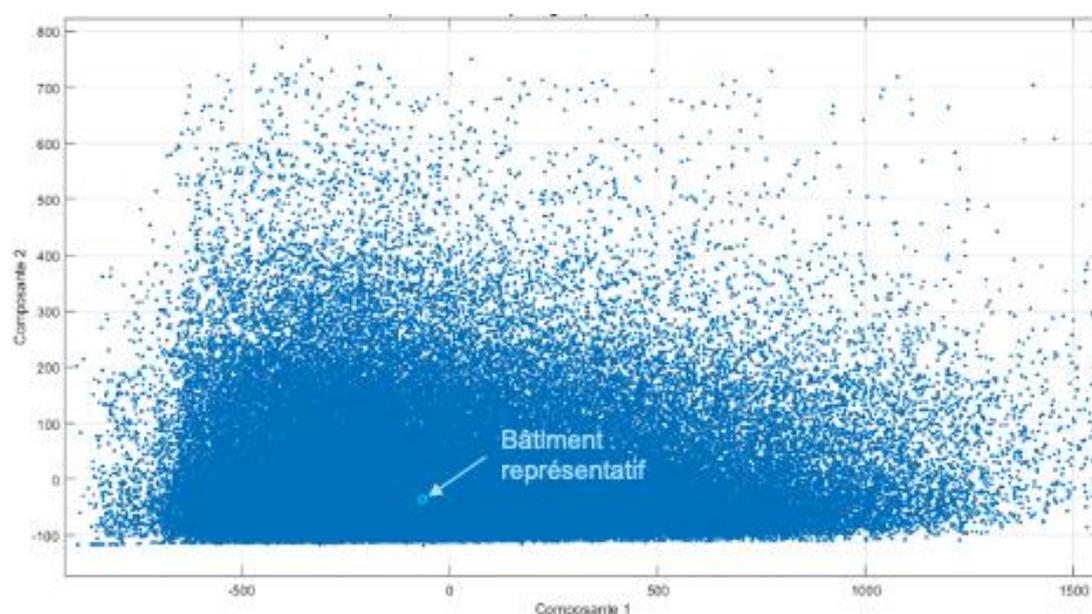


Figure 9 : Identification du bâtiment représentatif parmi l'ensemble des pavillons discontinus sur le territoire Toulouse Métropole

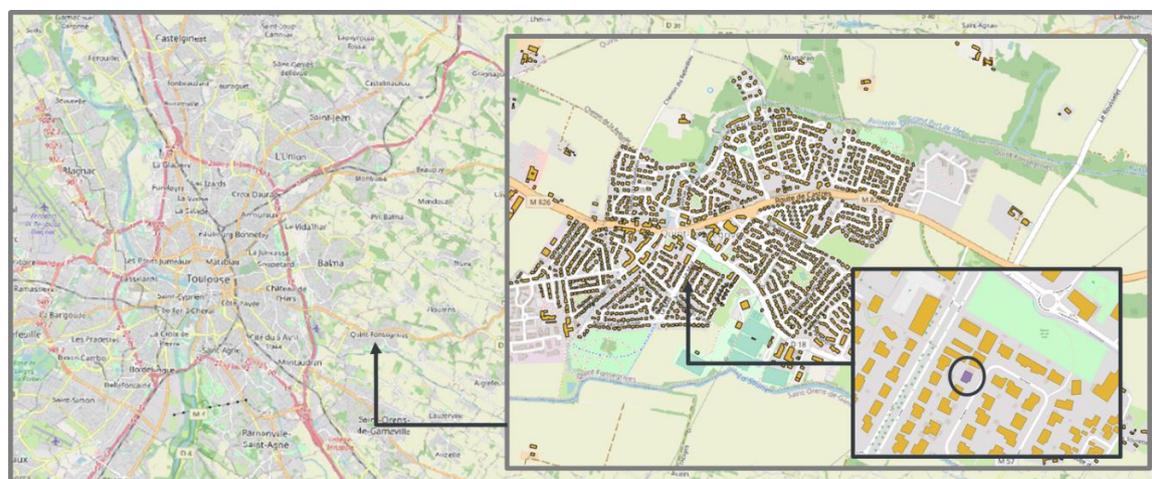


Figure 10 : Localisation du bâtiment représentatif pour la classe morphologique pavillon discontinu

3.5. HYPOTHESES GEOMETRIQUES

Le logigramme de la Figure 7 détaille les différentes entrées d'une STD. Cette partie s'intéresse spécifiquement aux hypothèses des spécifications géométriques des bâtiments modélisés. Nous avons établi dans la partie précédente la méthode d'identification des bâtiments à numériser en fonction de leur caractéristique architecturale. Les différentes typologies de bâtiment seront donc traitées indépendamment.

3.5.1. BATIMENT PAVILLONNAIRE

Pour la typologie de bâtiments pavillonnaires, le plus représentatif de cette classe architecturale a été identifié dans la commune de Quint-Fonsegrives. Une photo du bâtiment en question est présentée à la Figure 11.



Figure 11 : Photo du bâtiment représentatif de la classe typologique pavillon discontinu toulousain

La construction de la modélisation numérique du bâtiment doit donc s'appuyer sur les caractéristiques réelles de ce bâtiment. C'est le cas de la forme, des masques proches, du positionnement des vitrages...etc.

Certaines données de la base Mapuce sont connues pour ce bâtiment et l'ensemble des bâtiments pavillonnaires (voir Tableau 4). Adelaïde Mailhac[14] propose également dans son manuscrit de thèse différents critères morphologiques (voir Équations (1) et (2)). Le plan d'implantations est disponible en Figure 12.

Tableau 4 : Données caractéristiques typologiques des PD de la base de données Mapuce

Critères morphologiques PD			
Caractéristiques du bâtiment in situ		Caractéristiques théoriques du bâtiment	
Nombre de niveaux	1	Nombre d'occupants	2,32
Surface	138	CES	0,12
Emprise au sol	171	Densité de végétation	0,23

Hauteur	4m	Nombre de bâtiments voisins	0
Compacité	4,8	Surface	172,58
Contiguïté	0	Hauteur	5,23

$$S_{cloison} = Surface\ Plancher \times 0.37 \quad (1)$$

$$S_{refend} = Surface\ Plancher \times 0.222 \quad (2)$$

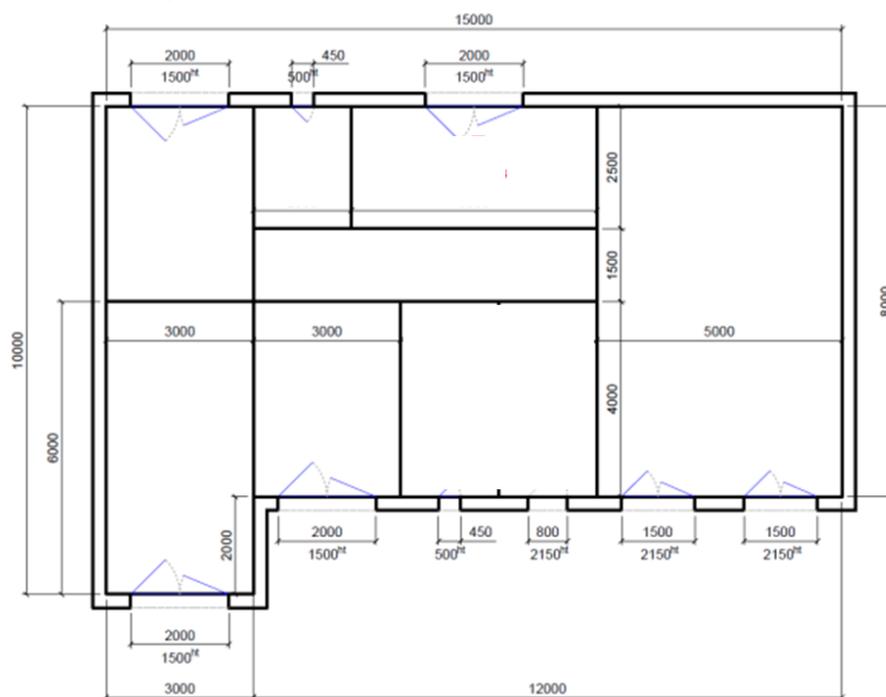


Figure 12 : Plan du bâtiment modélisé pour la typologie architecturale bâtiment pavillonnaire

3.5.2. IMMEUBLES D'HABITATION

Dans la catégorie des immeubles continus, le bâtiment identifié comme étant le plus représentatif se situe dans le centre de Toulouse (voir Figure 13). Une photo du bâtiment en question est présentée à la Figure 14. C'est un bâtiment de 4 étages mitoyen sur une sa façade nord est.

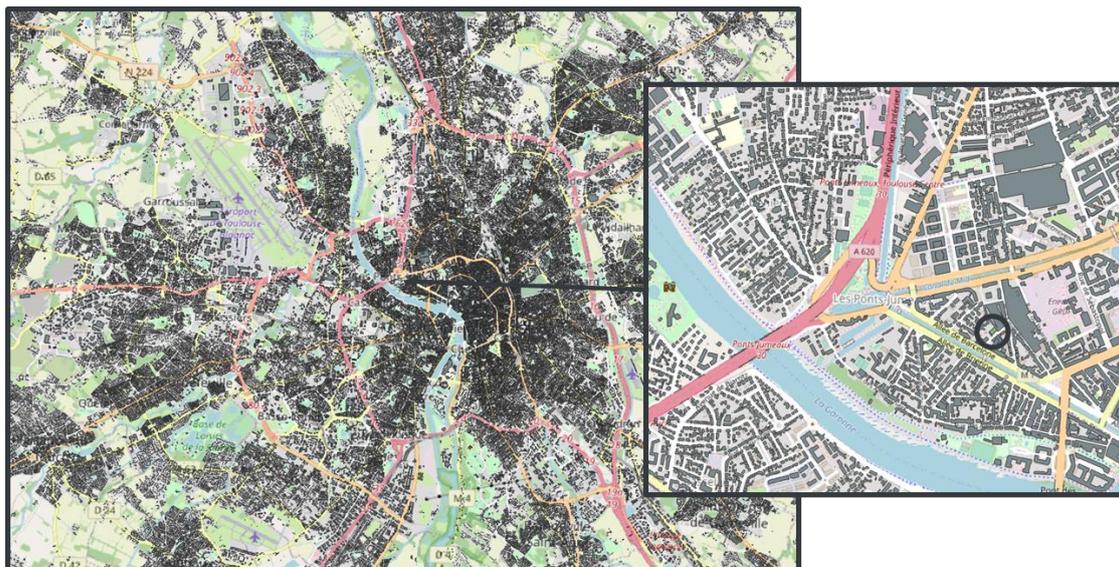


Figure 13 : Localisation du bâtiment représentatif pour la classe morphologique immeuble continu



Figure 14 : Photo du bâtiment représentatif de la classe typologique immeuble continus toulousains

Ici également, la modélisation pour la simulation s'appuie sur les caractéristiques réelles du bâtiment. C'est le cas de la forme, des masques proches, du positionnement des vitrages...etc.

Les données de constructions sont issues de la littérature et du travail d'Adelaïde Mailhac[14] effectué pour sa thèse. Voir Tableau 6 et équations (3) et (4)

Tableau 5 : Données caractéristiques typologiques des IC de la base de données Mapuce

Critères morphologiques IC			
Caractéristiques du bâtiment in situ		Caractéristiques théoriques du bâtiment	
Nombre de niveaux	4	Nombre d'occupants	25
Surface	6286m ²	CES	0.48
Emprise au sol	1350m ²	Densité de végétation	0.1
Hauteur	15.86	Nombre de bâtiments voisins	0
Compacité	6.46	Surface	
Contiguïté	0.333	Hauteur	

$$S_{cloison} = Surface\ Plancher (0.1803 + 0.0883 \times indice_{compacité}) \quad (3)$$

$$S_{refend} = 0.4063 + Surface\ Plancher \times 3.489 \times 10^5 \quad (4)$$

3.6. HYPOTHESES DE CONSTRUCTIONS

Il a été établi dans les parties précédentes que la méthode de construction d'une habitation pouvait être déterminée en fonction de son âge et sa classe architecturale pour une zone géographique donnée (voir 2.3.3 : Identification des classes de constructions).

En France, plusieurs projets ont eu pour objectifs de définir ces méthodes de constructions à partir de ces critères :

- Le guide ABC : Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974. Ce livre est un guide pour la rénovation énergétique intégrant des enjeux transverses tels que le confort d'été, l'humidité dans les parois, l'aération, l'acoustique, la sécurité incendie, l'accessibilité aux personnes handicapées, etc. [7]
- La classification TABULA : projet EPISCOPE. Dans l'objectif de rendre le processus de rénovation du logement européen accessible et efficace, la base de données TABULA détaille des typologies nationales de bâtiments, représentant le parc immobilier des différents pays européens [31].
- Les deux rapports rédigés dans le cadre des accords du Grenelle de l'environnement : le programme RAGE et le projet PACTE [10]. Dans ce dernier projet, un rapport propose de structurer le parc résidentiel existant en 26 familles constructives (10 maisons individuelles et 16 immeubles collectifs) et de renseigner leurs caractéristiques urbaines, architecturales, constructives et techniques.

Adelaïde Mailhac[14] propose dans son manuscrit de thèse, l'élaboration d'une base de donnée appelée base de donnée Danube qui détaille les méthodes de constructions des

bâtiments par classe d'âges et de typologies. Son travail s'est basé sur les différents projets présenté ci-dessus ainsi que la littérature scientifique.

Dans le cadre de notre projet I-HEROS, nous utiliserons comme référence les données de la base Matériaux proposé par le LRA dans le cadre du projet Mapuce En parallèle, les échanges organisés par enrobât ont permis de réunir un grand nombre de professionnels de la rénovation à Toulouse pour discuter du sujet. Cet évènement sur la mobilisation des acteurs de la rénovation énergétique des logements privés en occitane portait sur la définition de méthodes de rénovations génériques adaptés au territoire. Ces échanges ont permis de préciser certains points de la base de données pour qu'ils soient représentatifs des méthodes de constructions de l'occitanie.

3.6.1. BATIMENTS PAVILLONNAIRES

Les hypothèses de constructions pour le bâtiment pavillonnaire modélisés sont disponibles dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Présentation des hypothèses de construction pour la modélisation PD

Pavillon discontinu : période construction 1974-1981					
Composition Murs		Composition Toit		Composition Planchers	
Porteur	Épaisseur (cm)	Porteur	Épaisseur (cm)	Plancher	Épaisseur (cm)
Brique Creuse	20	Bois	0	Dalle béton	20
Isolant	Épaisseur (cm)	Isolant	Épaisseur (cm)	Isolant	Épaisseur (cm)
ITI_laine minérale	6	ITI_laine minérale	10	Non	0
Revêtement intérieur	Épaisseur (cm)	Revêtement extérieur	Épaisseur (cm)	Revêtement intérieur	Épaisseur (cm)
Plaque plâtre	1.3	Tuiles	2	Carrelage	1
Revêtement extérieur	Épaisseur (cm)	Revêtement intérieur	Épaisseur (cm)		
Enduit	2	Plaque plâtre	1.3		

Systèmes		Vitrage	
Ventilation	Ventilation naturelle	Pourcentage	25%
Type de chauffage	Chaudière fioul 20 kW	Protection	Store intérieur
Rendement de la chaudière	70%	Type Menuiserie	Simple vitrage
Émetteurs	Radiateurs eau chaude	Type ouverture	Française
Température du bouclage	75°C/65°C		
ECS	Chaudière a fioul		
Volume du ballon	100L		

3.6.2. IMMEUBLES D'HABITATION

Les hypothèses de constructions pour les immeubles continus modélisés sont disponibles dans le Tableau 6.

Tableau 7 : Présentation des hypothèses de construction pour la modélisation IC

Immeuble continu : période construction 1974-1981					
Composition Murs		Composition Toit		Composition Planchers	
Porteur	Épaisseur (cm)	Porteur	Épaisseur (cm)	Plancher	Épaisseur (cm)
Parpaing	20	Bois	0	Dalle béton	20
Isolant	Épaisseur (cm)	Isolant	Épaisseur (cm)	Isolant	Épaisseur (cm)
ITI lame d'air	1	∅	0	Non	0
Revêtement intérieur	Épaisseur (cm)	Revêtement extérieur	Épaisseur (cm)	Revêtement intérieur	Épaisseur (cm)
Plaque plâtre	1.3	Tuiles	2	Carrelage	1
Revêtement extérieur	Épaisseur (cm)	Revêtement intérieur	Épaisseur (cm)		
Enduit	2	∅	0		

Systèmes		Vitrage	
Ventilation	Simple flux autoréglable	Pourcentage	20%
Type de chauffage	Chaudière gaz 180 kW	Protection	Store intérieur
Rendement de la chaudière	70%	Type Menuiserie	Simple vitrage
Émetteurs	Planchers chauffants	Type ouverture	Française
Température du bouclage	55°C/45°C		
ECS	Chaudière gaz		
Volume du ballon	500L		

3.7. HYPOTHESES DE MODELISATION

Les parties précédentes du document établissent que la Simulation Thermique Dynamique est une méthode calculatoire permettant modéliser numériquement les caractéristiques de l'habitation pour résoudre les équations de transfert thermique appliquées au bâtiment. Les résultats obtenus permettent de comprendre le comportement thermique et énergétique du bâtiment étudié.

Pour que le résultat obtenu soit fidèle au comportement réel, la modélisation doit être la plus proche des spécifications techniques et du comportement réel du bâtiment. Nous avons déjà établi les spécifications techniques des deux bâtiments dans les parties précédentes. Cette partie s'intéresse à l'utilisation que peuvent avoir les occupants dans leur bâtiment. Compte tenu de la volonté d'adaptation de l'étude à l'ensemble des bâtiments du parc Toulousain, il est nécessaire d'aborder une démarche globale. Trois grands axes ont été retenus dans la littérature scientifique :

- Certains scénarios d'utilisation du bâtiment sont disponibles via le site du logiciel EnergyPlus. Ils sont associés à certaines typologies de bâtiments plus ou moins proches de l'étude de ce projet I-HEROS [32]
- Il existe en Europe différentes normes codifiant le domaine de la performance et la modélisation numérique des bâtiments. Par exemple la norme ISO 17772-1 [33] et la norme EN 16798-1 [34]
- Enfin, certains chercheurs ont proposé des modèles préconstruits basés sur l'interprétation des normes pour faciliter et généraliser la modélisation numérique de bâtiments types [35].

C'est sur ce dernier point que sont basés les hypothèses de simulations. Le Annexe-C

Tableau 16, disponible en annexe, détaille des différents scénarios établis pour un jour type pour les différents types de bâtiments. Ils seront répartis dans les différentes zones thermique des bâtiments pour correspondre au plus proche de l'utilisation que pourrait avoir un occupant du bâtiment. L'article en question détaille les autres scénarios.

3.8. VALIDATION DE LA SIMULATION INITIALE

Cette partie a pour objectif de présenter les résultats obtenus lors du calcul de la modélisation des bâtiments initiaux.

Les Figure 15 représentent les courbes d'évolutions des températures d'air dans les différentes zones thermiques du bâtiment d'habitation pavillonnaire. Durant la période de chauffage, les températures moyennes journalières sont comprises entre 19 et 23 °C en fonction des pièces. Durant la période estivale, le bâtiment est en évolution libre. Les évolutions de température des zones thermique est asservie par la météo. La température entre les pièces peut ici aussi varier de plusieurs degrés.

Ceci s'explique par une fluctuation des apports thermiques en fonction des pièces. Elle traduit une différence d'équipements et d'occupation. Les asymétries d'exposition des baies au soleil peuvent aussi avoir un fort impact sur les écarts de températures intérieurs.

Pour cette typologie, la suite des résultats présentés (voir partie : 4. *Etude des résultats de simulation*) concerneront systématiquement la pièce la plus défavorable.

Les Figure 16 représentent les courbes d'évolutions des températures d'air dans les différentes zones thermiques du bâtiment d'habitation collectif. Durant la période de chauffage, les températures moyennes journalières sont variables en fonction de l'avancée de la saison. Durant la période estivale le bâtiment est en évolution libre. Les évolutions de température des zones thermique sont liés aux évolutions de la température extérieures. La température d'air entre les zones thermiques est similaire. Bien que l'orientation ait un impact, la symétrie de construction du bâtiment permet d'expliquer le comportement (voir partie : 4.1 *Etude de l'Impact de l'orientation*)

Pour cette typologie, la suite des résultats présentés (voir partie : 4. *Etude des résultats de simulation*) pourront seront transposables aux autres zones thermiques.

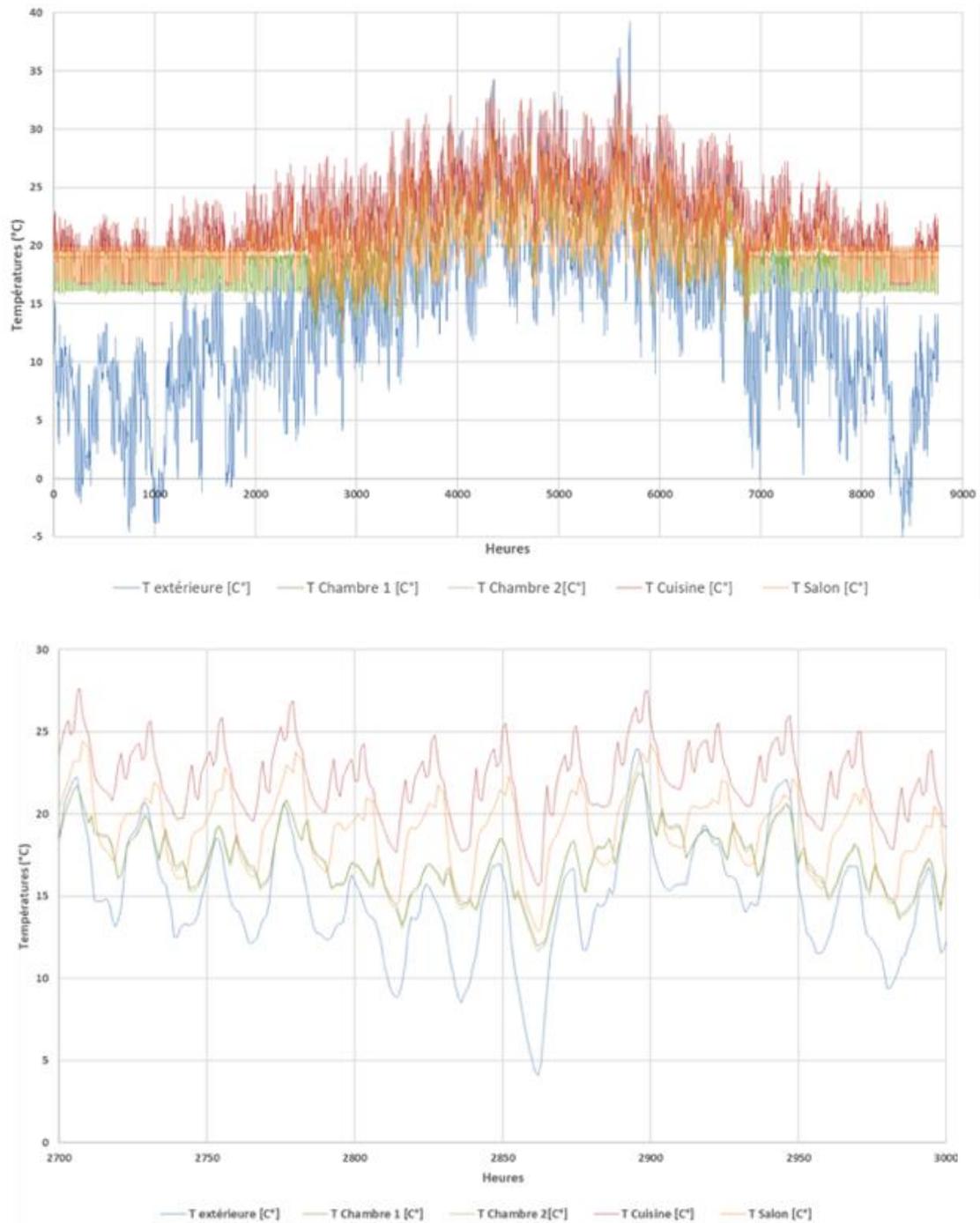


Figure 15 : Etude des courbes de températures d'air de la modélisation initiale par zones thermiques bâtiment pavillonnaire

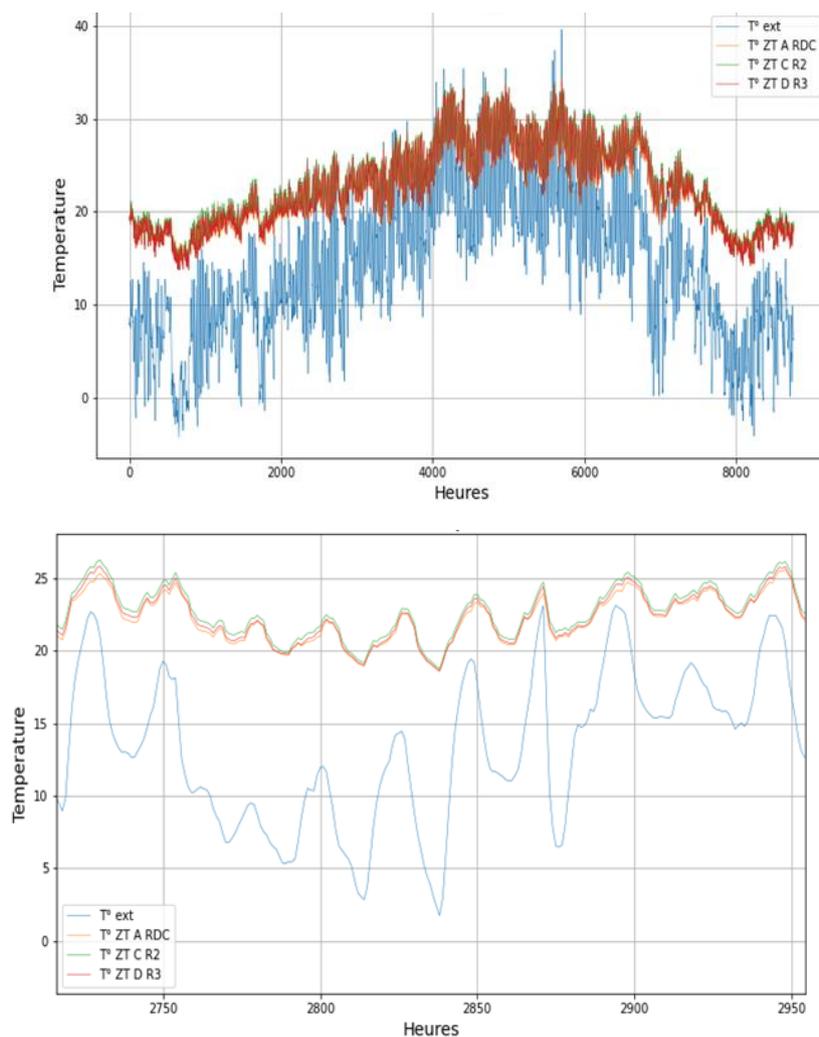


Figure 16 : Etude des courbes de températures d'air de la modélisation initiale par zones thermiques immeuble d'habitation

La Figure 17 représente sur l'échelle des DPE, la consommation énergétique des modélisations initiale des deux typologies sélectionnées. Représenté en kWh.EP/m².an, les résultats obtenus pour cette simulation initiale coïncident avec les chiffres de la base de données des DPE, de l'étude de préfiguration de Toulouse Métropole et de l'étude préliminaire menée dans le cadre du projet I-HEROS.

C'est pour cette raison que les modifications de construction simulée sont transposables au comportement thermique du bâtiment.

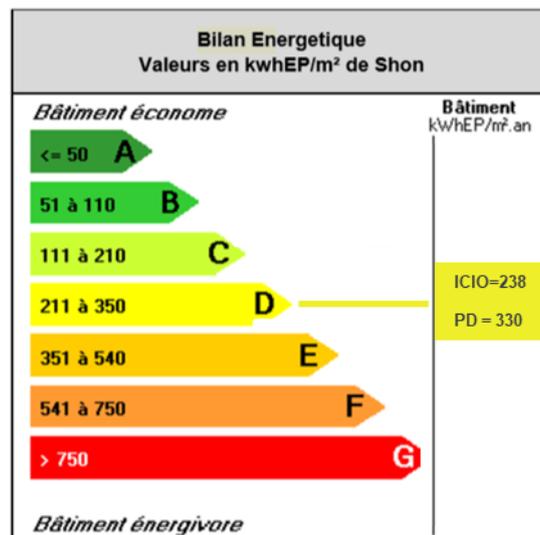


Figure 17 : Consommation énergétique des modèles de simulation initiaux

4. ETUDE DES RESULTATS DE SIMULATION

4.1. ETUDE DE L'IMPACT DE L'ORIENTATION : BATIMENT COLLECTIF

Cette partie a pour objectif de d'étudier l'impact de l'orientation sur la thermique et les consommations du bâtiment collectif. Plusieurs variantes sont comparées en fonction de l'orientation de la pièce étudiée. Les graphiques en Figure 18 présentent ces résultats

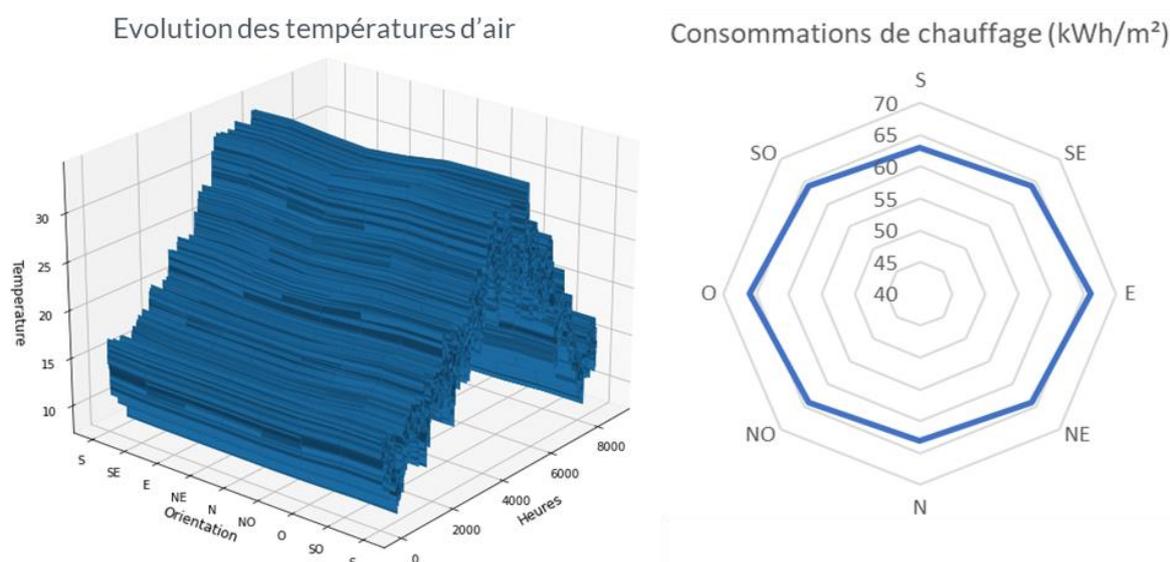


Figure 18 : Etude des températures d'air et des consommations de chauffage en fonction de l'orientation du bâtiment ICIO

L'évolution des températures d'air ne semble pas être très dépendante de l'orientation pour cette modélisation. Une explication possible est la faible isolation de l'enveloppe du bâtiment. La température d'air intérieure serait donc très corrélée à la température extérieure. Par ailleurs, les loggias jouent un rôle de protections solaires importantes, réduisant la sensibilité des logements aux surchauffes provoquées par une surexposition des baies sur les orientations Sud, Est et Ouest. On note cependant des températures légèrement plus élevées pendant les périodes estivales sur les orientations Est et Ouest. En effet, le soleil se situe alors bas dans la voute céleste et irradie directement les baies sans que les protections solaires puissent être efficaces.

Du point de vue des consommations énergétiques de chauffage, l'évolution semble peu impactée par l'orientation géographique. Le bâtiment étant symétrique, on observe des résultats identiques sur les orientations opposées. Logiquement, on note des consommations plus faibles sur les orientations Nord-Sud (bons apports solaires hivernaux en façade Sud selon le principe du bioclimatisme) et plus élevées sur les orientations Est et Ouest (apports solaires uniquement en début et fin de journée).

4.2. ETUDE DE L'IMPACT DE LA VENTILATION SUR LE CONFORT THERMIQUE D'ETE : BATIMENT COLLECTIF

Cette partie a pour objectif de démontrer l'intérêt de la maîtrise des flux de ventilation dans un bâtiment. Deux variantes du bâtiment collectif seront comparées en ventilation naturelle et en ventilation contrôlée simple flux. Les aspects de thermiques, d'énergétiques et de confort thermique seront prises en compte.

La Figure 19 représente l'évolution de la température d'air dans des pièces jugées représentatives du comportement thermique de l'immeuble étudié. Les évolutions de températures d'air sont comparées entre elles (courbes vertes et oranges). La courbe violette représente la différence des deux heures par heures.

Du point de vue de la thermique, en hiver, mieux maîtriser la ventilation permet d'éviter les infiltrations et de gagner plusieurs degrés. En été, l'augmentations des infiltrations permet de faire de la sur-ventilation. Couplé avec des matériaux ayant de l'inertie thermique, il est possible de gagner jusqu'à 5°C sur les températures d'air. Les Figure 20 s'intéressent plus en détail au confort thermique estival.

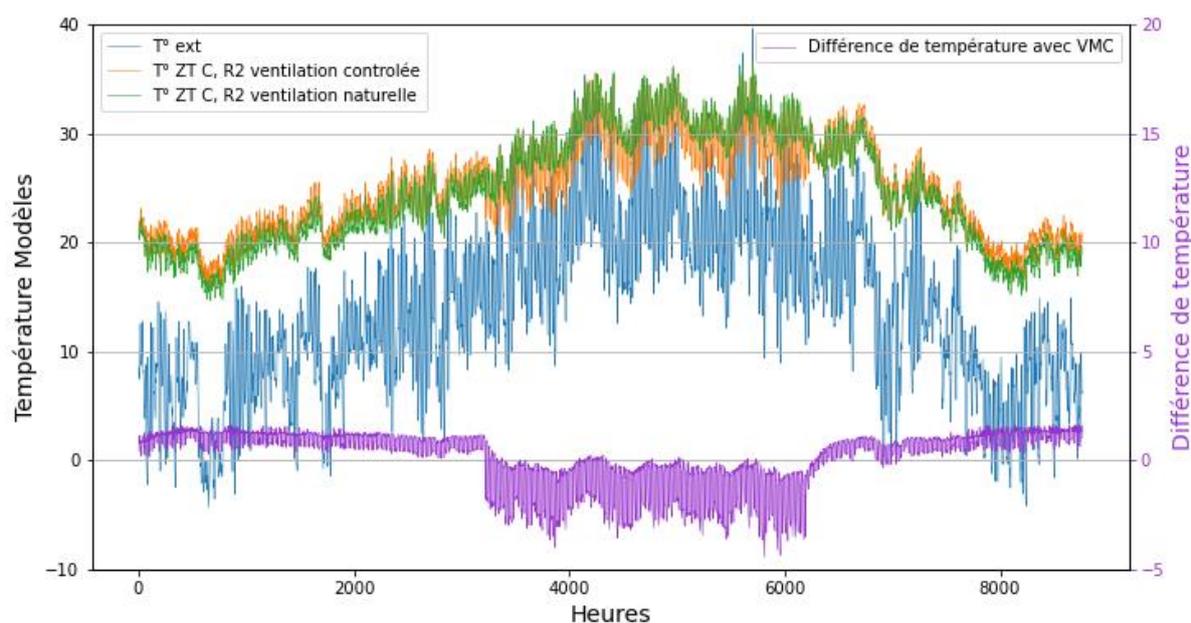


Figure 19 : Evolution des températures d'air annuelle dans le bâtiment ICIO, Etude de l'impact de la ventilation

Les modèles de Confort Thermique Adaptatif prédisent les conditions dans lesquelles les gens sont susceptibles d'être en situation de confort dans les bâtiments. Cet indice dynamique est une approche du confort basée sur les adaptations comportementales des occupants. Cette adaptation est considérée comme un processus à double sens. Les gens s'adaptent à leur environnement thermique en modifiant leurs vêtements, leurs postures ou leurs activités. Ils adaptent également leur environnement thermique à leurs besoins par

des actions telles que l'ouverture des fenêtres, le réglage des stores. Toutes températures dépassant cette zone seront jugées potentiellement inconfortables [36]–[39].

L'expression de la zone de confort (Figure 20) correspond à une ambiance de confort idéale, soit un pourcentage de satisfaction maximal. Plus la température opérative s'écarte de la zone théorique, plus la part d'insatisfaits sera élevée. Il existe un grand nombre d'indices et de façons de calculer la zone de confort en fonction des différents pays et climats. Le modèle retenu est celui issu de l'étude SCATs (Smart Controls and Thermal Comfort) qui est plus représentatif des climats européens [40].

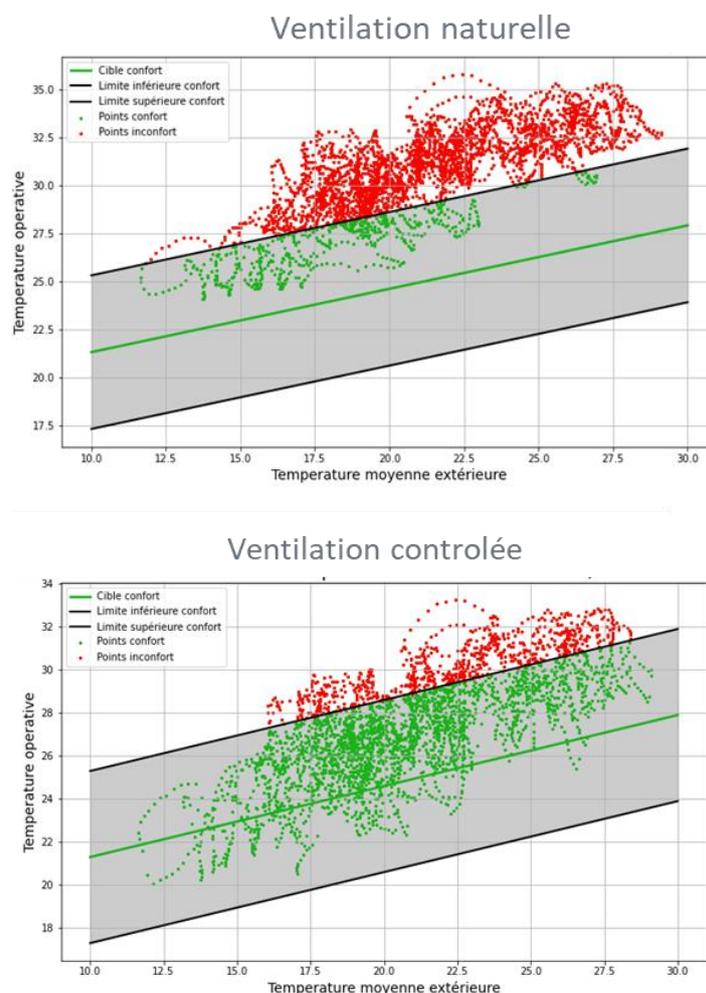


Figure 20 : Etude de l'impact de la ventilation sur le confort d'été annuel dans le bâtiment ICIO

L'utilisation d'une ventilation mécanique permet donc une meilleure maîtrise des infiltrations et de la gestion des flux d'air dans le bâtiment. Sur la période de chauffage elle permet une réduction des consommations de chauffages de 7%. Dans notre cas le gain de consommation électrique imputable au système de ventilation est du même ordre de grandeur. Par ailleurs, cette technologie de construction, l'utilisation de la sur-ventilation nocturne permet de réduire le dépassement de la limite de confort de plus de 1000 heures. Ce type de système permet également une bien meilleure maîtrise de l'humidité et de la qualité de l'air intérieure.

4.3. ETUDE THERMIQUE ET ENERGETIQUE DES SOLUTIONS DE RENOVATIONS COURANTES : TOUTES TYPOLOGIES

Cette partie s'intéresse à la modélisation et la simulation de deux scénarios de rénovation « classiques » pour les typologies étudiés. Les résultats des solutions proposés seront étudiés sous différents domaines de performances : Énergétique, thermique et confort estival.

4.3.1. DESCRIPTIF DES SENARIOS DE RENOVATIONS

Les deux solutions de travaux proposés dans les Tableau 8 et Tableau 9 sont voulues représentative des techniques de rénovations couramment employés en rénovations. Pour cela le choix des bouquets de travaux s'appuie sur les documents de synthèse de la littérature scientifique, de l'ADEME et des différentes collectivités territoriales [7], [10]–[12], [31], [41]–[44].

Pour les deux typologies, l'étude se compose de deux niveaux de rénovation. Le niveau 1 correspond à une isolation de l'enveloppe. Le niveau 2 correspond à une rénovation complète.

Tableau 8 : Compositions simulés pour les cas de rénovation 1 et 2 pour le bâtiment pavillonnaire

Rénovation de Niveau 1	Rénovation de Niveau 2
Isolation des murs = ITI 10cm	Isolation des murs = ITE 15cm
Isolation plancher haut = ITI 15 cm	Isolation plancher haut = ITE 20 cm
	Isolation plancher bas ITE = 15cm
	Double vitrage phonique
	VMC simple flux HygroB
Régulation de la chaudière fioul sur capteur de température extérieure	Chaudière à condensation gaz
Installation de robinets thermostatiques	Émetteurs eau chaude basses températures (type radiateurs ou plancher chauffant)

Tableau 9 Compositions simulés pour les cas de rénovation 1 et 2 pour l'immeuble collectif

Rénovation de Niveau 1	Rénovation de Niveau 2
Isolation des murs = ITI 10cm	Isolation des murs = ITE 15cm
Isolation plancher haut = ITI 15 cm	Isolation plancher haut = ITE 20 cm
	Isolation plancher bas ITE = 15cm
	Double vitrage phonique
	VMC simple flux HygroB
Régulation de la chaudière fioul sur capteur de température extérieure	Chaudière à condensation gaz
Installation de robinets thermostatiques	Emetteurs eau chaude basses températures (type radiateurs ou plancher chauffant)

4.3.2. GAIN ENERGETIQUE SUR LES CONSOMMATIONS DE CHAUFFAGE

Le graphique de la Figure 21 présente les résultats obtenus pour l'étude des modifications de rénovation des solutions 1 et 2 (respectivement M1 et M2) pour les deux typologies de bâtiments.

La Figure 21 représente le gain énergétique réalisé grâce aux deux scénarios de rénovation. Les postes de l'éclairage et des équipements spécifiques sont inchangés entre les différentes simulations. Cette étude s'intéresse uniquement aux consommations liées aux déperditions thermiques. Les consommations de ce poste est propre à l'utilisation des occupants. Les valeurs forfaitaires représentés sont issues de la littérature scientifique (voir partie « 3.7 Hypothèses de modélisation »).

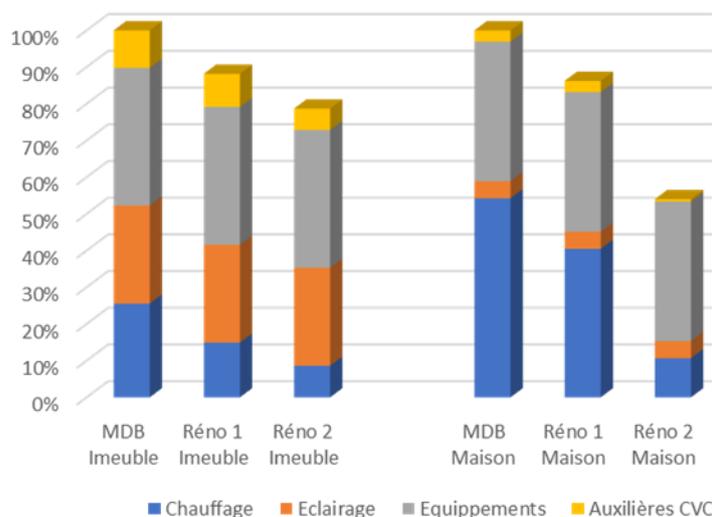


Figure 21 : Simulation des consommations en fonction des solutions de rénovations M1 et M2

Du point de vue énergétique, pour les deux bâtiments, la réalisation d'une rénovation globale est bien plus impactant que la réalisation d'une rénovation légère. Le dimensionnement et la maîtrise de la régulation des équipements CVC a ici un très fort impact sur les consommations de chauffages.

Le scénario de rénovation légère correspond à l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment et une reprise de la régulation des systèmes de chauffages. Le faible impact de la solution M1 peut s'expliquer de la sorte :

- Le pavillon discontinu disposait déjà d'une isolation de faible épaisseur
- L'immeuble a une bonne compacité et il est mitoyen avec un autre bâtiment, les surfaces déperditives sont donc limitées.

4.3.3. ETUDE DE L'EVOLUTION DES TEMPERATURES D'AIR

Les Figure 23 et Figure 22 représentent les résultats des températures d'air pour les modélisations des scénarios de rénovation 1 et 2.

Le scénario 1 comporte une isolation par l'intérieur (ITI) et le scénario 2 une isolation par l'extérieur (ITE). Le scénario 2 comprend aussi un remplacement de la VMC et donc une meilleure maîtrise des équipements de ventilation.

Ici, l'ITE permet de limiter les ponts thermiques et d'augmentant l'inertie thermique des parois.

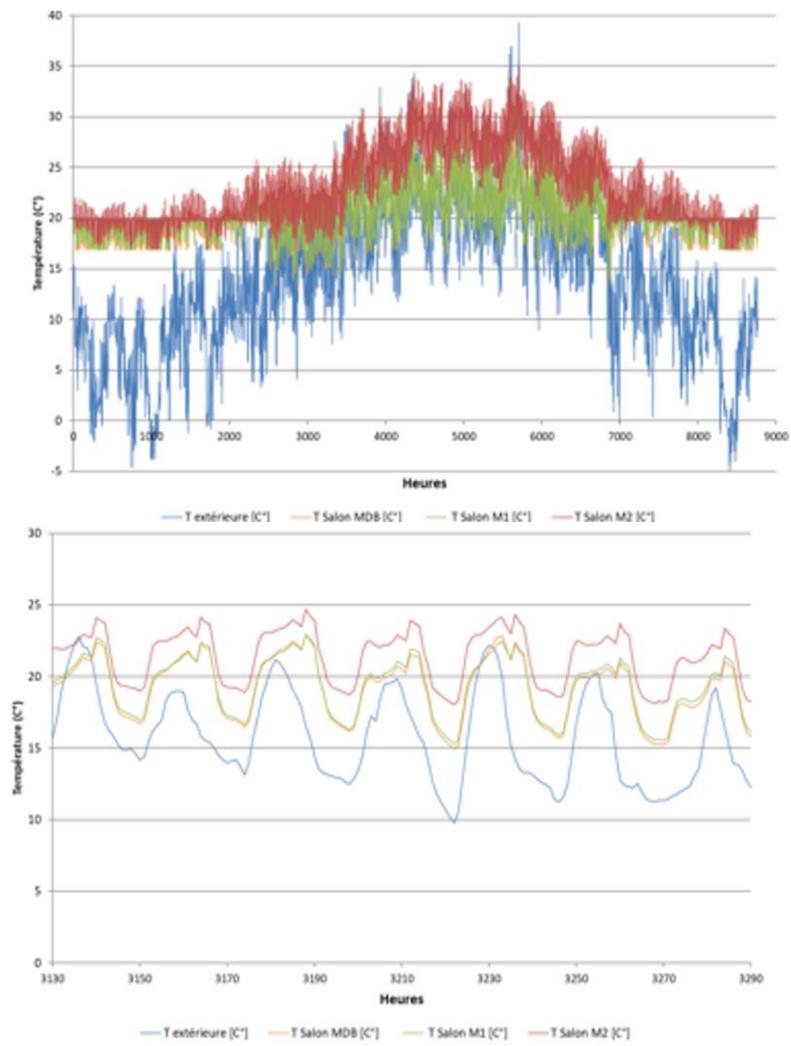


Figure 22 : Évolution des températures d'air pavillon individuel pour les solutions M1 et M2

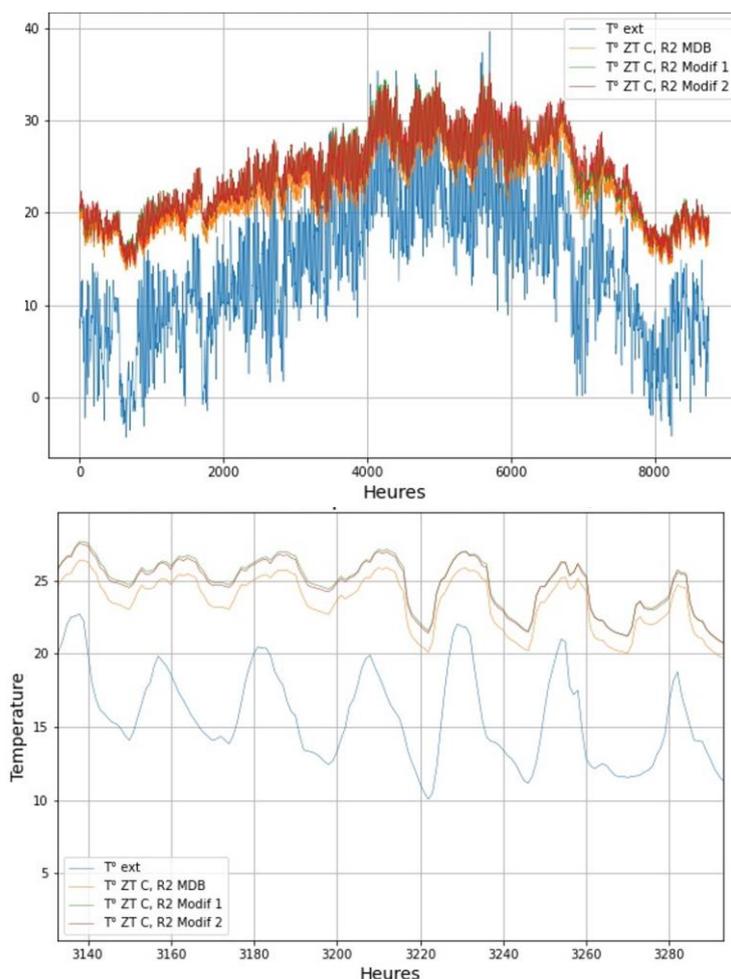


Figure 23 : Évolution des températures d'air immeuble collectif pour les solutions M1 et M2

Dans le cas des deux bâtiments, pour la période hivernale, il est possible d'observer que la température d'air des zones thermiques augmente quand la qualité de l'isolation augmente. En parallèle, la puissance du chauffage installée diminue entre la modification M1 et la modification M2. Avec l'augmentation de la température (à cause des apports qui sont moins dissipés), les besoins de puissance de chauffage diminuent.

L'amélioration de l'isolation des parois consiste à installer un matériau de faible conductivité thermique pour limiter les échanges entre le côté chaud et le côté froid de la paroi concernée. Couplé à un bon système de ventilation, la réduction de déperdition permet de limiter l'impact du climat extérieur sur l'ambiance intérieure. Ceci permet donc de diminuer les consommations des systèmes de chauffage et climatisation. Du point de vue du confort thermique, c'est également un bon moyen de palier aux problématiques de parois froides en hiver.

Il est également possible d'observer l'impact de l'inertie thermique entre les différentes modélisations. Une grande inertie thermique est synonyme de :

- Faibles fluctuations de températures au cours de la journée.

- Un déphasage plus important avec les variations de températures extérieures.

Une bonne gestion de l'inertie thermique permet en hiver de limiter l'utilisation du chauffage la nuit. En été à l'inverse, elle permet de stocker la fraîcheur de la nuit pour la restituer pendant les heures chaudes de la journée [45]–[48].

Un mauvais dimensionnement de l'inertie thermique peut cependant avoir un effet inverse et amplifier le pic de chaleur journalier : en limitant les fluctuations de température, elle peut limiter le rafraîchissement du bâtiment pendant la nuit et conduire à une montée progressive de la température interne sous l'effet des apports thermiques. Il existe alors un risque de d'inconfort thermique important [49].

C'est pour cette raison que la partie suivante s'intéresse à l'étude du confort thermique estival dans les différentes zones thermiques.

4.3.4. ETUDE DU CONFORT THERMIQUE D'ETE

Cette partie a pour objectif d'étudier le confort thermique estival des solutions de rénovations légère et globale

Le déplacement de la température de confort est testé heure par heure, sur la période estivale, en comparant la température opérative² de la zone thermique et une température de confort. Si la température est supérieure à la température de confort durant les heures d'occupation du bâtiment, le point modélisé est écarté. La température de confort est calculée en fonction du modèle de confort thermique adaptatif.

C'est une approche du confort dynamique car elle est basée sur les adaptations comportementales. En effet l'adaptation est considérée comme un processus à double sens : les gens s'adaptent à leur environnement thermique en modifiant leurs vêtements, leurs postures ou leurs activités. Ils adaptent également leur environnement thermique à leurs besoins par des actions telles que l'ouverture des fenêtres, le réglage des stores...

Plus d'informations sur ce modèle sont disponible dans le précédent rapport du projet I-HEROS [51]

La Figure 24 présente le résultat d'application du modèle de confort thermique adaptatif au confort d'été du bâtiment pavillonnaire. La Figure 25 s'intéresse au cas des immeubles d'habitation

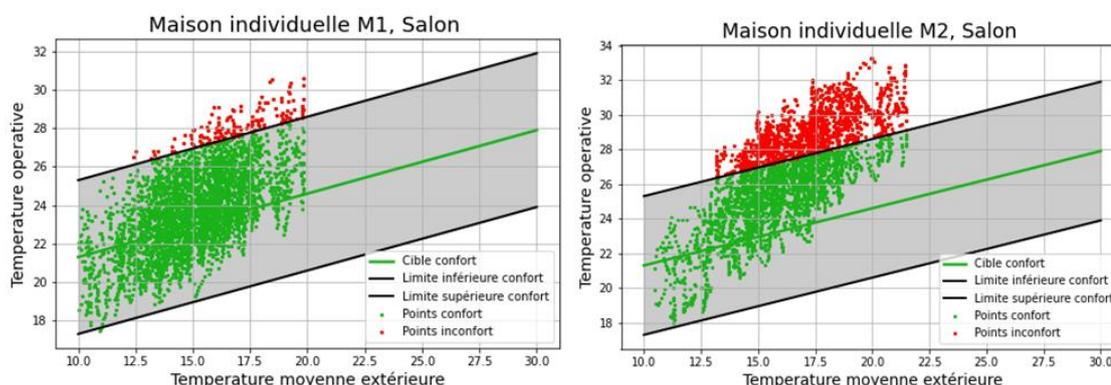


Figure 24 : Étude du confort thermique, bâtiment pavillonnaire, modification M1 et M2

² Indicateur simple du confort thermique, qui prend en compte l'effet de la convection et du rayonnement [50].

Dans le cas du bâtiment pavillonnaire, le nombre d'heures de dépassement de la limite de confort est de 150h pour la rénovation de 1^{er} niveau et de 1240h pour la rénovation de 2nd niveau.

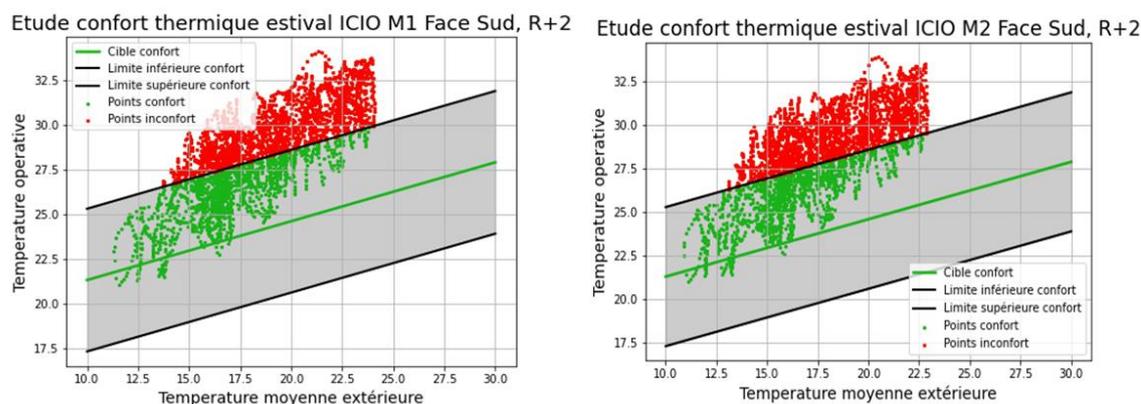


Figure 25 : Étude du confort thermique, bâtiment collectif, modification M1 et M2

Dans le cas de l'immeuble collectif, le nombre d'heures de déplacement de la limite de confort est de 1179h pour la rénovation de 1^{er} niveau et de 1720h pour la rénovation de 2nd niveau.

Dans les deux cas la deuxième solution de rénovation entraîne une forte dégradation du confort thermique estival. Bien que cette solution soit viable sur le plan énergétique et thermique en hiver, il existe un fort risque de surchauffe en été.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cet inconfort :

- L'impact des apports internes : Le premier élément susceptible de générer de la chaleur et l'utilisation du bâtiment et les équipements que peuvent utiliser les occupants (par exemple : four, ampoules, machine à laver, etc.). Couplés avec l'isolation thermique des solutions de rénovation, la chaleur générée est piégée à l'intérieur du bâtiment. [52]–[54] Il est donc primordial de limiter les apports thermiques et de les dissiper lorsque c'est possible (sur-ventilation nocturne).
- L'impact des apports externes : Bien que les apports solaires soient nécessaires en hiver pour profiter d'apports naturels, en été ils réchauffent l'air et les parois des pièces du bâtiment. Couplés avec l'isolation thermique des solutions de rénovation, la chaleur générée est piégée à l'intérieur du bâtiment. Les protections solaires des baies permettent d'éviter ce phénomène [55]. Un compromis entre le dimensionnement des protection solaire et l'accès à la lumière naturelle doit être recherché. En effet un mauvais dimensionnement des protections solaires peut engendrer un recours à des solutions d'éclairage artificiel qui engendreront alors des apports internes et des consommations d'électricité [56].
- L'impact du dimensionnement de l'inertie thermique : Si elle est trop importante et que la température nocturne est trop chaude, la chaleur stockée tout au long de la journée n'aura pas le temps de se dissiper. Le bâtiment va alors monter en température et au lieu d'amortir le pic de température journalier du jour suivant, l'inertie va l'amplifier [49], [52]. Le dimensionnement de l'inertie thermique en été est donc fortement lié au climat et à la ventilation nocturne. Rodrigues et al.[57] proposent une étude du compromis entre l'inertie thermique et la transmission thermique pour optimiser le confort d'été et les consommations énergétiques.

Fiorentini et al.[54] proposent eux une étude sur les transferts thermiques pour optimiser les consommations énergétiques. Les climats concernés par ces études sont spécifiquement secs et chauds

Nous venons de voir que le comportement thermique du bâtiment ainsi que le dimensionnement des systèmes pouvant limiter les surchauffes estivales est fortement dépendant de la position géographique et du climat au quel est soumis le bâtiment. En effet, le dimensionnement d'une protection de baie dépend de la course solaire et la qualité de l'inertie thermique est conditionnée par les évolutions météorologiques. C'est pour cette raison que la suite du document s'intéresse à l'étude du climat et de l'impact qu'il peut avoir sur le choix d'une solution de rénovation.

4.4. ETUDE DE L'IMPACT DU CLIMAT

Nous venons de prouver que le comportement thermique du bâtiment, au travers de l'enveloppe, les habitudes de vie et les usages des bâtiments a un très fort impact sur les besoins associés à la ventilation et aux systèmes de chauffage/climatisation. Pourtant la rigueur du climat qui fixe les conditions aux limites et l'étude. Elle est donc à l'origine des transferts de chaleur. C'est en fonction de ces besoins spécifiques au lieu et à l'usage que doivent être choisis et comparés les systèmes de chauffage, de ventilation et les émetteurs les plus adaptés.

Les deux climats choisis pour cette étude sont les fichiers météo de la ville de Hambourg en Allemagne et le scénario de projection de IPCC RCP 4.5 2040 pour Toulouse.

L'IPCC est un groupe de chercheurs travaillant sur les connaissances et les conséquences du changement climatique d'origine humaine. Les différents scénarios RCP représentent une large gamme de changement possible dans les émissions de gaz à effet de serre en tenant compte d'hypothèses socio-économiques. Les fichiers météo associés représentent la conséquence de ces émissions [58].

Le scénario RCP 4.5 est décrit par le GIEC comme un scénario intermédiaire. Les émissions dans le RCP 4.5 atteignent un pic autour de 2040, puis diminuent progressivement [59], [60]

4.4.1. ETUDE DE LA SIMULATION SOUS DIFFERENTS CLIMATS

L'objectif de cette partie est de montrer l'impact du climat sur le comportement thermique d'un bâtiment.

La Figure 26 représente les résultats de la simulation su scénario de simulation 2 pour trois climats différents. En bleu le climat de Hambourg, en orange le climat de Toulouse et en vert la projection d'un scénario de climat possible d'ici 2040 à Toulouse.

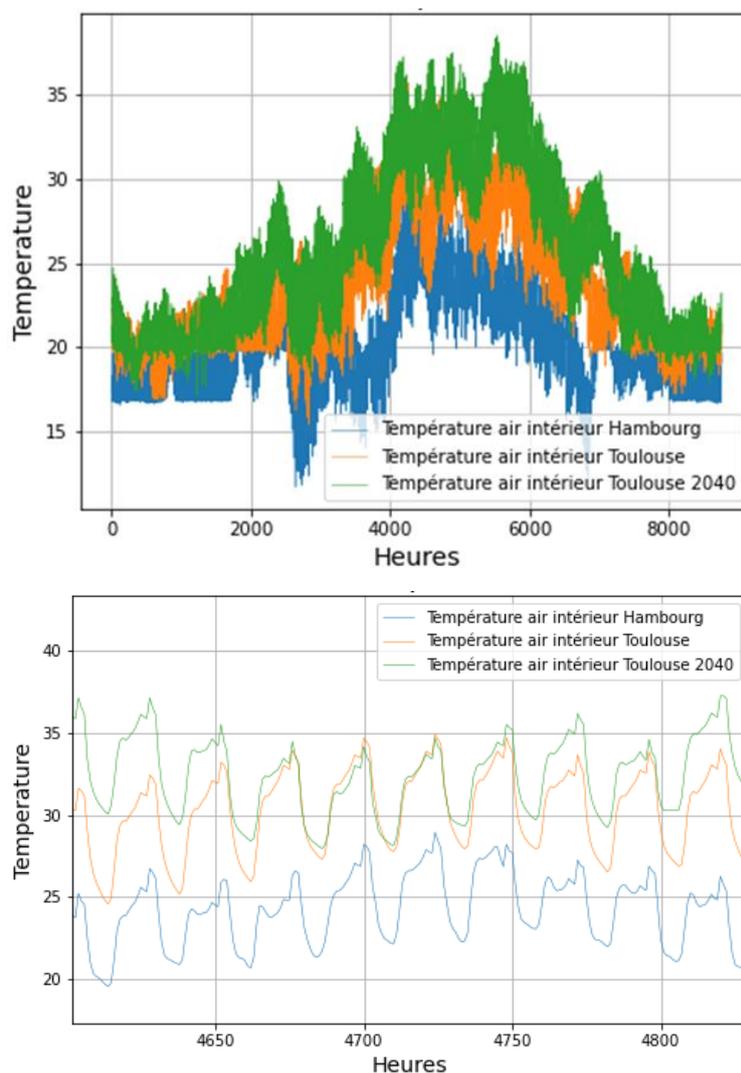


Figure 26 : Comparaison des températures d'air estivales pour deux climats différents.

Il est possible d'observer des températures d'air plus faible pour le climat de Hambourg. En hivers, les systèmes de chauffages semblent sous dimensionnés, la température de consigne de chauffage de 19°C n'est pas atteinte. L'étude du confort thermique d'été indiqué un dépassement de la température de confort de moins de 100h pour les différentes pièces.

L'étude des températures d'air dans le bâtiment pour la projection climatique de Toulouse 2040 est favorable l'hiver. Les besoins de chauffage et donc les consommations énergétiques sont moins importantes. En revanche pour la période estivale les températures et le risque d'inconfort sont encore plus importants.

Le scénario de projection climatique RCP4.5 2040 du GIEC est principalement caractérisé par des accidents climatiques prolongés ou plus fréquents (sécheresses, canicules... etc). Il est possible d'observer ce phénomène sur le focus du début du mois de juin. Au début et a la fin du graphique, plus de 4°C séparent les deux scénarios météo.

4.4.2. CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS CLIMATS

Pour aller plus loin dans le détail, il existe des modèles prenant en compte l'impact environnemental bioclimatique et le confort thermique pour limiter les consommations : la mise en perspective des diagrammes de Givoni avec la rudesse climatique ou l'évolution des conditions intérieures peut permettre de justifier le recours à différents types de procédés CVC. Par exemple, Manzano-Agugliaro et al. évoquent dans leur article une représentation des différentes zones d'utilisation d'un type de systèmes en fonction des caractéristiques de l'air extérieur pour maintenir une plage de confort acceptable dans un bâtiment [61].

Les graphiques en Figure 27 et Figure 28 suggèrent le recours à une technologie ou un système en fonction des propriétés thermo hydriques d'un air donné pour les climats de Toulouse et Hambourg. L'objectif étant de sélectionner les systèmes CVC en fonction du climat pour ramener l'air intérieur dans des conditions confortables avec une consommation énergétique la plus optimisée. Un point représente une heure de l'année sur le diagramme psychrométrique de l'air humide

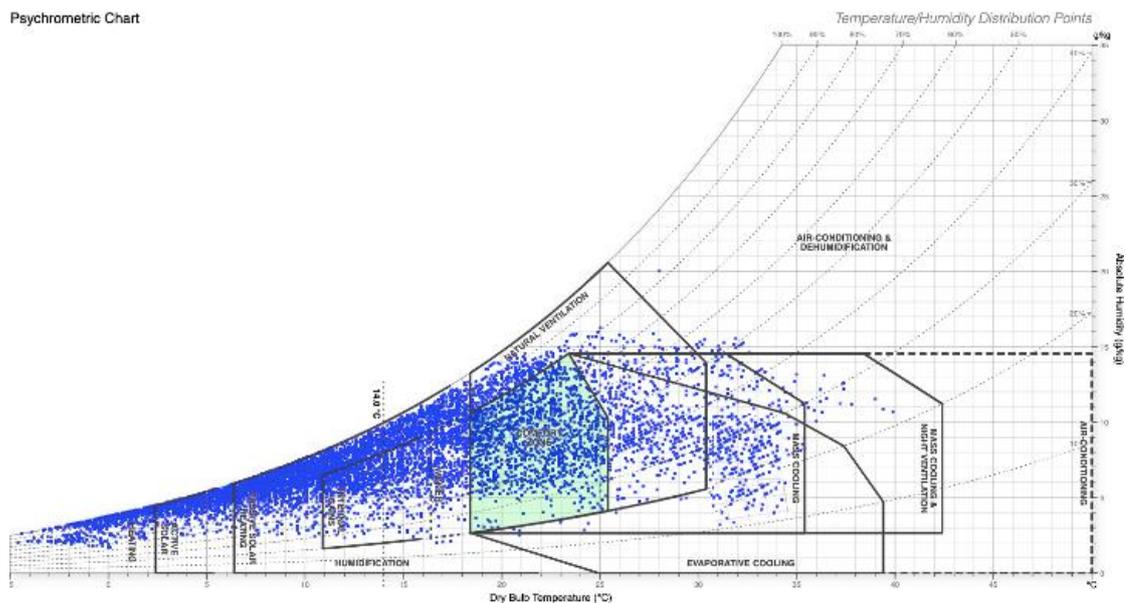


Figure 27 : Diagramme bioclimatique pour le climat de Toulouse

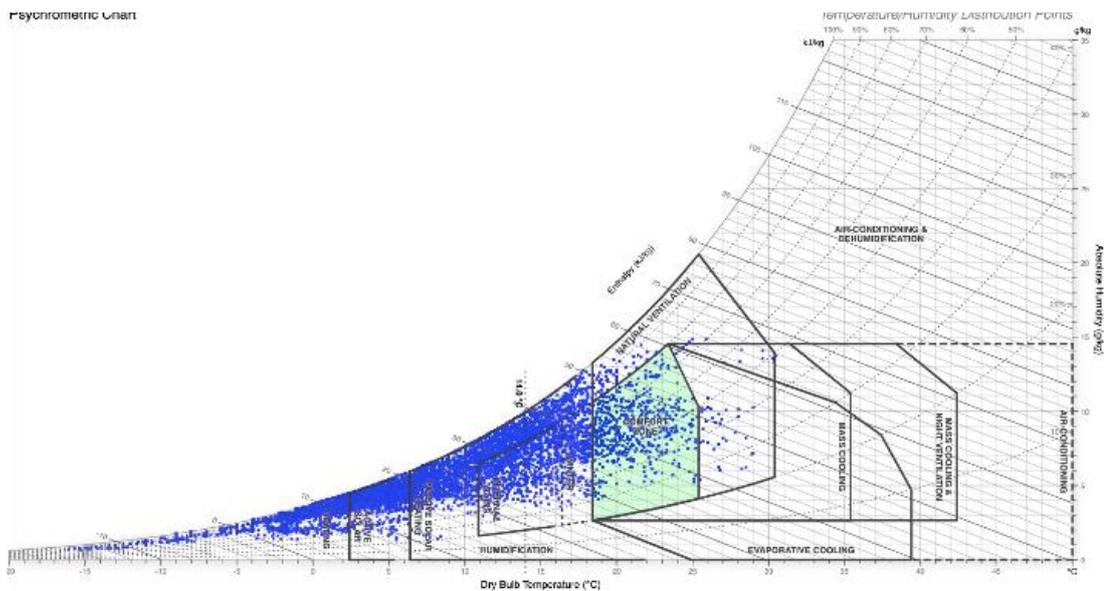


Figure 28 : Diagramme bioclimatique pour le climat de Hambourg

En s'intéressant à la répartition générale du nuage de point, la dispersion des valeurs est beaucoup plus importante pour le cas de Toulouse. Le climat de Toulouse enregistre une grande variation entre les températures les plus froides et les chaudes. Il enregistre également un plus grand nombre d'heures en dehors de la zone de confort coté chaud.

Du point de vue des températures froides, les seuls apports de chaleur internes et externes ne suffisent pas à répondre aux besoins de chauffages. Il est donc nécessaire d'installer des émetteurs de chaleur pour l'hiver pour les deux villes. Du point de vue de l'été, le climat de Hambourg enregistre très peu de températures dépassant la zone de confort.

Pour le cas toulousain, en Figure 27, la rudesse climatique implique un risque d'inconfort potentiel conséquent.

En se fiant à la répartition des points sur graphique, si le bâtiment peut tirer le maximum des ressources bioclimatiques disponibles, un mélange de ventilation naturelle, ventilation nocturne et inertie thermique peuvent répondre aux besoins de rafraîchissement.

Si le bâtiment le permet, le dimensionnement d'un rafraîchissement passif est donc suffisant.

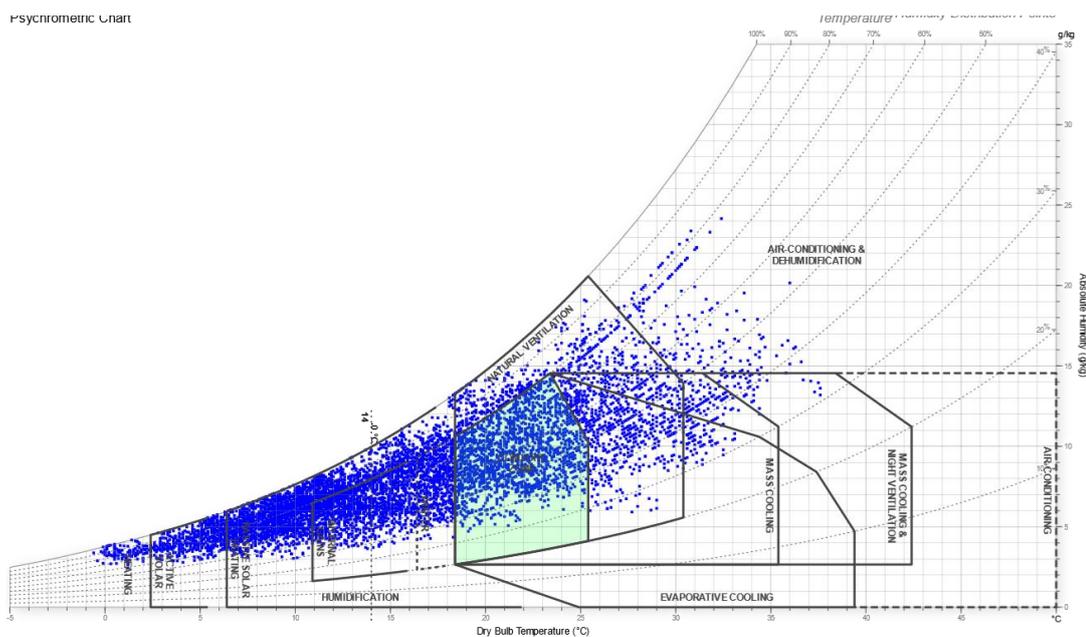


Figure 29 : Diagramme bioclimatique pour la projection de climat RCP 4.5 2040 à Toulouse

La Figure 29 permet d'étudier les caractéristiques des projections climatiques à Toulouse en 2040 pour le scénario d'émission RCP 4,5. En comparaison avec la météo actuelle en Figure 27, le climat toulousain pourrait évoluer vers un climat de plus en plus chaud et humide. De plus en plus d'heures en été sont aussi hors des zones passives. Les ressources naturelles potentielles du climat ne suffiraient donc plus à subvenir aux besoins de rafraichissements d'ici-là.

Pour éviter le recours à la climatisation systématique, plusieurs articles de la littérature proposent l'utilisation de matériaux biosourcés [62]–[65]. Ces matériaux permettent grâce à leurs propriétés thermo-hydriques un rafraichissement passif sur la phase de déstockage du volume d'eau [66], [67]. Plus ouvert au passage et au stockage de la vapeur d'eau que les matériaux conventionnels, ils permettent la condensation de l'eau dans les pores des mur. Le passage de l'état liquide à gazeux étant une réaction endothermique, l'énergie nécessaire à l'évaporation de cette eau aura tendance à refroidir l'ambiance [66]–[69].

Ce phénomène peut amplifier l'inertie thermique tout en offrant une meilleure gestion de l'hygrométrie ambiante [70], [71]. Une attention particulière doit toute de même être portée à la mise en œuvre de ce type d'isolation. De la même façon que pour l'inertie thermique, un surdimensionnement de l'inertie hydrique peut entraîner un stockage de l'eau et des désordres dans les parois. [69]

A titre d'information, il existe d'autres de solutions de rafraichissement passifs (par exemple : les puits canadiens, le géocooling, stockage inter saisonnier...etc. Le fonctionnement de ces systèmes a été détaillé dans le précédent livrable du projet I-HEROS [29]. Une étude numérique pourra être dédié l'impact de ces solutions de rafraichissement passives sur le confort thermique estival.

Pour conclure sur cette partie, ici aussi le remplacement d'un système de ventilation ou de système aura de fortes conséquences sur les performances énergétiques, environnementales, le confort thermique, etc.

Il est cependant possible d'optimiser les systèmes mis en place pour qu'ils tirent le maximum des ressources climatiques potentiellement disponibles. C'est de cette façon qu'il

sera possible d'optimiser les consommations énergétiques sans dégrader le confort des occupants.

L'enjeu est donc de proposer une nouvelle solution de rénovation permettant une meilleure gestion de ces différents paramètres.

4.5. OPTIMISATION DE LA SOLUTION DE RENOVATION : TOUTES TYPOLOGIES

Les parties précédentes mettent en avant la nécessité de prendre en compte le confort thermique d'été en rénovation. Considérer la qualité d'une rénovation selon des critères uniquement énergétique serait une erreur. En effet, les contraintes climatiques spécifique de la météo toulousaine pu être problématique. Les bâtiments doivent êtres dimensionnés pour répondre aux caractéristiques hivernales mais aussi estivales.

Cette partie a pour objectif de s'intéresser à une nouvelle solution de rénovation pour coupler les avantages énergétiques de la solution 2 tout en s'intéressant au confort thermique estival.

Nous avons établi dans la partie 4.3 que les différentes surchauffes calculées dans le modèle M2 pouvaient être liés aux apports solaires, apports internes et a une mauvaise gestion de l'inertie thermique.

Face à l'indentification de ces trois points, trois leviers d'actions ont été ajoutés a la simulation de rénovation M2 :

- La conséquence d'un mauvais dimensionnement de l'inertie thermique peut être un surstockage de la chaleur dans les murs [48], [50]. La chaleur est alors piégée dans le bâtiment. L'article de Fiorentini et al.[54] traite de la communication des masses de chaleurs entre les différentes zones thermiques. Une stratégie peut être d'éviter stocker la chaleur ou de la stocker ailleurs dans le bâtiment.

Agrandir les espaces de vie permet de répartir les apports internes élevés de la cuisine dans une plus grande pièce. Cela permet aussi d'éviter le stockage dans le mur. Une autre solution pourrait être d'ouvrir les portes entre les pièces et mettre en place une ventilation traversante [72].

- Le point le plus important pour éviter le recours a un système de rafraîchissement actif est de limiter les apports de chaleurs : internes et externes.

Les gestions des apports internes est lié au mode de vie de occupants ou au choix des appareils domestique/d'éclairage. Ce domaine, traité dans les livre de confort thermique[50], [73] nécessite une sensibilisation pour qu'ils puissent devenir acteur de leur confort. Ce type de mission est notamment un enjeu pour les guichets unique du type de I-HEROS [51], [74], [75].

La gestion des apports externe elle concerne la protection des apports solaires. Les différentes protections peuvent être fixes ou mobiles, intérieure ou extérieure. Le précédent livrable dresse un état de l'art des techniques et de leur mise en œuvre [29]. Sur le territoire de l'Occitanie, les Conseils d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement (CAUE) proposent dans leur document [76] deux graphiques

détaillant les orientations à risques et le type de protection correspondantes pour le territoire d'Occitanie (voir Figure 30). Pour la simulation, les volets sont considérés ouverts ou fermés à horaires fixes l'été.

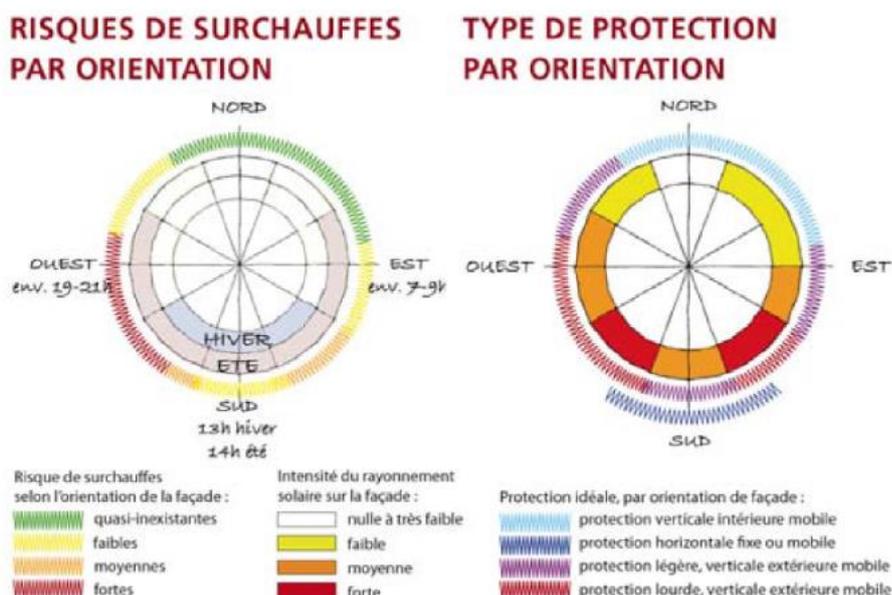


Figure 30 : Fiche de conseil CAUE Occitanie pour les protections solaires des baies [76]

- Optimisation de la ventilation nocturne doit permettre de décharger la chaleur stockée dans les parois du bâtiment [72]. C'est également un moyen de dissiper les apports internes [53]. Les principaux moteurs de ce phénomène sont :
 - Le tirage thermique : L'air intérieur chaud est humide, moins dense s'élève au-dessus de l'air extérieur (ex : vélux)
 - La ventilation traversante : Les vents dominants induisent un différentiel de pression qui créent un courant d'air entre deux façades d'un bâtiment
 - La sur-ventilation mécanique : L'utilisation nocturne plus soutenue du système de ventilation mécanique déjà existant. Ce type de système peut engendrer des augmentations de consommations liés aux auxiliaires de ventilation.

La simulation comprend un mélange de ces éléments. De nombreux articles de la littérature scientifique détaillent l'optimisation et la simulation de ce phénomène [77]–[80]. Le livrable précédemment du projet I-HEROS [51] et plusieurs articles de la littérature proposent des combinaisons [81]–[83]

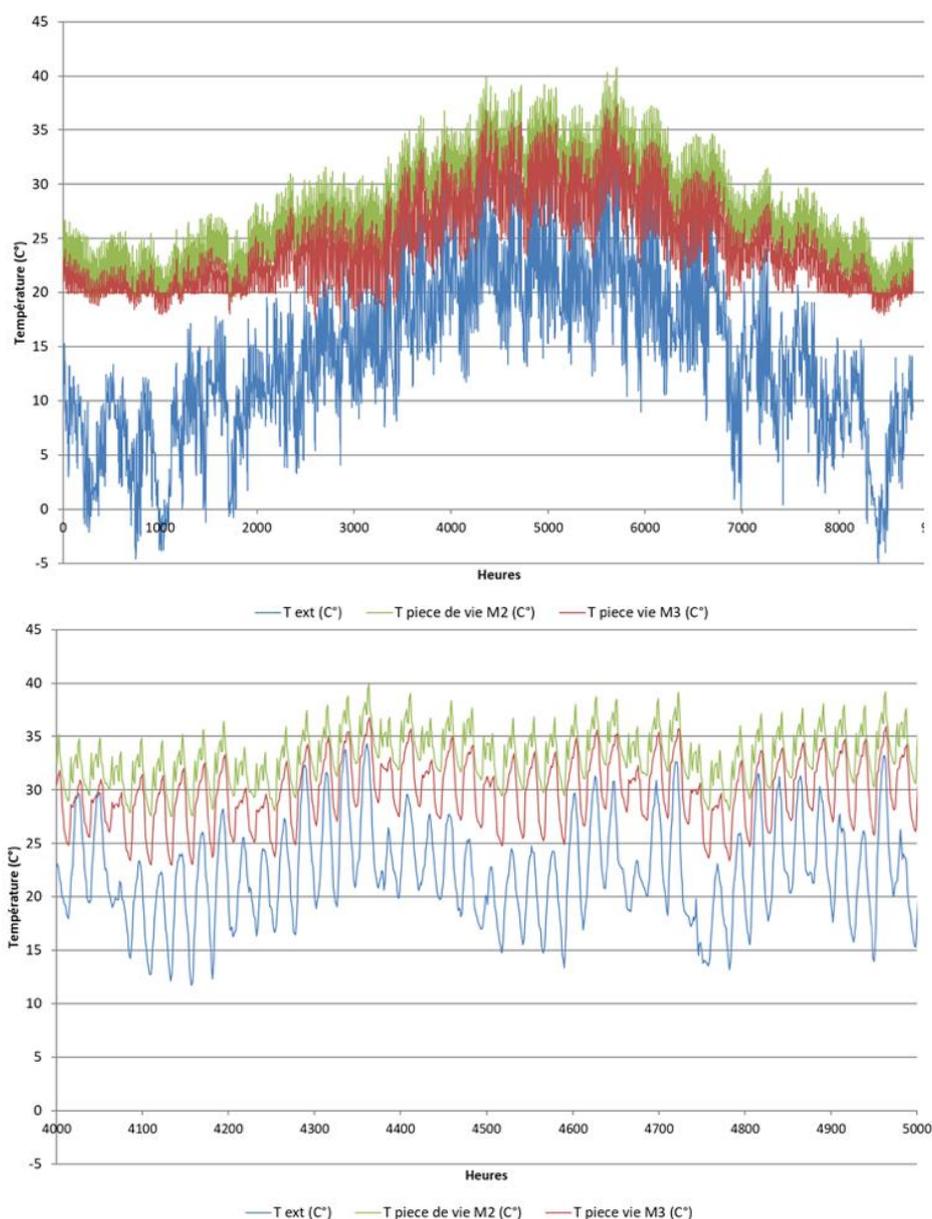


Figure 31 : Evolutions des températures d'air dans la pièce de vie pour la simulation de la solution de rénovation optimisée M3

La Figure 31 représente l'évolution des températures d'air dans la pièce de vie pour les simulations M2 et M3. Les températures d'air du nouveau modèle sont presque toutes inférieures au modèle de rénovation de 2nd niveau.

En été, la suppression des murs de refends couplé à l'utilisation de la ventilation nocturne permet une meilleure gestion de l'inertie thermique : Bien que le pic de chaleur survienne un peu plus tôt dans l'après-midi. Les températures des pièces redescendent aussi plus bas la nuit, permettant de mieux absorber le pic de chaleur du jour suivant.

En hiver, la température d'air est aussi plus faible après la modification. En effet moins de chaleur est stockée dans les murs et les apports internes sont répartis dans un plus grand volume d'air. La consigne de chauffage de 20°C est cependant respectée et le confort thermique n'en sera donc que peu impacté.

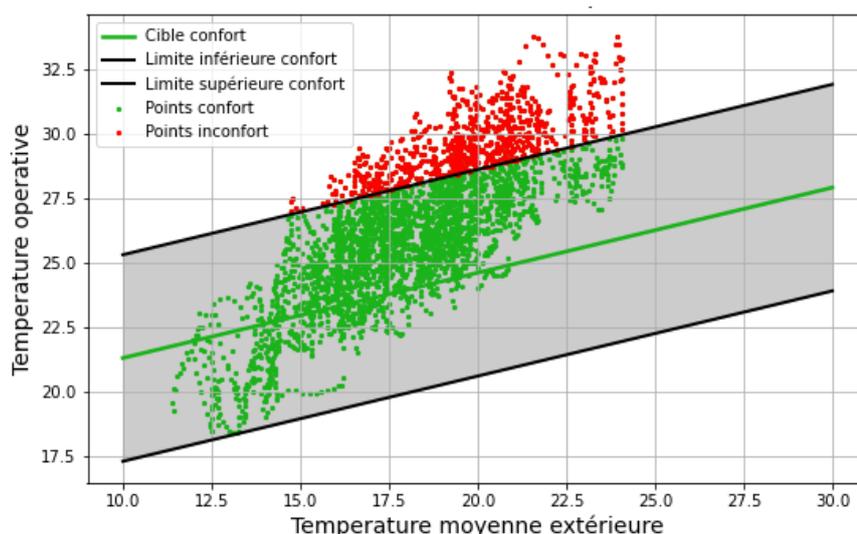


Figure 32 : confort thermique maison individuelle scénario de modélisation 3

La Figure 32 représente le résultat de l'étude sur le confort thermique estival associé à cette troisième solution de rénovation. Le dépassement de la limite de confort et le risque d'inconfort associé est de 362 heures.

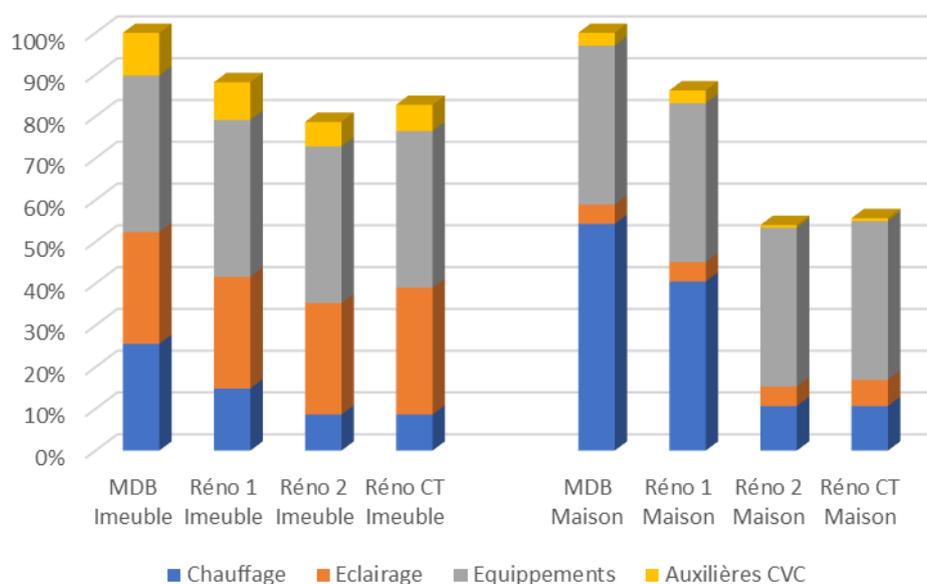


Figure 33 : Simulation des consommations des scénarios confort thermique

Les commentaires de l'étude des comparaisons du mix énergétique pour la solution de rénovation sur le confort thermique sont similaires à la partie « 4.3.2 Gain énergétique sur les consommations de chauffage ». Bien que consommations des équipements domestiques soient non négligeables, elles ne rentrent pas en compte dans cette étude. Les d'éclairages sont eux inchangés entre les différentes modélisations.

Tous postes confondus, ce scénario de rénovation favorisant le confort thermique estival permet 17% d'amélioration énergétique pour l'immeuble collectif et 44% pour le bâtiment individuel. Sur les consommations de chauffage uniquement, ce scénario permet

39% d'amélioration énergétique pour l'immeuble collectif et 76% pour le bâtiment individuel.

Par rapport aux améliorations du scénario 2, les consommations des auxiliaires et d'éclairage sont plus importantes :

- La sur-ventilation estivale a été paramétré comme un couplage de ventilation naturelle et de ventilation mécanique. Les sur-consommations proviennent de la consommation électrique du moteur du ventilateur. Il existe donc un compromis : les consommations de ventilation de doivent pas dépasser les consommations de climatisation pour couvrir les besoins de rafraîchissement
- Les protections solaires et les scénarios d'occultations peuvent induire le recours à la lumière artificielle. Il existe ici aussi un compromis entre les consommations d'éclairages et celles des besoins de climatisation qui compenseraient les apports solaires. Ici les apports thermiques induits par l'utilisation de la lumière artificielle doivent aussi être pris en compte

Ce compromis est dépendant des caractéristiques propres du bâtiment étudié. Chaque projet de rénovation peut donc avoir une combinaison de ces différents paramètres en fonction des ressources climatiques disponibles (par exemple si le bâtiment est orienté sous les vents dominants ou si les bâtiment voisins jouent le rôle de masque proche)

4.6. MODIFICATION DU SYSTEME DE CHAUFFAGE : BATIMENTS PAVILLONNAIRES

Dans le cas du bâtiment pavillonnaire, un plus grand nombre de solution de chauffage peut être envisagé. En fonction du mode de transferts de chaleur, de l'uniformité de répartition des émetteurs ou encore des indices de confort sur lesquels se base la régulation, le confort thermique et les consommations énergétiques peuvent être optimisés. C'est pour cette raison que cette partie est consacrée au choix des systèmes de chauffages. Ces remarques sont transposables aux autres typologies de bâtiments.

4.6.1. ETUDE DU MODE DE CHAUFFAGE

Comprendre l'intérêt de choisir un mode de chauffage par rapport à un autre est conditionné par la compréhension de leur fonctionnement et de leurs caractéristiques. La littérature scientifique propose plusieurs revues bibliographique sur le sujet [39], [84]–[87]:

Le chauffage par mode de transfert de chaleur en rayonnement, concernant **les cheminées ou les poêles** est particulièrement adapté pour les bâtiments moyennement isolés ou avec une gestion partielle des flux de ventilation. En effet les flammes réchauffent directement les occupants sans utiliser d'air comme fluide vecteur. C'est une solution permettant d'atteindre des conditions de confort acceptables tout en modérant les consommations énergétiques.

En rénovation, une bonne solution peut être de remplacer le foyer par un poêle à bois ou à granulé possédant un rendement de fonctionnement bien meilleur. Le conduit d'évacuation des fumées étant déjà existant, l'adaptation du changement de système sera facilement adaptable.

Dans le cadre de la rénovation, **les convecteurs électriques muraux** sont faciles à installer, performant et adaptable a toutes les typologies de bâtiments. Par ailleurs, bien que leur efficacité énergétique soit excellente, le mode de transfert 100% convectif n'est pas le plus confortable et peut engendrer des surconsommations énergétiques dans certains cas. En effet cette configuration favorise grandement les déperditions si l'enveloppe n'est pas étanche et bien isolé. Du point de vue du consommateur, de l'efficacité énergétique de tous les appareils de chauffage électrique est considérée comme étant proche de 100 % puisque la quasi-totalité de l'énergie achetée est convertie en chaleur.

Dans le cas des **radiateurs à eau chaude**, le mode de transfert utilisé des émetteurs est mixte avec le rayonnement et la convection, la part de chaque peut varier en fonction de l'émetteur. Le régime de température le plus courant est 90°C pour la température d'aller et 70°C pour la température de retour. Il est possible de dimensionner les réseaux pour des températures plus basses avec des émetteurs adaptés : réseaux basses températures 40/60°C. Les températures intérieures doivent être régulées à l'aide de thermostats et de robinets de régulations adaptés (robinets thermostatiques)

En rénovation, il a été établi qu'installer des organes d'équilibrage et de régulation des réseaux permettait de gagner jusqu'à 15 à 20% des consommations énergétiques [88], [89]. Dans le cas de condamnation de planchers chauffants déjà existants, il est possible d'installer des radiateurs fonctionnant sur les mêmes régimes de température que le système déjà existant.

Les planchers chauffants permettent le couplage de la convection, de la conduction et du rayonnement. Les tuyaux sont encastrés dans la dalle de fondation en béton, ou dans une dalle en béton léger sur un sous-plancher. La température de chaque pièce est contrôlée en régulant le débit d'eau chaude dans chaque boucle de tuyaux par un système de vannes de zonage ou de pompes et de thermostats. Ce type de technologie permet de bénéficier de l'inertie thermique de l'épaisseur de béton dans laquelle elle est coulée. Pour ces raisons, les planchers chauffants ont de bonnes performances énergétiques tout en garantissant un bon confort thermique. L'enveloppe du bâtiment doit également être bien isolée pour éviter de conduire la chaleur vers l'extérieur. Un point d'attention particulier doit être porté au régime de température des circuits d'eau chaude qui doivent rester bas (généralement 40/30°C) pour éviter les inconforts locaux. C'est pour cette raison que les planchers chauffants sont souvent couplés à des pompes à chaleur ou des systèmes géothermiques qui produisent de l'eau chaude à basse température.

4.6.2. ETUDE DU TYPE DE SYSTEME DE CHAUFFAGE

Cette partie s'intéresse ici aux résultats de la simulation énergétiques et aux économies d'énergie réalisables par rapport à la modélisation initiale du pavillon discontinu.

La Figure 34 présente les résultats de consommations et d'économies énergétiques associées aux modes de consommations de chauffage.

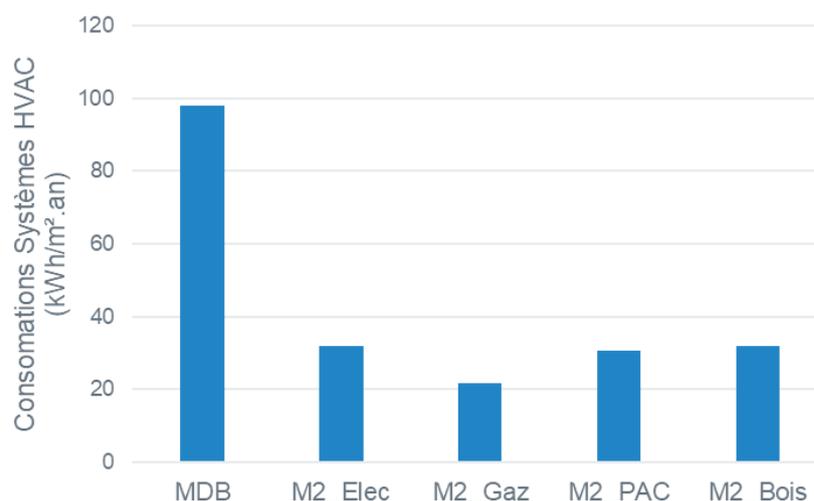


Figure 34 : Consommation systèmes CVC en fonction des solutions de chauffages

5. RENTABILITE ENVIRONNEMENTALE

L'objectif de cette partie est d'étudier les aspects environnementaux et financiers que peuvent apporter les différents scénarios de travaux. Les matériaux et systèmes mis en place dans le cadre de la rénovation ayant des caractéristiques intrinsèques différentes, ces aspects sont étudiés dans deux parties différentes.

La méthodologie de l'étude s'intéresse pour commencer au bilan des ressources utilisés lors d'un scénario de rénovation. Ces ressources sont comparées aux économies potentielles que permettent les travaux. Pour tenir compte de la durée de vie des différentes solutions mises en œuvre sont rapportés à la durée d'utilisation du bâtiment. Différents articles de la littérature estiment cette durée à 50 ans [23], [23], [90]–[92]. Grant et Ries explique dans leur article la méthode et les conséquences du choix de ce temps [93].

L'objectif ici est d'étudier de manière qualitative la viabilité d'une solution ainsi que les leviers qui permettent d'améliorer les aspects financiers et environnementaux d'un bouquet de travaux. Chaque projet de rénovation étant différents, un chiffrage ou une analyse de cycle de vie seront nécessaires pour obtenir un résultat quantitatif.

5.1. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Selon l'ADEME, un Le Bilan Gaz à Effet de Serre (GES) est une évaluation de la quantité de gaz à effet de serre émise (ou captée) dans l'atmosphère sur une année par les activités d'une organisation ou d'un territoire.

Les différents types de GES ont un impact plus ou moins important sur le climat. Afin d'être comparés, les uns avec les autres, les émissions des différents GES peuvent être exprimées en CO₂e (équivalent CO₂). Le rapport d'étude du projet I-HEROS sur les éléments de comparaison des différentes solutions de rénovation traite plus en détail des caractéristiques d'une étude environnementale [29].

5.1.1. INVENTAIRE CARBONE DES SOLUTIONS DE RENOVATION

Afin d'établir une piste d'écoconception ou d'envisager une amélioration du bilan environnemental, il est nécessaire de quantifier la contribution aux émissions de GES d'un matériau ou d'un système. Les données relatives aux différents types de systèmes ou de travaux peuvent provenir de différentes sources :

- La littérature et les articles scientifiques : Les valeurs d'émission de GES associés sont souvent issus de retours d'expériences ou de méthodes de calculs spécifiques.[21], [22], [94]
- La documentation de projets à grandes échelles pour la centralisation des données pour le calcul d'ACV et la création de base de données. Ces valeurs sont soit déclaratives soit issus d'un retour d'expérience d'un grand nombre de rénovation. C'est par exemple le cas du projet Inventory of Carbon and Energy en Angleterre [95], du projet Ecoinvent en Suisse [96] ou du projet ECO2 en Finlande [97]
- Les données retenues dans le cadre de l'étude résident sur une normative. En France, les fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES) sont une déclaration établie par les fabricants. Elles présentent les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie permettant le calcul de la performance environnementale et sanitaire du bâtiment pour son éco-conception. Elles sont encadrées par la norme NF EN 15804 [98]. Différentes fiches peuvent donc exister en fonction des constructeurs de matériaux ou de systèmes. Le ministère de la transition écologique et le ministère du logement posent des fiches génériques qui représentent les données environnementales par défaut. Dans notre cas elles ont l'avantage d'être adaptable à l'ensemble des projets qui pourraient concerner le territoire toulousain.

Les figures ci-dessous et les tableaux en annexes D et E détaillent ces valeurs pour les principales solutions de rénovations. Les résultats prennent en compte les différents moments du cycle de vie des éléments : Étapes de production, étapes de construction, coût d'utilisation, étapes de fin de vie.

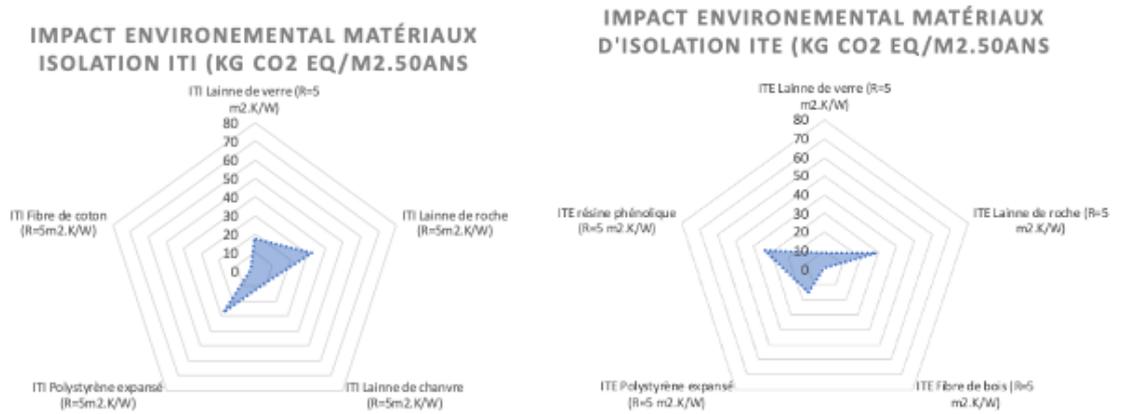


Figure 35 : Bilan environnemental matériaux d'isolation à résistance thermique équivalente R=5 m2.K/W (kg CO2e / m2. 50ans)

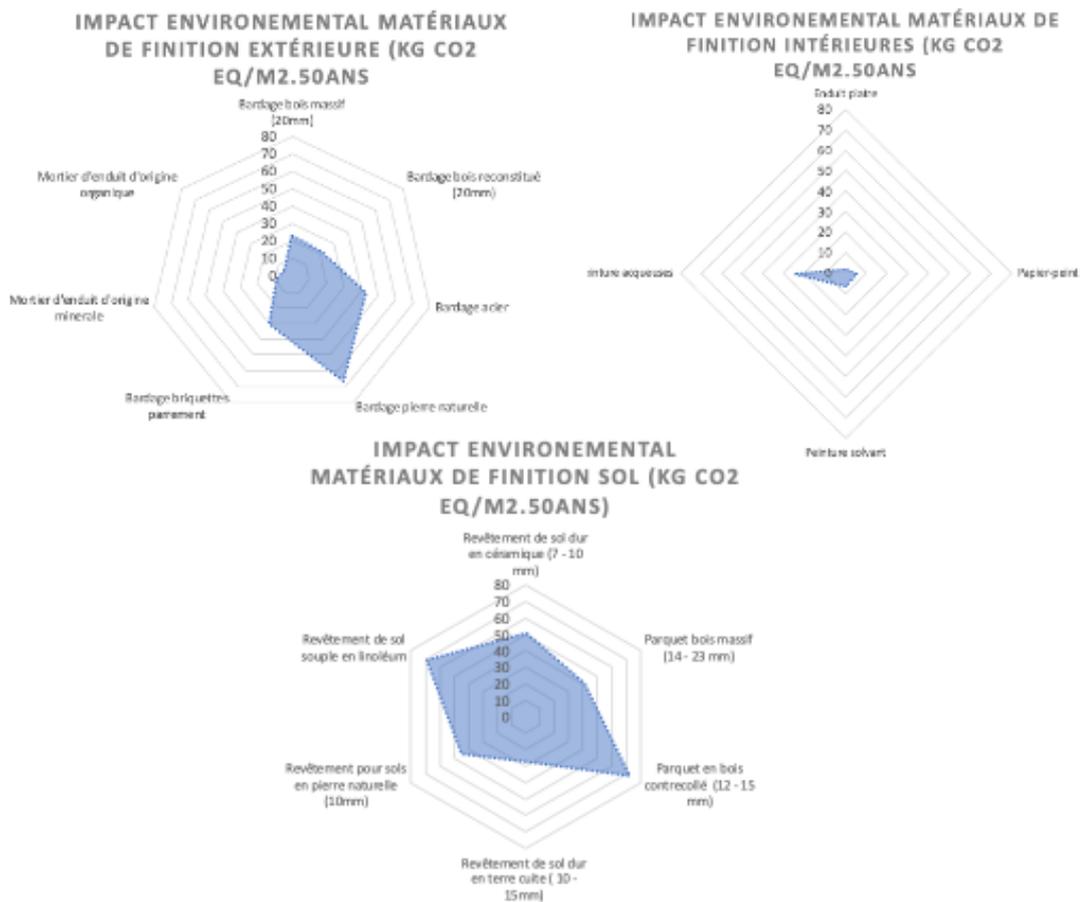


Figure 36 : Bilan environnemental matériaux de finition (kg CO2e / m2. 50ans)

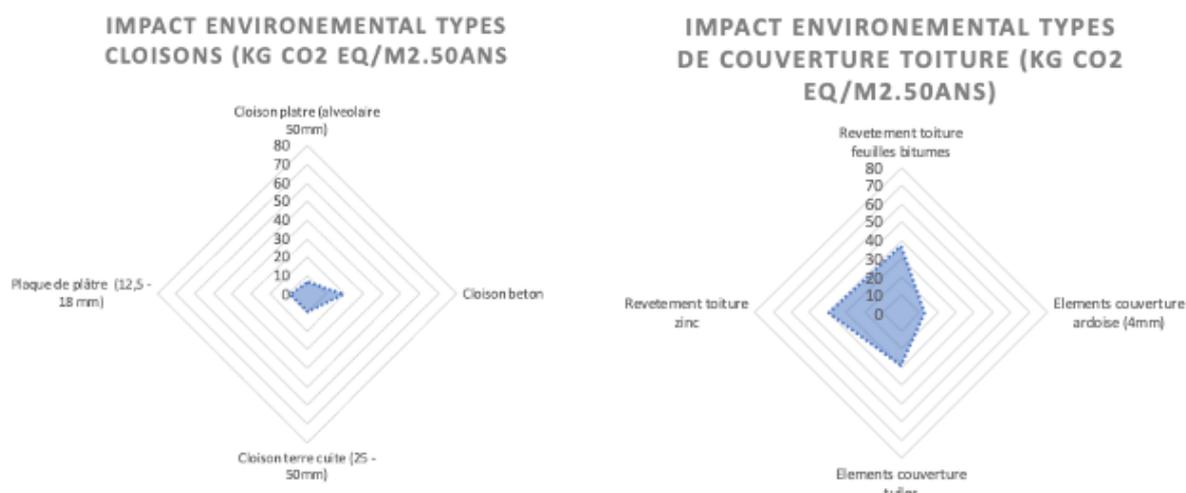


Figure 37 : Bilan environnemental matériaux de constructions divers (kg CO2e / m2. 50ans)

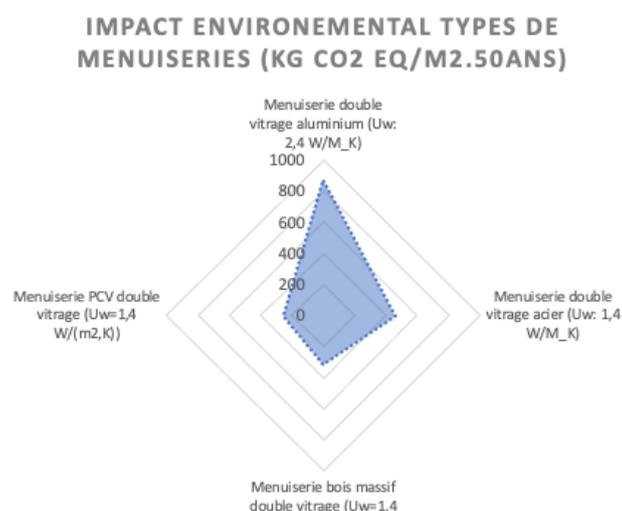


Figure 38 : Bilan environnemental types menuiseries (kg CO2e / m2. 50ans)

L'étude des tableaux en annexe et des Figure 35, Figure 36, Figure 37 et Figure 38 permet d'analyser l'impact de chaque matériau et chaque poste de construction sur le poids environnemental total d'une solution de rénovation.

Les menuiseries sont de loin le poste responsable du plus d'émission de GES. Même si en proportion, la surface de vitrage est faible par rapport aux parois opaques, choisir le bon type de menuiserie aura un fort impact sur l'optimisation environnementale d'une rénovation.

Le deuxième point important que mettent en évidence ces figures sont le poids d'émission des GES des isolants. En comparaison des autres matériaux de constructions leur impact est faible. Par exemple, le poste matériaux de finitions peut être considéré comme plus influant. C'est pourtant un domaine moins important sur pour les performances thermiques et énergétiques.

Il est aussi important de noter que le recours à une isolation thermique par l'extérieur entrainera obligatoirement une reprise de la façade extérieure alors que ce ne sera pas nécessairement le cas en isolation par l'intérieure. En comparaison les finitions intérieures sont beaucoup moins génératrices de GES que celles par l'extérieures

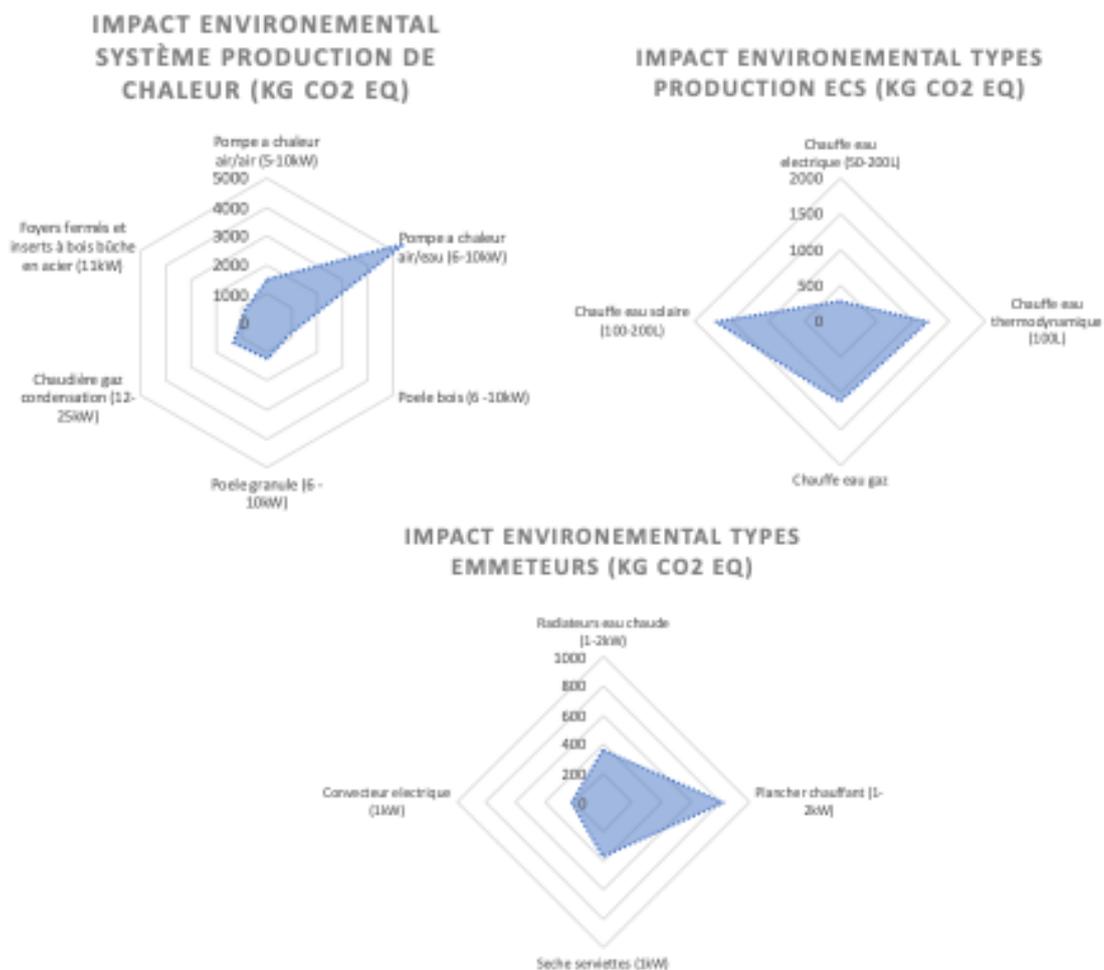


Figure 39 : Bilan environnemental systèmes CVC

La Figure 39 et le tableau en annexe s'intéressent aux bilans environnementaux des équipements et systèmes de productions de chaleur. Les graphiques représentés ci-dessous ne tiennent pas compte de la quantité de CO2 dégagée à l'usage par le combustible. Le Tableau 10 représente le facteur d'émission en fonction de la provenance de la source de chaleur. La quantité d'énergie disponible par kWh de combustible est calculée sur le PCI. Ces coefficients sont issus des préconisations et méthodes de calculs de bilans carbone de l'ADEME [20], [99]

Tableau 10 : Facteur d'émission par type de mode de chauffage

Combustible	(kg CO2e/kWh)
Pétrole brut	0,286
Fioul domestique	0,329
Butane	0,27
Propane	0,27
Bois buche	0,033
Bois pellets	0,045
Électricité	0,128
Réseau Chauffage Urbain (CU) de Toulouse (UIOM)	0,19
Réseau CU ZAC du Ritouret (Blagnac)	0,17
Réseau CU CSU Rangueil	0,216

Les sources de chaleurs les moins polluantes à l'utilisation ici sont celles à base de bois, d'électricité ou les réseaux de chaleur urbains. En mettant en perspective avec le cout environnemental total.

En comparant ces résultats avec le cout environnemental global des solutions de chauffages, le recours aux poêles/cheminées ou aux réseaux de chauffage a eau chaude sont de bonnes solutions.

5.1.2. CALCUL DE RENTABILITE ENVIRONNEMENTALE

Cette partie s'intéresse aux calculs de rentabilités environnementaux sur la base d'un bilan carbone. La démarche sera détaillée pour un exemple puis plusieurs configurations seront testés.

Tableau 11 : Calcul du cout environnemental associé à une solution de rénovation

Modification	Valeur unitaire (kgCO2e)	Valeur unitaire / Surface	Cout environnemental (kg CO2)
Modification Bati			
ITE Laine de verre (R=5 m2.K/W)	8,5	Mur ext+planchers	3391
Facade Briquette/Enduit mineral	12,0	Mur ext	1623
Plaque de plâtre (12,5 -18 mm)	6,8	Mur int	1236
Peinture solvant	6,6	Mur int	1187
Revêtement de sol dur en céramique (7 - 10 mm)	50,7	Plancher bas	6338
Menuiserie bois massif double vitrage (Uw=1,4 W/(m2,K))	310	Plancher haut	6200
Modification Equipements CVC			
Poele bois (6 -10kW)	855	1	855
Convecteur électrique (1kW)	219	3	657
Seche serviettes (1kW)	372	1	372
VMC simple flux Hygro B (59m3/h)	120	1	120
Total investissement CO2e (kg)			21979

Le calcul de l'investissement environnemental initial associé à une solution de travaux comprends la somme des éléments mis en œuvre pour la rénovation pour les différentes étapes : production, construction, cout d'utilisation, fin de vie. Les résultats obtenus sont appliqués aux surfaces ou nombres d'éléments du bâtiment puis pondérés sur les 50 ans de durée de vie du bâtiment. Par exemple, le Tableau 11 détaille ce bilan pour la solution de rénovation de 2nd niveau du pavillon discontinu. Le résultat obtenu en kg de CO2 équivalent sera comparé aux économies potentiellement réalisables

Tableau 12 : Calcul du facteur d'émission et du TRI environnemental d'une solution de rénovation

	Avant rénovation	Après rénovation
Consommation chauffage (kWh)	12122	3856
Consommation auxiliaires elec (kWh)	742	230
Emission CO2e (kg/an)	4083	355
Economies CO2e (kg/an)		3728
Retour sur investissement (an)		8,83

Le Tableau 12 présente le détail du calcul des économies d'émission carbone potentiellement réalisables avec le scénario de rénovation présenté dans le Tableau 11. Les résultats sont calculés à partir des résultats des consommations des simulations numériques. Les émissions liées aux consommations énergétiques annuelles sont établis en fonction des facteur d'émissions préconisés par l'ADEME [20], [99].

5.1.3. PRESENTATION DES RESULTATS

A partir de cet outil et des valeurs disponibles en Annexe C et D, différentes compositions peuvent être testés pour trouver le meilleur compromis les résultats correspondants aux deux niveaux de simulations sont présentés en Tableau 13.

Tableau 13 : Temps de retour sur investissement environnemental des solutions de rénovations étudiés

Scenario		Maison individuelle	Immeuble collectif
Scénario rénovation 1	de	31 ans	39 ans
Scénario rénovation 2 thermique	de confort	8 ans	26 ans

Le retour investissement de la typologie des immeubles semble moins impactant. Les mesures de rénovations, qui concernent les consommations liées aux équipements de CVC ne permettent pas un gain aussi important que pour les maisons individuelles. En effet, l'état initial, la maison individuelle est plus énergivore (voir Figure 17).

En estimant que la durée de vie d'un bâtiment est de 50ans, toutes ces opérations sont rentables. Du point de vue environnemental il sera plus pertinent de s'intéresser au deuxième scénario de rénovation.

Il a été établi dans la partie précédente que certaines sources de polluants pouvaient être plus polluantes que d'autres (voir Tableau 10). Le Tableau 14 présente les résultats de calcul de temps de retour d'investissement de la rénovation globale de la maison pavillonnaire pour les différents systèmes de chauffage étudiés dans les parties précédentes.

Tableau 14 : Temps de retour sur investissement environnemental en fonction du type de système de chauffage utilisé en rénovation

Type de chauffage utilisé	Maison individuelle Rénovation complète
---------------------------	--

Chaudière à gaz convecteur eau chaude	8,3 ans
Convecteurs électriques	7,3 ans
Pompe à chaleur plancher chauffant	13,6 ans
Poêle à bois/Cheminée	7,3 ans

Comme expliqué précédemment, les bons temps de retours sur investissement pour le bois et l'électricité proviennent de la faible émission de CO2 pour l'utilisation de ces 2 sources d'énergies.

6. CONCLUSION

Ce document a permis de dresser un panorama de la pertinence des techniques de rénovations détaillés dans les précédents rapports du projet I-HEROS [29]. Détailler et analyser un catalogue de solutions est une aide indispensable pour choisir la solution la plus adaptée aux besoins d'un bâtiment. Pourtant toutes les solutions de rénovations ne sont pas adaptables à tous les climats.

Pour les entités mettant en place des services d'accompagnement de rénovations, il n'est pas rare d'avoir recours à des aides ou solutions industrielles adaptées au territoire dans le cadre d'un guichet unique. Il est donc primordial de comprendre l'impact de ces solutions sur les plans énergétique, environnementale, hydrique, confort thermique, qualité de l'air, etc. Ce rapport a donc permis de s'intéresser à la viabilité des différentes solutions techniques des rénovations, tout en étudiant les caractéristiques des bâtiments représentant la majorité du parc immobilier toulousain existant. L'objectif était de dresser un bilan des caractéristiques du parc de bâtiment Toulousain et d'étudier les méthodes répondants aux besoins de rénovation du territoire.

Les premières parties, basées sur les résultats des travaux déjà effectués à l'INSA et par les partenaires du projet I-HEROS ont permis de dresser le bilan de l'état d'avancement de la rénovation du stock logements privé de Toulouse.

La deuxième partie s'intéresse à l'identification et la modélisation numérique d'un couple de bâtiments théoriques étant censés représenter la majorité des caractéristiques constructives associée au parc bâtiment. Les hypothèses et les limites des simulations sont aussi détaillés dans cette partie.

La troisième partie s'intéresse à l'étude des résultats de la simulation des différentes solutions de rénovations en fonction des différents critères thermiques, énergétiques, environnementaux, financiers, confort thermique estival.

Du point de vue thermique et énergétique, une isolation performante et le choix d'équipements efficaces suffissent à obtenir des résultats énergétiques et financiers convaincants. Du point de vue de la thermique et du confort d'été il est important de prendre en compte l'impact du climat. Un bon dimensionnement de l'inertie thermique et de la ventilation permet de valoriser les apports bioclimatiques et éviter un recours systématique aux systèmes de climatisations.

Une étude des perspectives d'évolution climatique prévu d'ici à 2040 a permis de justifier par exemple l'utilisation de matériaux biosourcés.

Confronter cette étude numérique multicritère aux problématiques réelles permettrait d'étudier le fonctionnement réel du bâtiment et de définir des stratégies de rénovation adaptée au territoire de Toulouse.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] European Commission, « Energy topics », *Energy efficient buildings*. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/2030-energy-%20strategy_en?redir=1 (consulté le 25 mars 2020).
- [2] Marina Economidou, « Europe's buildings under the microscope : country-by-country review of the energy performance of building », *BIPE*, 2011.
- [3] Paul Soto, « Cities of Tomorrow – action Today. Capitalisation. Key messages », *URBACT, EUROPEAN UNION*, 2013, [En ligne]. Disponible sur: https://urbact.eu/sites/default/files/import/general_library/19765_Urbact_Cross_cutting_low_FINAL.pdf
- [4] G. Desogus, L. Di Pilla, S. Mura, G. L. Pisano, et R. Ricciu, « Economic efficiency of social housing thermal upgrade in Mediterranean climate », *Energy and Buildings*, vol. 57, p. 354-360, févr. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.11.016.
- [5] N. Kohler et U. Hassler, « The building stock as a research object », *Building Research & Information*, vol. 30, n° 4, p. 226-236, juill. 2002, doi: 10.1080/09613210110102238.
- [6] R. Jagarajan, M. N. Abdullah Mohd Asmoni, A. H. Mohammed, M. N. Jaafar, J. Lee Yim Mei, et M. Baba, « Green retrofitting – A review of current status, implementations and challenges », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, p. 1360-1368, janv. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.091.
- [7] CSTB, De Jean Patrick, Ebok, Marin Jérôme, Pouget-Consultants, Transsolar, *Le guide ABC : Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974*. 2011.
- [8] INSEE, « Résidences principales construites avant 2016. Dossier complet. Commune de Toulouse (31555) Insee, RP2018 exploitation principale, géographie au 01/01/2021. » 17 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-31555#graphique-LOG_G1
- [9] Toulouse Métropole, « ETUDE DE PREFIGURATION DE LA PLATEFORME DE RENOVATION ENERGETIQUE DE L'HABITAT, ETAPE 2 : SYNTHESE DU BENCHMARK Comparaison de 4 plateformes existantes ». 2017.
- [10] PROGRAMME D'ACTION POUR LA QUALITÉ DE LA CONSTRUCTION ET DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, « ANALYSE DÉTAILLÉE DU PARC RÉSIDENTIEL EXISTANT ». Agence de la Qualité de la Construction, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.programmepacte.fr>
- [11] Union régionale des Conseils d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement d'Occitanie, « Bâti du xxème siècle, Stratégies pour une rénovation adaptée en Occitanie ». 2018.
- [12] DREAL Occitanie, « Rénovation du bâti ancien en Occitanie - Fiches pratiques par typologies de bâtiment ». 2019.
- [13] M. B. Nathalie Tornay Serge Faraut, « GENIUS, a methodology to integrate building scale data into urban microclimate and energy consumption modelling ». Project: MAPUCE - Conference: ICUCAt: 12th Symposium on the Urban Environment, 2015.
- [14] Adelaide Mailhac, *Contribution au développement d'une méthodologie d'évaluation environnementale aux échelles urbaines.*, Manuscrit de Thèse. 2021.
- [15] Marion Bonhomme, *Contribution to the generation of multiscale and evolutionary databases for a multidisciplinary approach to urban energy.*
- [16] F. Le Néchet, « De la forme urbaine à la structure métropolitaine : une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'Audit Urbain », *cybergeo*, févr. 2015, doi: 10.4000/cybergeo.26753.

- [17] Y. Sahraoui, « Essai de typologie des espaces résidentiels à partir d'indicateurs désagrégés à l'échelle du bâtiment. Application à Besançon et à Metz », *cybergeo*, juill. 2014, doi: 10.4000/cybergeo.26431.
- [18] République Française - ADEME, « Diagnostics de performance énergétique pour les logements par habitation », *Portail open data de l'ADEME*, 25 janvier 2020. <https://data.ademe.fr/datasets/dpe-france>
- [19] Toulouse Métropole, « Étude de préfiguration d'une plate-forme locale de rénovation énergétique de l'habitat, Rapport d'état des lieux ». Mission Plan Climat, 2017.
- [20] « Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone : ADEME », 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/%5BBase%20Carbone%5D%20Documentation%20générale%20v11.0.pdf>
- [21] A. Martínez-Rocamora, J. Solís-Guzmán, et M. Marrero, « LCA databases focused on construction materials: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, p. 565-573, mai 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.243.
- [22] F. P. Torgal, L. F. Cabeza, J. Labrincha, et A. G. de Magalhães, Éd., *Eco-efficient construction and building materials: life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies*. Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi: Woodhead Publishing, 2014.
- [23] C. Thibodeau, A. Bataille, et M. Sié, « Building rehabilitation life cycle assessment methodology—state of the art », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, p. 408-422, avr. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.037.
- [24] Y. Bahar, C. Pere, J. Landrieu, et C. Nicolle, « A Thermal Simulation Tool for Building and Its Interoperability through the Building Information Modeling (BIM) Platform », *Buildings*, vol. 3, n° 2, p. 380-398, mai 2013, doi: 10.3390/buildings3020380.
- [25] V. S. K. V. Harish et A. Kumar, « A review on modeling and simulation of building energy systems », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, p. 1272-1292, avr. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.040.
- [26] D. Mazzeo, P. Romagnoni, N. Matera, G. Oliveti, C. Cornaro, et L. De Santoli, « Accuracy Of The Most Popular Building Performance Simulation Tools: Experimental Comparison For A Conventional And A PCM-Based Test Box », Rome, Italy, p. 4530-4537. doi: 10.26868/25222708.2019.210381.
- [27] Tathiane AGRA DE LEMOS MARTINS, « Des contraintes solaires à des opportunités de projet urbain: optimisation de typo-morphologies urbaines en climat tropical », Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 2014. [En ligne]. Disponible sur: https://lra.toulouse.archi.fr/lra/productions/theses-et-hdr-soutenues/theses-soutenues/Tathiane_Agra_de_Lemos_Martins/memoire-these-tathiane-martins/view
- [28] C. Cornaro, V. A. Puggioni, et R. M. Strollo, « Dynamic simulation and on-site measurements for energy retrofit of complex historic buildings: Villa Mondragone case study », *Journal of Building Engineering*, vol. 6, p. 17-28, juin 2016, doi: 10.1016/j.job.2016.02.001.
- [29] Estay Lucas, Ginestet Stéphane, Bonhomme Marion, et Oms Claire, *D.2.1 : cross report on technical points in renovation and building typologie*.
- [30] Alexandre AMOSSÉ, « Projet MAPUCE : Tâche 1.3 : Analyse automatique des îlots urbains de France - Identification automatique d'une typologie urbaine des îlots urbains en France ».
- [31] Tobias Loga *et al.*, « Typology Approach for Building Stock Energy Assessment (TABULA) ». Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2012. Consulté le: 13 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects>

- [32] ENERGYPLUS™, *The Reference to EnergyPlus Calculation - The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory*. 2013. [En ligne]. Disponible sur: <https://wem.lbl.gov/sites/all/files/engineeringreference.pdf>
- [33] ISO 17772-1.
- [34] EN 16798-1.
- [35] K. Ahmed, A. Akhondzada, J. Kurnitski, et B. Olesen, « Occupancy schedules for energy simulation in new prEN16798-1 and ISO/FDIS 17772-1 standards », *Sustainable Cities and Society*, vol. 35, p. 134-144, nov. 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.07.010.
- [36] Humphreys M A , Nicol J F, « Understanding the adaptive approach to thermal comfort », *ASHRAE winter meeting, San Francisco, CA*, vol. 104, n° Symposium papers, p. 1162, 1998.
- [37] R. de Dear et G. Schiller Brager, « The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment », *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, n° 2, p. 100-108, juill. 2001, doi: 10.1007/s004840100093.
- [38] NF EN 15251 : *Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique*. 2007.
- [39] ASHRAE, *ASHRAE HANDBOOK 2017: fundamentals i-p and si editions*. S.I.: ASHRAE, 2017.
- [40] S. Carlucci, L. Bai, R. de Dear, et L. Yang, « Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents », *Building and Environment*, vol. 137, p. 73-89, juin 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.053.
- [41] Observatoire BBC - L'observatoire des batiments basse consommations - Effinergie - Ademe, « Les maisons rénovés a basse consommation - L'observatoire BBC - lefeuvre@effinergie.org », avril 2021.
- [42] ADEME, « L'habitat individuel : Réussir une rénovation performante ». AGIR : Pour un logement plus économe en énergie et plus confortable, 2012. [En ligne]. Disponible sur: https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2012/05/guide_ademe_reussir_renovation_performante.pdf
- [43] La Revue du CGDD., « La rénovation thermique des logements: quels enjeux, quelles solutions ? » 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://docplayer.fr/13230299-La-revue-du-cgdd-la-renovation-thermique-des-logements-quels-enjeux-quelles-solutions.html>
- [44] ADEME, « La rénovation énergétique et environnementale des batiments tertiaires. » ENSEIGNEMENTS ET RETOURS D'EXPÉRIENCE EN AUVERGNE-RHÔNE-ALPE, 2020.
- [45] ADEME *et al.*, « Stratégie de rénovation - PACTE Rapport - Programme d'action pour la qualité de la construction et de la transition énergétique. » Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, 2017.
- [46] Simon Romain THÉBAULT, *Contribution à l'évaluation in situ des performances d'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments*. 2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2017LYSEI008/these.pdf>
- [47] LAYAL CHAHWANE, *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments*. Université de Grenoble, 2011. Consulté le: 21 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00701170/document>
- [48] Fabio Munaretto, *Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments*. 2014. Consulté le: 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01068784/document>

- [49] A. L. Webb, « Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, p. 748-759, sept. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.145.
- [50] F. Lavoye, F. Boeuf, et F. Thellier, *Qualité des ambiances dans les bâtiments: le confort thermique de l'habitant*. 2015.
- [51] Estay Lucas, Ginestet Stephane, Oms Claire, et Marion Bonhomme, *Projet I-HEROS livrable D2.2 / Presentation and analysis report on main tool for assisting renovation*. 2021.
- [52] C. Di Perna, F. Stazi, A. U. Casalena, et M. D'Orazio, « Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads », *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 1, p. 200-206, janv. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.09.007.
- [53] S. Firląg et B. Zawada, « Impacts of airflows, internal heat and moisture gains on accuracy of modeling energy consumption and indoor parameters in passive building », *Energy and Buildings*, vol. 64, p. 372-383, sept. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.04.024.
- [54] M. Fiorentini, L. L. Gomis, D. Chen, et P. Cooper, « On the impact of internal gains and comfort band on the effectiveness of building thermal zoning », *Energy and Buildings*, vol. 225, p. 110320, oct. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110320.
- [55] R. Suárez et J. Fernández-Agüera, « Passive energy strategies in the retrofitting of the residential sector: A practical case study in dry hot climate », *Build. Simul.*, vol. 8, n° 5, p. 593-602, oct. 2015, doi: 10.1007/s12273-015-0234-7.
- [56] J. Yao, « An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements », *Building and Environment*, vol. 71, p. 24-32, janv. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.09.011.
- [57] E. Rodrigues, M. S. Fernandes, A. R. Gaspar, Á. Gomes, et J. J. Costa, « Thermal transmittance effect on energy consumption of Mediterranean buildings with different thermal mass », *Applied Energy*, vol. 252, p. 113437, oct. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113437.
- [58] Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.), *Climate Change 2021 The Physical Science Basis- Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- [59] R. K. Pachauri, L. Mayer, et Intergovernmental Panel on Climate Change, Éd., *Climate change 2014: synthesis report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.
- [60] M. Meinshausen *et al.*, « The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 », *Climatic Change*, vol. 109, n° 1-2, p. 213-241, nov. 2011, doi: 10.1007/s10584-011-0156-z.
- [61] F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, A. Sabio-Ortega, et A. García-Cruz, « Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, p. 736-755, sept. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.095.
- [62] P. Saikia et D. Rakshit, « Passive building cooling achieved with a new class of thermal retrofit: The liquid vapour phase change material », *Energy and Buildings*, vol. 249, p. 111238, oct. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111238.

- [63] S. C. Fu *et al.*, « Bio-inspired cooling technologies and the applications in buildings », *Energy and Buildings*, vol. 225, p. 110313, oct. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110313.
- [64] S. Liu, Y. T. Kwok, K. K.-L. Lau, W. Ouyang, et E. Ng, « Effectiveness of passive design strategies in responding to future climate change for residential buildings in hot and humid Hong Kong », *Energy and Buildings*, vol. 228, p. 110469, déc. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110469.
- [65] Elodie Héberlé, « Synthèse bibliographique des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés ». CEREMA-Direction territoriale Est Laboratoire Régional de Strasbourg, 2016.
- [66] Faiza MNASRI, *Etude du transfert de chaleur et de masse dans les milieux complexes: application aux milieux fibreux et à l'isolation des bâtiments*. 2016.
- [67] M. Zhang, M. Qin, C. Rode, et Z. Chen, « Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption », *Applied Thermal Engineering*, vol. 124, p. 337-345, sept. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.173.
- [68] D. Samri, *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique*. 2008.
- [69] Sophie Claude, « Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain », Toulouse 3 Paul Sabatier - LMDC - INSA Toulouse, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2018ISAT0008>
- [70] A. Magrini, S. Lazzari, L. Marengo, et G. Guazzi, « A procedure to evaluate the most suitable integrated solutions for increasing energy performance of the building's envelope, avoiding moisture problems », *IJHT*, vol. 35, n° 4, p. 689-699, déc. 2017, doi: 10.18280/ijht.350401.
- [71] F. Bennai, M. Y. Ferroukhi, F. Benmahiddine, R. Belarbi, et A. Nouviaire, « Assessment of hygrothermal performance of hemp concrete compared to conventional building materials at overall building scale », *Construction and Building Materials*, vol. 316, p. 126007, janv. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126007.
- [72] Solange V. G. Goulart, « Thermal Inertia and Natural Ventilation-Optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil », Bresil, 2004. [En ligne]. Disponible sur: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_Solange_Goulart.pdf
- [73] « Human Thermal Environments (The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance, Third Edition) International Standards.pdf ».
- [74] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France), *Rénovation énergétique de l'habitat: 15 initiatives de territoires*. Angers: ADEME, 2016.
- [75] A. G. Ruggeri, L. Gabrielli, et M. Scarpa, « Energy Retrofit in European Building Portfolios: A Review of Five Key Aspects », *Sustainability*, vol. 12, n° 18, p. 7465, sept. 2020, doi: 10.3390/su12187465.
- [76] Conseil d'architecture, d'urbanisme et d'environnement Haute Garonne, « Fiche pratique - Les Protections solaires ». 2010. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.les-caue-occitanie.fr/fiche-pratique/les-protections-solaires>
- [77] Matheos Santamouris, « Air Infiltration and Ventilation Centre-Night Ventilation Strategies ». AICVF-International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, 2004. [En ligne]. Disponible sur: https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/VIP/VIP04.Night%20ventilation.pdf

- [78] Y. Zhang, X. Wang, et E. Hu, « Optimization of night mechanical ventilation strategy in summer for cooling energy saving based on inverse problem method », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 232, n° 8, p. 1093-1102, déc. 2018, doi: 10.1177/0957650918766691.
- [79] R. Guo, Y. Hu, M. Liu, et P. Heiselberg, « Influence of design parameters on the night ventilation performance in office buildings based on sensitivity analysis », *Sustainable Cities and Society*, vol. 50, p. 101661, oct. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101661.
- [80] H. Pabiou, J. Salort, C. Ménézo, et F. Chillà, « Natural Cross-ventilation of Buildings, An Experimental Study », *Energy Procedia*, vol. 78, p. 2911-2916, nov. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.666.
- [81] FNCCR et ACTEE, « Rafraîchissement passif et confort d'été - Panorama de solutions pour l'adaptation du bâtiment au changement climatique - Programme CEE ACTEE ». 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.programme-cee-actee.fr/wp-content/themes/actee/assets/media-document/CerclePromodule_Panorama.pdf
- [82] Ghjuvan Antone Faggianelli, « Rafrâchissement par la ventilation naturelle traversantedes bâtiments en climat méditerranéen », 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127944/document>
- [83] « 98/04162 Summer cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates », *Fuel and Energy Abstracts*, vol. 39, n° 5, p. 388, sept. 1998, doi: 10.1016/S0140-6701(98)94157-1.
- [84] R. and A.-C. E. American Society of Heating, *2016 ASHRAE Handbook - Heating Ventilating and Air-Conditioning Systems and Equipment (I-P Edition)*. Place of publication not identified: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2016. Consulté le: 9 avril 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpASHRAEN1/viewerType:toc/root_slug:ashrae-handbook-heating
- [85] G. Martinopoulos, K. T. Papakostas, et A. M. Papadopoulos, « A comparative review of heating systems in EU countries, based on efficiency and fuel cost », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, p. 687-699, juill. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.060.
- [86] S. Obyn et G. van Moeseke, « Comparison and discussion of heating systems for single-family homes in the framework of a renovation », *Energy Conversion and Management*, vol. 88, p. 153-167, déc. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.010.
- [87] J. E. Brumbaugh et J. E. Brumbaugh, *Heating systems, furnaces, and boilers*, All new 4. ed. Indianapolis, Ind: Wiley, 2004.
- [88] T. Cholewa, A. Siuta-Olcha, et C. A. Balaras, « Actual energy savings from the use of thermostatic radiator valves in residential buildings – Long term field evaluation », *Energy and Buildings*, vol. 151, p. 487-493, sept. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.070.
- [89] V. Monetti, E. Fabrizio, et M. Filippi, « Impact of low investment strategies for space heating control: Application of thermostatic radiators valves to an old residential building », *Energy and Buildings*, vol. 95, p. 202-210, mai 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.001.
- [90] D. B. Lee, « Fundamentals of Life-Cycle Cost Analysis », *Transportation Research Record*, vol. 1812, n° 1, p. 203-210, janv. 2002, doi: 10.3141/1812-25.
- [91] P. Ylmén, D. Peñaloza, et K. Mjörnell, « Life Cycle Assessment of an Office Building Based on Site-Specific Data », *Energies*, vol. 12, n° 13, p. 2588, juill. 2019, doi: 10.3390/en12132588.

- [92] A. Rauf et R. H. Crawford, « Building service life and its effect on the life cycle embodied energy of buildings », *Energy*, vol. 79, p. 140-148, janv. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2014.10.093.
- [93] A. Grant et R. Ries, « Impact of building service life models on life cycle assessment », *Building Research & Information*, vol. 41, n° 2, p. 168-186, avr. 2013, doi: 10.1080/09613218.2012.730735.
- [94] R. Kunič, « Carbon footprint of thermal insulation materials in building envelopes », *Energy Efficiency*, vol. 10, n° 6, p. 1511-1528, déc. 2017, doi: 10.1007/s12053-017-9536-1.
- [95] G. Hawkins et Building Services Research and Information Association, *Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. Bracknell: BSRIA, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2014/07/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf>
- [96] « Ecoinvent database 3.1 », *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, Dübendorf, Switzerland, 2014.
- [97] Antti Ruuska (ed.), *Carbon footprint for building products : ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>
- [98] AFNOR, *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction*. 2014.
- [99] Eric LABOUZE Yannick LE GUERN, « Bilan environnemental du chauffage domestique au bois. ADEME : Note de synthèse », *BIO Intelligence Service*, 2005. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/34702_acv_bois_dom.pdf

ANNEXE - A

Tableau 15 : Méthode de calcul des solveurs de STD en fonction des logiciels [26]

Heat transfer approach	TRNSYS	EnergyPlus
Heat transfer between the building envelope and outdoor environment		
Convective with air	Based on a constant or variable convective heat transfer coefficient	Different algorithms based on a constant or variable convective heat transfer coefficient considering natural, mixed or forced convection
Shortwave radiative absorbed by opaque walls	Model based on constant optical properties	Model based on constant optical properties
Longwave radiative with the sky, basement and air	Model based on the thermal exchange between a grey surface and a black body at a fictive temperature. Fictive air temperature excluded	Model based on the thermal exchange between a grey surface and a black body at a fictive temperature. Fictive air temperature included
Conductive in the opaque and transparent wall	Transfer Function Method	Conduction transfer functions or conduction implicit finite difference solution algorithm
Optical and thermal transmission in transparent walls	Complex thermal and optical model, and optical properties dependent on the incidence angle	Complex thermal and optical model, and optical properties dependent on the incidence angle.
Heat transfer between the building envelope and indoor environment		
Convective with air	Based on a constant or variable heat transfer coefficient evaluated considering natural convection	Different algorithms based on a constant or variable convective heat transfer coefficient
Heat flux caused by direct solar radiation originating from external windows	Method of the sunlit factor matrices	Shadowing routines to calculate the internal surface area irradiated by the beam solar radiation projected on the external window
Heat flux caused by diffuse solar radiation originating from external windows	Solar Gebhart matrix method	Method based on transmission-absorption weighted area factors
Longwave radiative between internal walls	Longwave Gebhart matrix method	Grey interchange model of Hottel based on the matrix of exchange coefficients
Heat transfer through a phase change material		
Latent heat storage in the phase change material	Lumped method	Enthalpy method

ANNEXE - B

La première étape pour clarifier l'analyse est d'identifier les paramètres liés les uns aux autres. Pour cela un premier ACP lancé sur l'ensemble des variables permet de déterminer de l'impact de chaque variable. Le graphique de la Figure 40 montre la contribution de chaque variable sur l'inertie des deux axes principaux. Une fois leurs valeurs centrées et réduites, les paramètres liés ont les mêmes valeurs. Les variables superposées et sur le cercle ont donc le exactement le même impact, ce sont donc des variables liées. Les doublons peuvent être éliminés pour simplifier l'étude.

C'est par exemple le cas de la contiguïté avec la surface de façade libre. La matrice de corrélation en Figure 42 permet d'affiner cette étude.

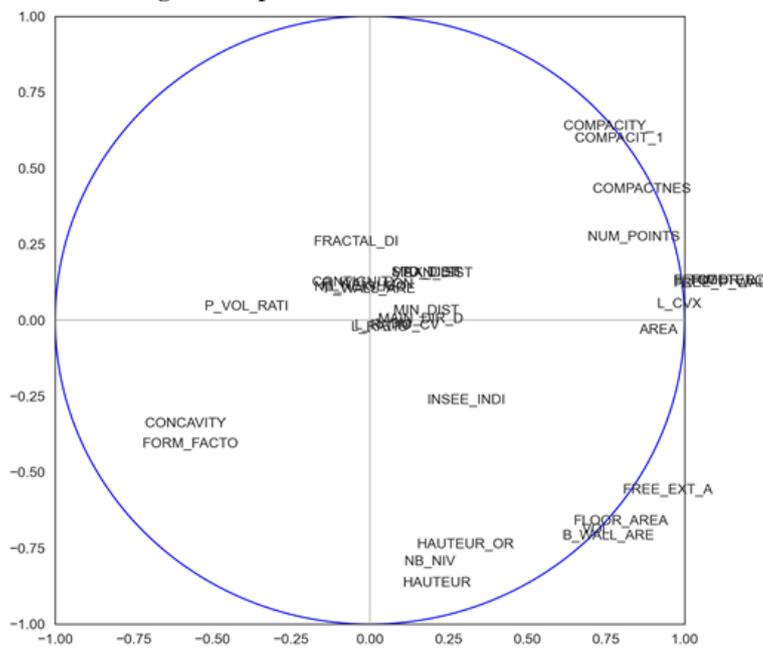


Figure 40 : Etude de corrélation des différentes variables de la base de données Mapuce.

La deuxième étape est l'analyse en composante principale à proprement parler. Il est possible de définir les axes des valeurs propre à partir des 14 variables retenues. Les résultats de l'ACP sont présentés en Figure 41.

Direction	eig Value	Variance
Axe 1	6,251	91.0
Axe 2	2,866	7.0
Axe 3	1,447	1.0
Axe 4	1,035	1.0
Axe 5	0,946	< 1,0
Axe 6	0,680	< 1,0
Axe 7	0,307	< 1,0
Axe 8	0,193	< 1,0
Axe 9	0,133	< 1,0
Axe 10	0,090	< 1,0
Axe 11	0,023	< 1,0
Axe 12	0,018	< 1,0
Axe 13	0,008	< 1,0
Axe 14	0,004	< 1,0

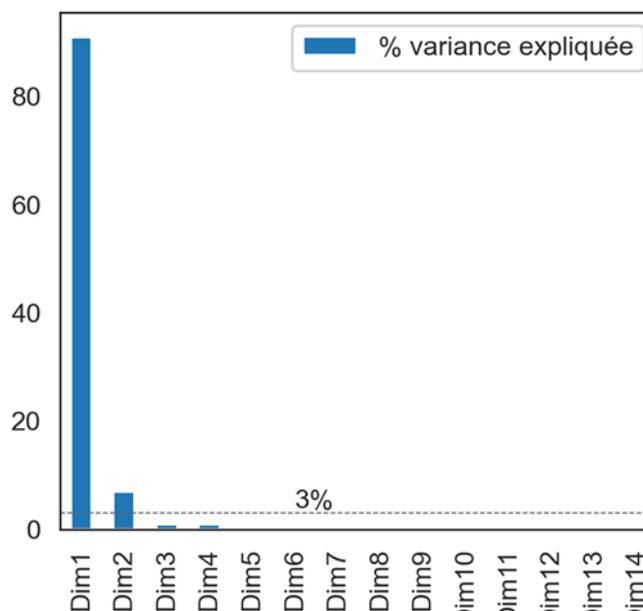
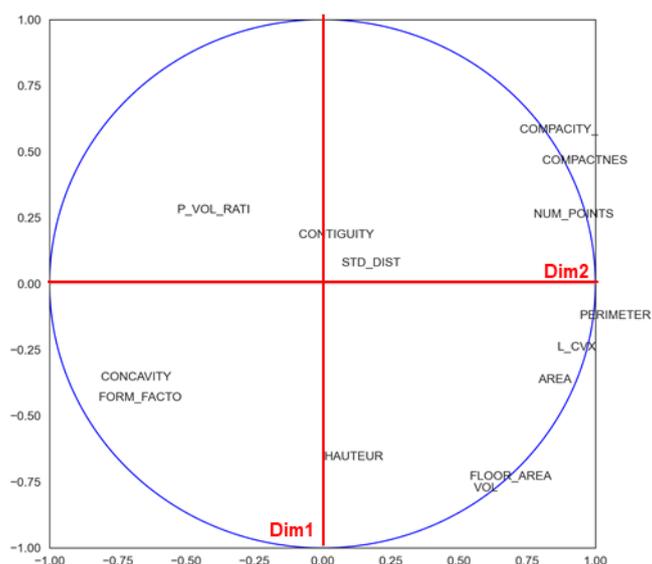


Figure 41 : Corrélation des données projetées sur les valeurs propres et des données réelles

En s'intéressant aux deux premiers axes, la quantité d'informations représentés équivaut à 97% de l'information réelle. La part d'inertie représenté est donc suffisante pour mener la suite de l'étude sur ces deux axes. La Figure 42 détaille la contribution de chaque variable sur les différents axes.



Paramètre	Dim 1		Dim 2	
	Covar	Tot	Covar	Tot
hauteur	0,0061	0,0%	-0,6671	44,5%
area	0,7908	62,5%	-0,3755	14,1%

perimeter	0,9426	88,9%	- 0,1333	1,8%
floor_area	0,5393	29,1%	- 0,7420	55,1%
vol	0,5547	30,8%	- 0,7855	61,7%
compactity_	0,7223	52,2%	0,5707	32,6%
compactnes	0,8057	64,9%	0,4536	20,6%
form_facto	-0,8205	67,3%	- 0,4434	19,7%
concavity	-0,8117	65,9%	- 0,3664	13,4%
contiguity	-0,0875	0,8%	0,1729	3,0%
p_vol_ratio	-0,5324	28,3%	0,2671	7,1%
std_dist	0,0702	0,5%	0,0661	0,4%
num_points	0,7743	59,9%	0,2506	6,3%
l_cvx	0,8607	74,1%	- 0,2529	6,4%

Figure 42 : Représentation des contributions de chaque variable sur les deux axes retenus de l'ACP

ANNEXE - C

Tableau 16 : Résumé des hypothèses de simulations retenues pour la modélisation des bâtiments d'habitations. Exemple pour un jour typique. (Part des apports totaux)

Temps	Scénario d'occupation	Scénario d'équipement	Scénario d'éclairage
00:00-01:00	1.0	0.5	0
01:00-02:00	1.0	0.5	0
02:00-03:00	1.0	0.5	0
03:00-04:00	1.0	0.5	0
04:00-05:00	1.0	0.5	0
05:00-06:00	1.0	0.5	0
06:00-07:00	0.5	0.5	0.15
07:00-08:00	0.5	0.7	0.15
08:00-09:00	0.5	0.7	0.15
09:00-10:00	0.1	0.5	0.15
10:00-11:00	0.1	0.5	0.05
11:00-12:00	0.1	0.6	0.05
12:00-13:00	0.1	0.6	0.05
13:00-14:00	0.2	0.6	0.05
14:00-15:00	0.2	0.6	0.05
15:00-16:00	0.2	0.5	0.05
16:00-17:00	0.5	0.5	0.2
17:00-18:00	0.5	0.7	0.2
18:00-19:00	0.5	0.7	0.2
19:00-20:00	0.8	0.8	0.2
20:00-21:00	0.8	0.8	0.2
21:00-22:00	0.8	0.8	0.2
22:00-23:00	1.0	0.6	0.15
23:00-00:00	1.0	0.6	0.15

ANNEXE - D

Matériaux	Uf	Durée de vie	Production	Processus de construction	Utilisation	Fin de vie	Total cycle de vie	Total sur vie bâtiment (50ans)
Matériaux d'isolation par l'intérieur								
ITI Laine de verre (R=5 m2.K/W)	m2	50	14,5	3,19	0	0,26	17,7	17,7
ITI Laine de roche (R=5m2.K/W)	m2	50	29	2,92	0	0,47	32,4	32,4
ITI Laine de chanvre (R=5m2.K/W)	m2	50	-0,93	2,6	0	6,95	8,62	8,62
ITI Polystyrène expansé (R=5m2.K/W)	m2	50	23	1,81	0	3,29	28,1	28,1
ITI Fibre de coton (R=5m2.K/W)	m2	50	2	0,3	0	0	2,3	2,31
Matériaux de cloisonage intérieur								
Cloison platre (alveolaire 50mm)	m2	50	5,3	1,34	0	0,18	6,82	6,82
Cloison beton	m2	50	17,1	1,49	0	0,65	19,2	19,2
Cloison terre cuite (25 - 50mm)	m2	100	3,47	6	0	0,38	9,83	9,83
Plaque de plâtre (12,5 -18 mm)	m2	50	6,44	2,23	0	0,18	8,85	8,85
Revêtements de finition intérieurs								
Enduit platre	m2	50	1,43	0,42	0	0,06	1,9	1,9
Papier-peint	m2	10	0,84	0,13	0	0,04	1,01	5,05
Peinture solvant	m2	10	1,21	0,08	0	0,03	1,31	6,55
Peinture acqueuses	m2	7	2,67	0,34	0	0,12	3,13	25,04
Matériaux d'isolation par l'extérieur								
ITE Laine de verre (R=5 m2.K/W)	m2	50	7,41	1,04	0	0,05	8,5	8,5
ITE Laine de roche (R=5 m2.K/W)	m2	50	25,6	2,7	0	0,38	28,7	28,7
ITE Fibre de bois (R=5 m2.K/W)	m2	50	-38,3	2,36	0	35,4	-0,49	-0,485
ITE Polystyrène expansé (R=5 m2.K/W)	m2	50	15,1	0,34	0	0,01	15,4	15,4
ITE résine phénolique (R=5 m2.K/W)	m2	50	29,9	2,94	0	0,91	33,7	33,7
Revêtements de finition extérieur								
Bardage bois massif (20mm)	m2	40	-8,17	1,58	0	18	11,4	22,8
Bardage bois reconstitué (20mm)	m2	40	-1,65	2,76	0	9,81	10,9	21,8
Bardage acier	m2	50	40,6	2,16	0	0,2	42,9	42,9
Bardage pierre naturelle	m2	50	50,6	14,4	0	1,52	66,6	66,6
Bardage briquettes parremont	m2	100	20,8	9,5	0	0,41	30,7	30,7
Mortier d'enduit d'origine minerale	m2	50	8,72	0	0	0,01	8,73	8,73
Mortier d'enduit d'origine organique	m2	30	2,64	0	0	0	2,64	5,28

Version Finale

Revêtements de finition extérieur								
Bardage bois massif (20mm)	m2	40	-8,17	1,58	0	18	11,4	22,8
Bardage bois reconstitué (20mm)	m2	40	-1,65	2,76	0	9,81	10,9	21,8
Bardage acier	m2	50	40,6	2,16	0	0,2	42,9	42,9
Bardage pierre naturelle	m2	50	50,6	14,4	0	1,52	66,6	66,6
Bardage briquettes parrement	m2	100	20,8	9,5	0	0,41	30,7	30,7
Mortier d'enduit d'origine minerale	m2	50	8,72	0	0	0,01	8,73	8,73
Mortier d'enduit d'origine organique	m2	30	2,64	0	0	0	2,64	5,28
Revêtements de finition sols								
Revêtement de sol dur en céramique (7 - 10 mm)	m2	50	30,3	8,4	11,1	0,86	50,7	50,7
Parquet bois massif (14 - 23 mm)	m2	50	-16,6	13,9	15,8	27,8	40,8	40,8
Parquet en bois contrecollé (12 - 15 mm)	m2	30	1,87	10,1	7,08	17,1	36,2	72,4
Revêtement de sol dur en terre cuite (10 - 15mm)	m2	50	13,8	7,66	0	5,77	27,2	27,2
Revêtement pour sols en pierre naturelle (10mm)	m2	100	30,1	8,3	0	6,67	45,1	45,1
Revêtement de sol souple en linoléum	m2	25	24,7	4,4	5,36	0,59	34,7	69,4
Revêtements de toitures								
Revetement toiture feuilles bitumes	m2	30	9,75	6,6	0	1,91	18,3	36,6
Elements couverture ardoise (4mm)	m2	100	9,82	2,62	0	0,59	13,1	13,1
Elements couverture tuiles	m2	100	26,4	1,83	0	0,48	28,6	28,6
Revetement toiture zinc	m2	100	35,5	3,69	0	0,63	39,8	39,8
Différents types de menuiseries								
Menuiserie double vitrage aluminium (Uw: 2,4 W/M_K)	m2	30	399	22,6	1,89	13	436	872
Menuiserie double vitrage acier (Uw: 1,4 W/M_K)	m2	30	183	33,5	0	13,8	231	462
Menuiserie bois massif double vitrage (Uw=1,4 W/(m2,K))	m2	25	74,8	27,7	27	26	155	310
Menuiserie PCV double vitrage (Uw=1,4 W/(m2,K))	m2	30	113	10,9	0	3,95	128	256

ANNEXE - E

Système CVC	Uf	Durée de vie	Production	Processus de construction	Utilisation	Fin de vie	Total cycle de vie
Système de production de chaleur							
Pompe a chaleur air/air (5-10kW)	Unité	22	1370	77,7	0	45,1	1490
Pompe a chaleur air/eau (6-10kW)	Unité	17	4150	140	0	1150	5440
Pompe a chaleur air/air (40-60kW)	Unité	22	8350	743	0	264	9360
Pompe a chaleur eau/eau (30 - 60 kW)	Unité	17	1380	149	0	104	1640
Chaudière fioul (25kW)	Unité	16	2060	487	0	259	2810
Chaudière fioul (100kW)	Unité	21	3090	770	0	415	4270
Poele bois (6 -10kW)	Unité	16	628	146	0	81	855
Poele granule (6 -10kW)	Unité	16	926	243	0	48,8	1220
Chaudière biomasse collective (65kW)	Unité	21	3260	411	0	324	3990
Chaudière gaz (12-25kW)	Unité	21	1040	201	0	100	1340
Chaudière gaz à condensation (50-100kW)	Unité	16	2180	154	0	137	2470
Chaudière gaz à condensation (12-25kW)	Unité	21	1040	201	0	100	1340
Foyers fermés et inserts à bois bûche en acier (11kW)	Unité	20	691	92,7	0	75,8	860
Emetteurs de chaleur							
Radiateurs eau chaude (1-2kW)	Unité	50	321	26	0	16,1	363
Plancher chauffant	m2	50	36,2	0	0	3,4	825
Seche serviettes (1kW)	Unité	17	360	7,88	0	4,42	372
Convecteur électrique (1kW)	Unité	17	188	31,1	0	13,3	219
Système de production d'eau chaude sanitaire							
Chauffe eau électrique (50-200L)	Unité	15	233	22	0	26	281
Chauffe eau thermodynamique (100L)	Unité	17	973	37,3	0	192	1200
Chauffe eau gaz	Unité	17	824	195	0	104	1120
Chauffe eau solaire (100-200L)	Unité	15	1250	437	0	31,4	1710
Systèmes de ventilation							
VMC simple flux Hygro B (59m3/h)	Unité	17	19,7	0,38	0	1,53	120
VMC double flux auto-réglable (90 et 165 m3/h)	Unité	17	152	3,71	0	14,3	320