

INSA TOULOUSE

# PROJET I-HEROS

## LIVRABLE TACHE D2.1

---

CROSS REPORT ON TECHNICAL POINTS IN  
RENOVATION AND BUILDING TYPOLOGIE

---



**INSA**  
TOULOUSE

LUCAS ESTAY  
STEPHANE GINESTET  
MARION BONHOMME  
CLAIRE OMS MULTON



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 890598.

## SUIVI DES REVISIONS

| Indice    | Date       | Motif et description de la modification                                              |
|-----------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Version 1 | 27/01/2021 | Version initiale                                                                     |
| Version 2 | 23/02/2021 | Corrections et rédaction suite                                                       |
| Version 3 | 05/03/2021 | Réagencement parties, corrections, graphiques                                        |
| Version 4 | 16/03/2021 | Mise en perspective objectifs rénovation, étude de cas observatoire de la rénovation |
| Version 5 |            | Diffusion partenaire I-HEROS                                                         |





This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 890598.



# RESUME

Le parc de bâtiment résidentiel est l'un des principaux consommateurs énergétiques en France et il est responsable d'une grande partie des gaz à effet de serre. Pour réduire ses impacts environnementaux, les réglementations thermiques se sont succédé. Cependant, la rénovation du parc de bâtiment existant demeure le principal levier d'action pour réduire les consommations énergétiques des logements.

Si la rénovation thermique n'est pas encore massive, c'est que c'est une problématique complexe. Elle nécessite d'avoir une compréhension globale des techniques de rénovation envisageables, de l'histoire du bâtiment (mode de construction, modifications actuelles d'utilisation) et de son environnement urbain (morphologie de la parcelle, accès à l'énergie). En effet, le mode de construction d'un bâtiment et son environnement proche affectent de manière significative la viabilité des solutions de rénovation présentées.

Ce rapport s'intéresse donc aux aspects techniques des rénovations des bâtiments représentant la majorité du parc immobilier existant. L'objectif est de dresser un état de l'art des différentes pratiques et matériaux utilisés pour les comparer selon une approche multicritère (énergétique, environnementale, hydrique, confort thermique, qualité de l'air, etc.). En parallèle, une étude des caractéristiques propres au parc de bâtiment toulousain doit permettre de comprendre les besoins de rénovations adaptés au territoire. C'est en couplant ces deux tâches qu'il sera possible de proposer une stratégie de rénovation adaptée au territoire de Toulouse.

Pour cela, le document est séparé en différentes parties. La première, plutôt théorique, a pour objectif de dresser un rapide état de l'art des notions permettant la comparaison des différentes méthodes et solutions de rénovations. Elles seront comparées selon des critères thermiques, hydriques, environnementales, de confort et de pollution de l'air.

La deuxième partie s'intéresse aux matériaux de constructions et à leur méthode de mise en œuvre. La rénovation des logements fait généralement appel à des solutions "industrielles" dont les professionnels peuvent tirer parti. Avoir une vision complète de ce catalogue de solutions permet une approche plus globale du bâtiment. Un tableau comparatif permet d'évaluer les matériaux en fonction des critères et grandeurs définies en première partie. Les techniques de constructions et les menuiseries peuvent également être comparées selon des critères de performances. Il est tout de même important de garder à l'esprit que le choix de la nature des travaux de rénovation est un processus spécifique et global qui ne dépend pas uniquement des critères de performances techniques. Le projet



doit par exemple tenir compte des attentes des occupants, des dispositions spécifiques auxquelles peuvent être soumises le bâtiment, de l'aspect financier, etc.

La troisième partie détaille les systèmes de Chauffage, Climatisation et Ventilation (CVC). Les équipements de chauffage et climatisation sont classés par types, efficacités énergétiques et financières. Les principaux émetteurs de chaleurs associés sont comparés sur des critères de confort thermique et de qualité de l'air. L'état de l'art des systèmes de ventilation couvre les différents types d'installations existant à ce jour et détaille les possibilités d'amélioration énergétique et sanitaire.

La quatrième partie s'intéresse aux besoins spécifiques du parc existant dans le cadre du projet I-HEROS. Comprendre quels sont les besoins du territoire est un moyen de comprendre les enjeux liés à la rénovation sur le territoire de Toulouse Métropole. L'étude s'intéresse dans un premier temps à un relevé de terrain réalisé par la mairie de Toulouse pour ensuite se diriger vers des notions de modélisation à l'échelle urbaine afin d'évaluer l'impact environnemental. En conclusion cette partie dresse une première version du profil énergétique et environnemental du territoire de Toulouse métropole selon des critères de technologies de construction, d'âge, et de localisation spatiale.

Enfin la dernière partie, qui peut être vue comme une introduction du travail à venir, est une étude de cas d'un parcours de rénovation sur le territoire toulousain. L'intérêt ici est d'illustrer le choix d'une stratégie de rénovation la plus adaptée pour un bâtiment donné, en tenant compte de facteurs multicritères spécifiques.



# SOMMAIRE

|            |                                                                    |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUCTION</b>                                                | <b>13</b> |
| <b>2</b>   | <b>NOTIONS THEORIQUES DE BASE</b>                                  | <b>15</b> |
| <b>3</b>   | <b>COMPARAISON DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE RENOVATION</b>        | <b>16</b> |
| <b>4</b>   | <b>APPROCHE TYPOLOGIQUE DU PARC DE BATIMENT</b>                    | <b>17</b> |
| <b>4.1</b> | <b>CONTEXTE DU TERRITOIRE TOULOUSAIN</b>                           | <b>17</b> |
| <b>4.2</b> | <b>MODELISATION DU PARC DE BATIMENT</b>                            | <b>19</b> |
| 4.2.1      | APPROCHES CLASSIQUES                                               | 19        |
| 4.2.2      | APPROCHE HYBRIDE                                                   | 20        |
| <b>4.3</b> | <b>ETUDE TYPOLOGIQUE DU PARC TOULOUSAIN</b>                        | <b>21</b> |
| 4.3.1      | APPROCHE CLASSIQUE : CENTRE D'URBANISME TOULOUSAIN                 | 21        |
| 4.3.2      | APPROCHE MODULAIRE : PROJET MAPUCE                                 | 23        |
| <b>5</b>   | <b>RETOUR D'EXPERIENCE DE PROJETS DE RENOVATION : ETUDE DE CAS</b> | <b>36</b> |
| <b>5.1</b> | <b>RESIDENCE PAVILLONAIRE 1945 – 1975</b>                          | <b>36</b> |
| <b>5.2</b> | <b>COPROPRIETE BELLE PAULE – IMEUBLE DISCONTINU 1994</b>           | <b>39</b> |
| <b>5.3</b> | <b>CENTRE HISTORIQUE CAHORS – BATI ANCIEN AVANT 1945</b>           | <b>39</b> |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSION</b>                                                  | <b>40</b> |
| <b>1</b>   | <b>ANNEXE 1 : NOTIONS THEORIQUES GENERALES</b>                     | <b>56</b> |
| <b>1.1</b> | <b>NOTIONS DE THERMIQUE</b>                                        | <b>56</b> |



|            |                                                                                     |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.1.1      | GENERALITES                                                                         | 56        |
| 1.1.2      | DEPERDITION SURFACIQUE D'UNE PAROI                                                  | 57        |
| 1.1.3      | DEPERDITION LINEIQUE OU PONCTUELLE D'UNE PAROI                                      | 59        |
| 1.1.4      | INERTIE THERMIQUE                                                                   | 60        |
| <b>1.2</b> | <b>PROPRIETES HYDRIQUES</b>                                                         | <b>61</b> |
| 1.2.1      | GENERALITES                                                                         | 61        |
| 1.2.2      | FLUX DE VAPEUR AU TRAVERS D'UN MUR                                                  | 63        |
| <b>1.3</b> | <b>QUALITE DES AMBIANCES INTERIEURES.</b>                                           | <b>64</b> |
| 1.3.1      | ETUDE THEORIQUE                                                                     | 64        |
| 1.3.2      | CONFORT ET MODELES DE PERCEPTION THERMIQUE (CT)                                     | 66        |
| <b>1.4</b> | <b>QUALITE DE L'AIR INTERIEUR</b>                                                   | <b>68</b> |
| 1.4.1      | DIFFERENTS TYPES DE POLLUANTS                                                       | 69        |
| 1.4.2      | CONTROLE DE LA QUANTITE DE POLLUANTS                                                | 71        |
| <b>1.5</b> | <b>ANALYSE DE CYCLE DE VIE</b>                                                      | <b>72</b> |
| 1.5.1      | DEFINITION                                                                          | 72        |
| 1.5.2      | DEMARCHE D'UNE ACV APPLIQUEE AU BATIMENT                                            | 73        |
| 1.5.3      | INDICATEURS COURAMMENT UTILISES                                                     | 74        |
| <b>2</b>   | <b><u>ANNEXE 2 : ETUDE DES DIFFERENTES SOLUTIONS DE RENOVATIONS EXISTANTES</u></b>  | <b>76</b> |
| <b>2.1</b> | <b>ISOLATION PAR L'INTERIEUR</b>                                                    | <b>76</b> |
| <b>2.2</b> | <b>ISOLATION PAR L'EXTERIEUR</b>                                                    | <b>80</b> |
| <b>2.3</b> | <b>MENUISERIES</b>                                                                  | <b>83</b> |
| 2.3.1      | ECHANGES THERMIQUES D'UNE FENETRE                                                   | 84        |
| 2.3.2      | IMPACT SOLAIRE : FACTEUR SOLAIRE, EMISSIVITE ET PROTECTION SOLAIRE D'UNE MENUISERIE | 87        |



|            |                                                  |            |
|------------|--------------------------------------------------|------------|
| 2.3.3      | RENOVATION DES MESUISERIES                       | 89         |
| <b>2.4</b> | <b>COMPARAISON DES PRINCIPAUX MATERIAUX</b>      | <b>89</b>  |
| 2.4.1      | LES ISOLANTS                                     | 92         |
| 2.4.2      | LES ENDUITS ET PLAQUES DE FINITION               | 93         |
| 2.4.3      | IMPACT ENVIRONEMENTAL PAR MATERIAUX              | 94         |
| <b>3</b>   | <b>LES SYSTEMES</b>                              | <b>96</b>  |
| <b>3.1</b> | <b>SYSTEMES DE PRODUCTION DE CHALEUR</b>         | <b>96</b>  |
| 3.1.1      | CHAUFFAGE URBAIN                                 | 97         |
| 3.1.2      | SYSTEMES DE CHAUFFAGES PONCTUELS                 | 97         |
| 3.1.3      | SYSTEME DE PRODUCTION CENTRALISEE                | 102        |
| 3.1.4      | COMPARAISON DES SYTEMES DE PRODUCTION DE CHALEUR | 106        |
| <b>3.2</b> | <b>SYSTEMES DE RAFRAICHISSEMENTS</b>             | <b>107</b> |
| <b>3.3</b> | <b>SYSTEMES DE GESTION DE LA VENTILATION</b>     | <b>109</b> |
| 3.3.1      | VENTILATION NATURELLE                            | 110        |
| 3.3.2      | VENTILATION MECANIQUE                            | 110        |
| 3.3.3      | REGULATION DES CONDITIONS DE VENTILATION         | 113        |
| 3.3.4      | FOCUS SUR LA QAI                                 | 114        |
| <b>3.4</b> | <b>SYSTEMES SOLAIRES</b>                         | <b>115</b> |
| <b>3.5</b> | <b>REPLACEMENT D'UN SYSTEME</b>                  | <b>116</b> |



# TABLE DES FIGURES

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 1 : Représentation schématique des différents échanges thermiques dans un habitat                                                                | 56  |
| Figure 2 : Schématisation du flux thermique au travers d'une paroi multicouche                                                                          | 59  |
| Figure 3 : Différentes étapes de fixation de l'eau dans les pores d'un matériau                                                                         | 62  |
| Figure 4 : Diagramme de Givoni : Zone de confort en fonction de la saison pour une vitesse d'air calmes [29]                                            | 68  |
| Figure 5 : Détail des principaux polluants référencés en fonction de leurs tailles de leurs provenances [19]                                            | 71  |
| Figure 6 : Logigramme de fonctionnement d'une étude d'analyse de cycle de vie                                                                           | 73  |
| Figure 7 : Cadre d'étude d'une analyse de cycle de vie appliqué au bâtiment                                                                             | 74  |
| Figure 8 : Principales opérations de rénovation dans un bâtiment de logement (conférence Ile de France Energie [47])                                    | 16  |
| Figure 9 : Coefficient de conductivité thermique d'un mur type en fonction de l'épaisseur d'isolants pour les 5 configurations principales d'ITI        | 79  |
| Figure 10 : Illustration des différentes techniques d'isolation par l'extérieur selon Bendouma [49]                                                     | 81  |
| Figure 11 : Représentation d'un pont thermique intégré due aux équerres en ITE                                                                          | 82  |
| Figure 12 : Exemple de représentation pont thermique intégré due aux chevilles en ITE                                                                   | 83  |
| Figure 13 : Représentation des différents composants d'une fenêtre                                                                                      | 84  |
| Figure 14 : Comparaison des coefficients de transferts du vitrage en fonction du type de gaz dans la lame d'air pour des émissivités basses et normales | 85  |
| Figure 15 : Caractéristiques environnementales des principaux isolants [61] <b>Erreur ! Signet non défini.</b>                                          |     |
| Figure 16 : Caractéristiques environnementales des enduits et plaques de finition intérieurs [61]                                                       | 94  |
| Figure 17 : Caractéristiques environnementales des enduits extérieurs [61]                                                                              | 95  |
| Figure 18 : Schématisation du fonctionnement des mécanismes de ventilation naturelle                                                                    | 110 |
| Figure 19 : Schématisation d'un système de ventilation simple flux [33]                                                                                 | 111 |
| Figure 20 Schématisation d'un système de ventilation a double flux [33]                                                                                 | 112 |
| Figure 21 Schématisation d'un système de centrale de traitement de l'air [19]                                                                           | 114 |
| Figure 22 : Diagramme d'utilisation des systèmes CVC en fonction des caractéristiques d'un air extérieur                                                | 117 |
| Figure 23 : Ancienneté du parc immobilier toulousain                                                                                                    | 18  |
| Figure 24 : Répartition des consommations énergétiques de Toulouse Métropole en fonction du type de logement [76]                                       | 19  |
| Figure 25 : Typologies de bâtiments recensés par la mairie de Toulouse sur son territoire                                                               | 23  |
| Figure 26 : Répartition typologique des différentes morphologies de bâtiment à Toulouse                                                                 | 28  |
| Figure 27 : Répartition des parts de types de bâtiments sur le territoire toulousain                                                                    | 29  |
| Figure 28 : Répartition des typologies en fonction des années de construction                                                                           | 30  |
| Figure 29 : Schématisation de la logique de sélection de la matérialité d'un bâtiment selon l'algorithme GENIUS                                         | 31  |
| Figure 30 : Répartition des caractéristiques énergétiques DPE des bâtiments toulousains en fonction de l'âge et la typologie                            | 32  |



*Figure 31 : Répartition des caractéristiques environnementales DPE des bâtiments toulousains en fonction de l'âge et la typologie*

32



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 890598.

# TABLE DES TABLEAUX

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Tableau 1 : Indicateurs environnementaux d'une étude AVC</i>                                                              | 75  |
| <i>Tableau 2 : Valeurs classiques de coefficient de transferts thermique des menuiseries en fonction du type de vitrage.</i> | 85  |
| <i>Tableau 3 : Comparaison des matériaux de construction des cadres de menuiseries</i>                                       | 86  |
| <i>Tableau 4 : Comparaison des propriétés des principaux matériaux d'isolation [61]</i>                                      | 92  |
| <i>Tableau 5 : Comparaison des propriétés des principaux matériaux de finition [61]</i>                                      | 93  |
| <i>Tableau 6 : Récapitulatif des différentes technologies de chauffages individuels</i>                                      | 102 |
| <i>Tableau 7 : Cout d'exploitation d'une installation par type d'énergie utilisé (€/kWh)</i>                                 | 107 |
| <i>Tableau 8 : Efficacité des différents types de systèmes de production de chaleur</i>                                      | 107 |
| <i>Tableau 9 : Description et représentation des classes typologiques en fonction des morphologies urbaines</i>              | 24  |





# 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 en CO<sub>2</sub> 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]. d'ici a 2050, le ministère de la transition écologique vise la réduction consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012 (155,1 Mtep), en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030 pour une réduction équivalente de 40 % d'émission de GES [3], [4].

On estime que les  $\frac{3}{4}$  du parc de logements de 2050 existe déjà [5], et pourtant plus de 35% des logements ont plus de 50 ans [6]. Un facteur clé de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment est donc la rénovation de l'efficacité énergétique du parc immobilier existant [7]. 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 [8], [9].

L'objectif de ce document est de présenter et de comparer les différentes solutions techniques, puis dans un second temps d'établir les principales caractéristiques du territoire toulousain. Ainsi, il sera possible dans la suite du projet d'étudier les solutions les plus adaptées à la métropole.

La première partie, plutôt théorique s'intéresse aux connaissances fondamentales des critères de comparaisons qui serviront dans les parties suivantes à comparer les matériaux et les techniques. A savoir, les transferts thermiques et hydriques, la qualité de l'air, le confort thermique et la qualité environnementale

Les deuxième et troisième partie dressent un benchmark des différentes solutions techniques en rénovation. La finalité de ce benchmark met en avant la corrélation et le couplage des différents domaines. Le fonctionnement d'un bâtiment est un système complexe où chaque choix aura des incidences sur plusieurs plans. C'est pour cette raison qu'il est important d'aborder une approche multicritère.



Après avoir défini une méthode de comparaison et un classement des différents systèmes, méthodes et matériaux, la suite du document s'intéresse au cas toulousain et aux besoins associés au parc de bâtiments du territoire. Au vu des résultats, la répartition typographique et démographique est très variable en fonction de la localisation des bâtiments par rapport au centre-ville. On note néanmoins une part importante de maisons individuelles pavillonnaires et d'immeuble continus ou discontinus.

Enfin, la dernière partie de l'étude illustre le document par l'étude de cas d'une rénovation sur le territoire de Toulouse métropole pour introduire la notion de solutions adaptées au territoire de Toulouse.



## 2 NOTIONS THEORIQUES DE BASE

---

L'objectif principal de ce chapitre est de détailler les notions théoriques générales permettant la compréhension des domaines suivants :

- Les transferts thermiques dans les bâtiments
- Les transferts de masses et les migrations hydriques dans les bâtiments
- L'étude environnementale d'un bâtiment, aussi appelée analyse de cycle de vie
- Le confort thermique et plus particulièrement en été
- La qualité intérieure de l'air

Le détail de ces différentes études est disponible en Annexe 1 : Notions théoriques générales. Voir Page 56.

Ce chapitre conclut que l'étude et l'interaction de ces différents secteurs sont un processus complexe qui nécessite une approche multicritère. En effet chaque solution interagit avec un ensemble de sous domaines, du point de vue thermique, hygroscopique, ACV, confort ou encore la QAI. De plus, Chaque projet de rénovation est un cas unique qui doit être traité de manière indépendante en fonction de son contexte historique et géographique. Il n'existe donc pas de solutions prédéfinies.

C'est pour cette raison que la suite du document est consacrée à l'étude des différentes techniques de façon indépendante. L'objectif est de définir quelles sont celles qui répondent à tous ces enjeux.



### 3 COMPARAISON DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE RENOVATION

Généralement, dans le secteur du logement, la rénovation énergétique passe par l'amélioration de l'isolation thermique. Ce n'est pas le seul poste sur lequel intervenir comme on peut le voir sur la Figure 1 qui récapitule les différents points à traiter lors de la rénovation d'un bâtiment d'habitation [51].

L'amélioration de l'isolation des parois consiste à installer un matériau de faible conductivité thermique pour limiter les échanges entre le coté chaud et le coté froid de la paroi concernée : la réduction de déperdition permet de limiter l'impact du climat extérieur sur l'ambiance intérieure et donc de diminuer les consommations des systèmes de chauffage et climatisation. C'est aussi un bon moyen de palier aux problématiques de parois froides.

Nous présenterons par la suite les deux principales techniques (isolation thermique par l'intérieur, isolation thermique par l'extérieur). Voir Annexe 2 : Etude des différentes solutions de rénovations existantes : Page 76. Puis nous aborderons le thème des menuiseries. Enfin le chapitre relatif aux systèmes CVC sera traité dans un chapitre à part. Voir Annexe 3 : Les Systèmes CVC : Page 96

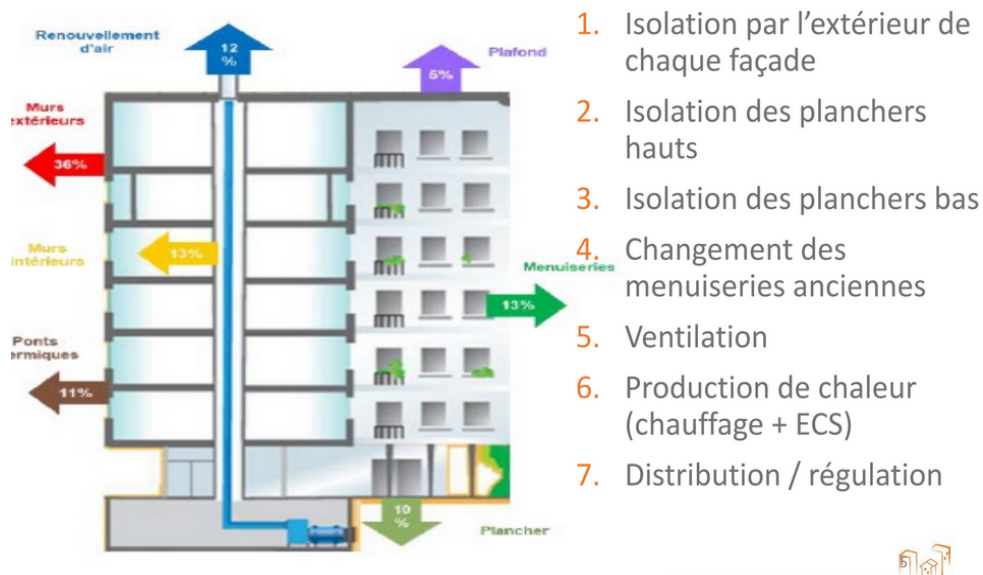


Figure 1 : Principales opérations de rénovation dans un bâtiment de logement (conférence Ile de France Energie [51])



# 4 APPROCHE TYPOLOGIQUE DU PARC DE BATIMENT

---

Nous venons de voir que le fonctionnement d'un bâtiment est un système complexe où chaque choix aura des incidences sur tous les plans. C'est pour cette raison qu'il est important d'aborder une approche multicritère.

Après avoir défini une méthode de comparaison et un classement des différents systèmes, méthodes et matériaux, la suite du document s'intéresse au cas toulousain et aux besoins associés au parc de bâtiment du territoire. Au vu des résultats, la répartition typologique et démographique est très variable en fonction de la localisation des bâtiments par rapport au centre-ville.

## 4.1 CONTEXTE DU TERRITOIRE TOULOUSAIN

L'objectif de cette partie est de définir les caractéristiques du territoire toulousain. Comprendre quels sont les besoins du territoire est un moyen de comprendre les enjeux liés à la rénovation sur le territoire de Toulouse Métropole. A terme, il sera ainsi possible de proposer un panel de solutions adaptées aux objectifs de résultats des projets de cette ville.

Plusieurs études similaires ont été proposées par Toulouse Métropole : étude de préfiguration de la plateforme de rénovation énergétique de l'habitat, état des lieux et benchmark [90], [91]. Pour compléter ces propos, l'Agence de l'Urbanisme et de l'Aménagement Toulousaine propose plusieurs documents sur ce thème [92], [93]. La base de données des DPE permet également d'étudier les statistiques associées au territoire. [94]

En quelques chiffres clés, la métropole de Toulouse comptabilise :

- 37 communes
- 746 900 habitants
- 458 km<sup>2</sup> (Soit 1 630 habitants/km<sup>2</sup>)

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 2 est un diagramme qui représente l'ancienneté du parc de logement toulousain.



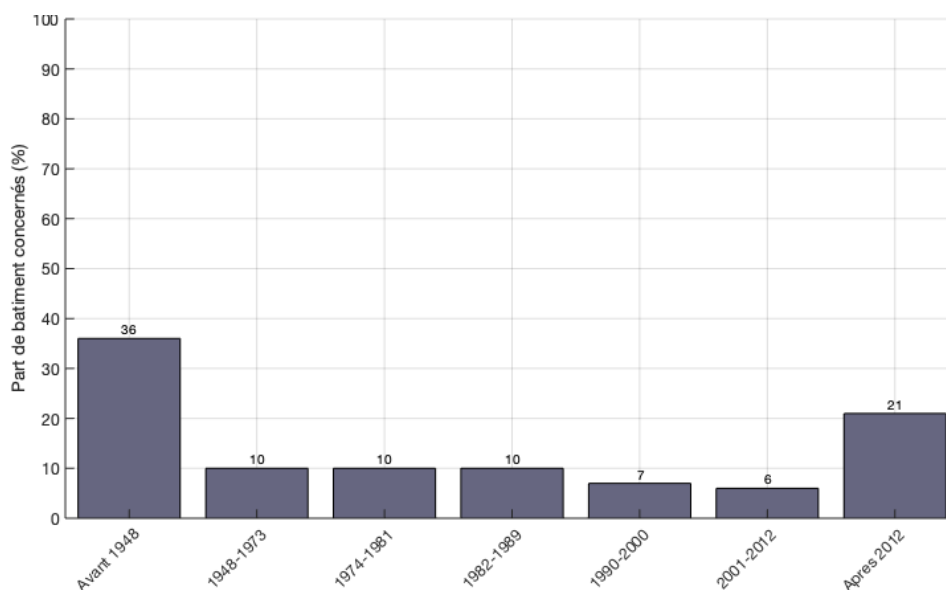


Figure 2 : Ancienneté du parc immobilier toulousain (Base de Donnée DPE 2020 [94])

On distingue trois grandes périodes de construction : les logements construits avant 1945, les logements construits pendant les 30 glorieuses et ceux construits après 1975. Le parc toulousain est relativement récent puisque plus de la moitié des logements sont dans cette dernière catégorie.

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 3)<sup>1</sup>. 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.

---

<sup>1</sup> 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 %. [91], [95]



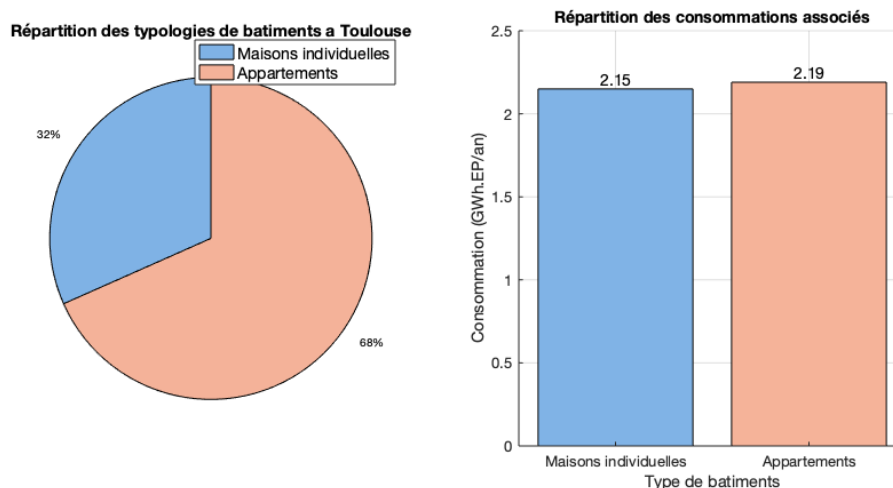


Figure 3 : Répartition des consommations énergétiques de Toulouse Métropole en fonction du type de logement [90]

## 4.2 MODELISATION DU PARC DE BATIMENT

### 4.2.1 APPROCHES CLASSIQUES

Une partie de la thèse d'Adelaïde Mailhac intitulée « Contribution au développement d'une méthodologie d'évaluation environnementale aux échelles urbaines » dresse un état de l'art des méthodes de modélisation d'un parc de bâtiments à l'échelle d'une ville [77], [81]. Il en résulte que l'utilisation de classes, ou typologie, de bâtiments pour la simulation d'un parc immobilier est une pratique courante dans certains domaines. Par exemple, pour la recherche d'efficacité énergétique ou pour des études environnementales afin de mieux comprendre les enjeux liés au territoire et ainsi mettre en perspective les solutions les plus adaptées .

Mastrucci et al présentent dans leur article deux méthodes d'évaluation des performances des parcs de bâtiments [97] : l'approche typologique et l'approche exhaustive.

- L'approche typologique. C'est la plus courante. Elle permet par exemple l'automatisation de 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 besoins environnementaux associés.

En France, plusieurs projets sont à l'origine d'initiatives de ce type de classification :



- 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. [9]
  - 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 [98].
  - Les deux rapports rédigés dans le cadre des accords du Grenelle de l'environnement : le programme RAGE et le projet PACTE [95]. 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.
- La deuxième approche consiste à modéliser les bâtiments de manière exhaustive, un à un, sur un échantillon représentatif puis d'étendre les résultats au reste du parc immobilier. Le résultat obtenu est plus représentatif de la réalité. En revanche ce type de procédé peut devenir laborieux sur un parc de bâtiments nombreux. Un exemple d'initiative de ce type est la base de données nationale des DPE qui recense les résultats des relevés de terrains et expose les résultats de modélisations associés bâtiment par bâtiments [94].

#### 4.2.2 APPROCHE HYBRIDE

Les deux méthodes que nous venons d'étudier présentent respectivement des avantages et des inconvénients de précision, de moyens ou de difficultés de mise en œuvre. Aborder le sujet grâce à une approche hybride croisant les deux méthodes peut permettre de trouver un compromis. Il s'agit de coupler l'étude d'informations à l'échelle individuelle à des algorithmes de recoupement de données, en fonction des typologies.

La projet MApUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Energie) [96], [99] utilise 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.

On retrouve notamment ce type d'approche hybride dans le développement du logiciel Casba-Siterre par Energy Demain. Elle permet une plus grande flexibilité d'utilisation et des possibilités d'évolution par rapport aux méthodes classiques. ( voir livrable 2.1 I-HEROS )

### **4.3 ETUDE TYPOLOGIQUE DU PARC TOULOUSAIN**

Nous venons de montrer l'importance d'étudier les caractéristiques d'un parc de bâtiments pour comprendre ses enjeux et proposer des solutions de réhabilitation adaptés. Pour cela il existe deux approches, l'une basée sur le relevé sur site des différentes classes de bâtiments, l'autre sur l'extrapolation numérique. Nous proposons dans cette partie de détailler ces deux méthodes. Puis dans un second temps de faire l'étude des caractéristiques du parc de logement toulousain issues de différentes bases de données.

#### **4.3.1 APPROCHE CLASSIQUE : CENTRE D'URBANISME TOULOUSAIN**

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 » [100]. Ou encore la DREAL Occitanie avec les fiches pratiques par typologies de bâtiment « Rénovation du bâti ancien en Occitanie » [101].

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.

En parallèle, le service urbanisme et habitat de la mairie de Toulouse propose des guides des typologies de bâtiments en fonction des périodes constructives. C'est un document destiné au grand public qui a pour objectif d'inciter à la réfection des façades et des devantures. [102], [103] Nous en présentons quelques illustrations sur la figure suivante.



**CONSTRUCTIONS MÉDIÉVALES ET RENAISSANCE**

Maison simple      Maison tour

jusqu'au 16<sup>e</sup> siècle

**CONSTRUCTIONS COURANTES ET DE STYLE**

**Style classique**      **Ordonnement**

Petit immeuble      Hôtel particulier

17<sup>e</sup> -18<sup>e</sup> siècles

**CONSTRUCTIONS COURANTES**

**«Toulousaine»**

Maison de faubourg      Petit immeuble de ville      Immeuble de ville

19<sup>e</sup> siècle



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 890598.

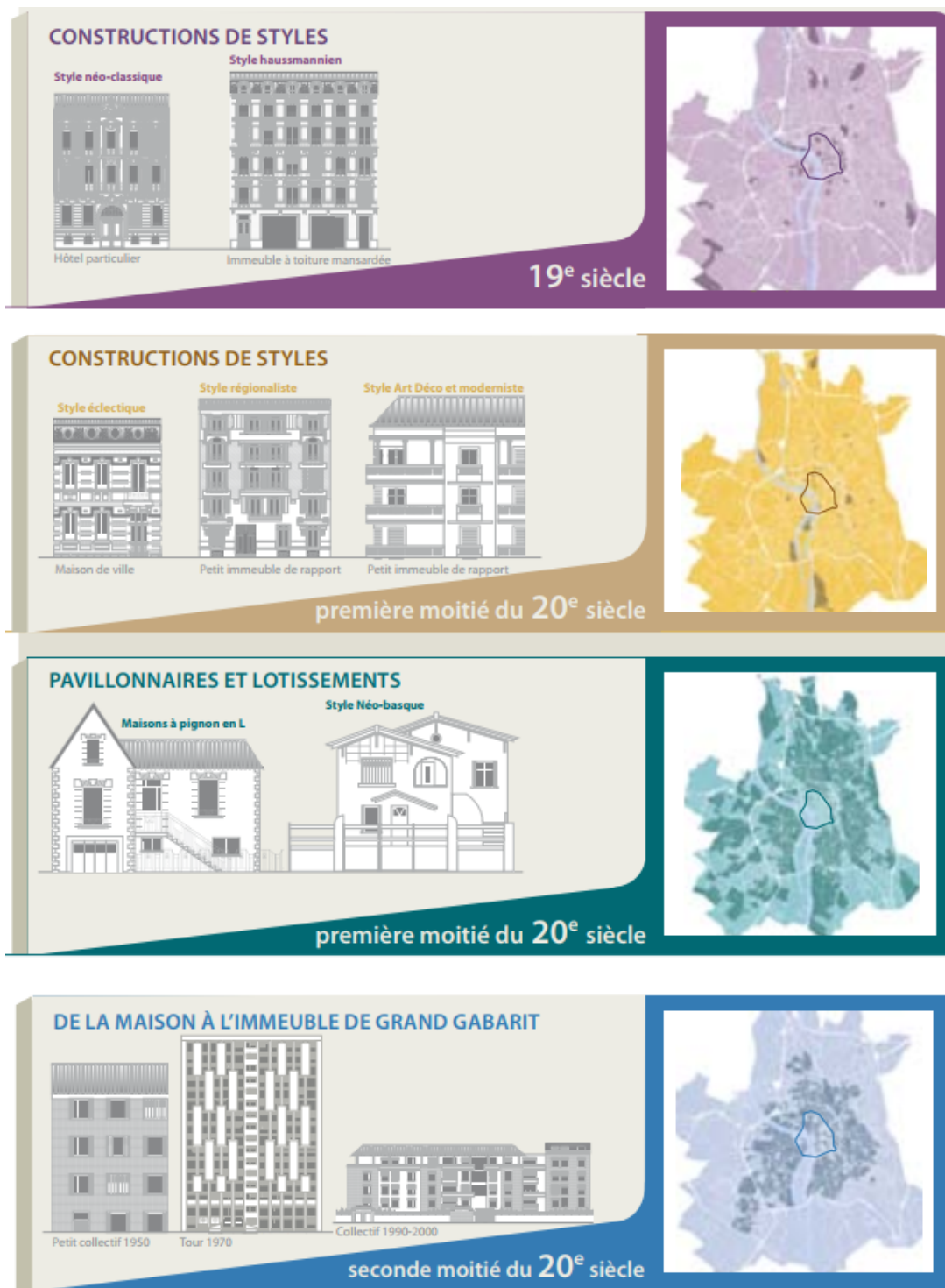


Figure 4 : Typologies de bâtiments recensés par la mairie de Toulouse sur son territoire

### 4.3.2 APPROCHE MODULAIRE : PROJET MAPUCE

#### Répartition typologique des morphologies de bâtiments



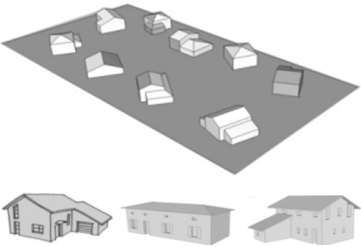
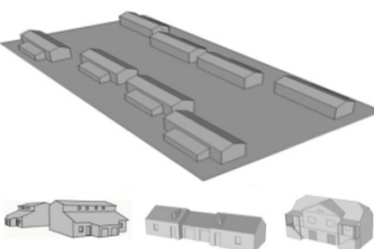
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 890598.

Pour son étude, Mailhac reprend les typologies GENIUS du projet MApUCE proposées par Bonhomme en 2013 [104] puis retravaillées en 2015 [99]. Le parc de bâtiments est réparti en 10 types de morphologies, elles-mêmes réparties dans 4 classes :

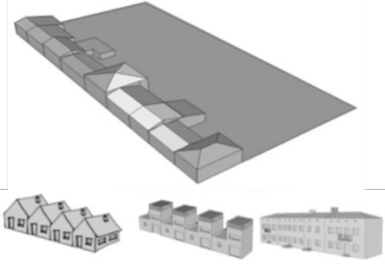
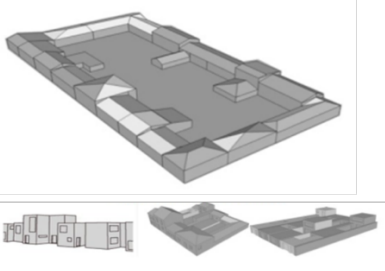
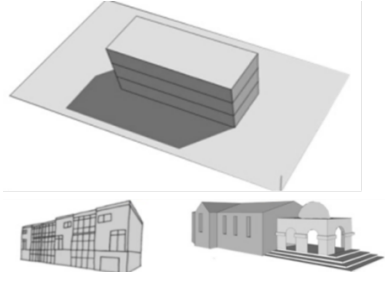
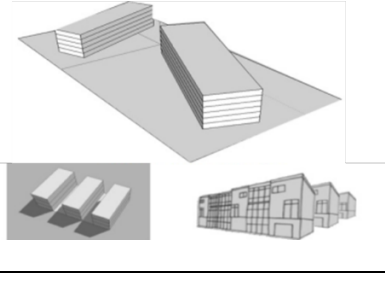
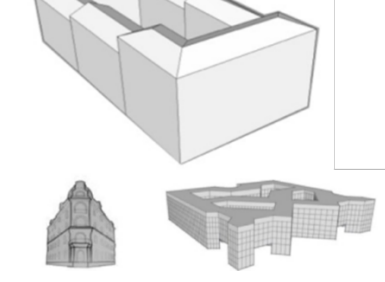
- La classe Pavillon : elle comprend les bâtiments d'habitation de faible hauteur
- La classe Immeuble : elle s'intéresse aux bâtiments de hauteur moyenne
- La classe Immeuble de Grande Hauteur (IGH) : ce sont des bâtiments qui ont au minimum 12 étages.
- La classe des bâtiments d'activités : elle correspond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

Le Tableau 1 détaille les différentes typologies retenues [96].

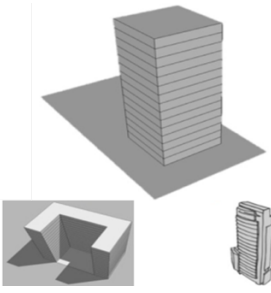
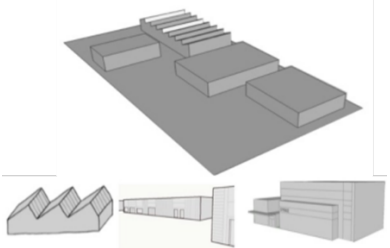
Tableau 1 : Description et représentation des classes typologiques en fonction des morphologies urbaines

| 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 a des environnements de lotissements ou des maisons jumelées                                                     |  |



|                            |                                      |                                                                                                                                                       |                                                                                      |
|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | Pavillon continu sur ilot 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 ilot fermé      | Correspond à l'habitat intermédiaire typique. Maison mitoyenne en bandes avec patio ou certains centre ancien                                         |    |
| Immeuble de petite hauteur | Immeuble discontinu                  | Corresponds à des bâtiments de villes avec 4 façades. Ils sont souvent implantés aux centres des ilots                                                |   |
|                            | Immeubles continus sur ilots ouverts | Désigne un ensemble de bâtiments en partie aligné sur la rue dans les centre-villes ou sur les aires urbaines                                         |  |
|                            | Immeubles continus sur ilots fermés  | Corresponds aux bâtiments de villes implantés un ilot fermé. Peut correspondre à un centre historique ou a des bâtiments post révolution industrielle |  |



|                            |                            |                                                                                                                         |                                                                                    |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Immeuble de grande hauteur | Immeuble de grande hauteur | Représente les tours ou les barres de grand immeuble. Doit disposer d'au moins 12 niveaux pour être considéré comme tel |  |
| Bâtiment Industriels       | Bâtiment d'activité        | Cette typologie représente des bâtiments industriels, agricole, des établissements de sport, etc....                    |  |
|                            | Bâtiments informels        | Ce sont des constructions éphémères non représentés sur les plans de cadastres.                                         |                                                                                    |

Les Figure 5 et Figure 6 présentent la répartition typologique par quartier, pour la ville de Toulouse.

A l'échelle macroscopique, sur la Figure 5, on constate la prédominance des immeubles continus sur la zone du centre historique ainsi qu'une forte proportion de pavillons en périphérie du centre urbain. Cette représentation typologique complète le relevé du service urbanisme et l'étude de répartition démographique effectué par Toulouse Métropole dans le rapport de préfiguration [90], [103].

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. Elle est représentative des constructions classiques courantes des villes. 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 Grarentour, la quantité maisons individuelles est de 1.238 maisons individuelles pour 76 logements collectifs (soit 94% de maisons individuelles) [90].

Après avoir étudié la répartition des différentes typologies de bâtiments du parc toulousain, la suite du document a pour objet l'étude de ses autres caractéristiques croisées.

La Figure 6 représente le croisement des bases de données DPE et MApUCE afin d'afficher la répartition des DPE par types de bâtiments sur le territoire toulousain. Ce premier test permet la validation de la faisabilité du recoupement de données. Il démontre également les limites de la méthode : La part des logements restants (issus de la modélisation) dont la typologie correspond aux maisons individuelles est inférieure aux 31% annoncés dans le relevé de préfiguration rédigé par Toulouse Métropole [90] voir page 17).

Ceci peut notamment s'expliquer par les critères de réalisation des DPE. Ils ne sont en effet effectués que sur les logements en vente (rachat ou construction neuve). Ils ne correspondent donc pas exactement au parc de bâtiment existant car les logements neufs ont une part plus importante.





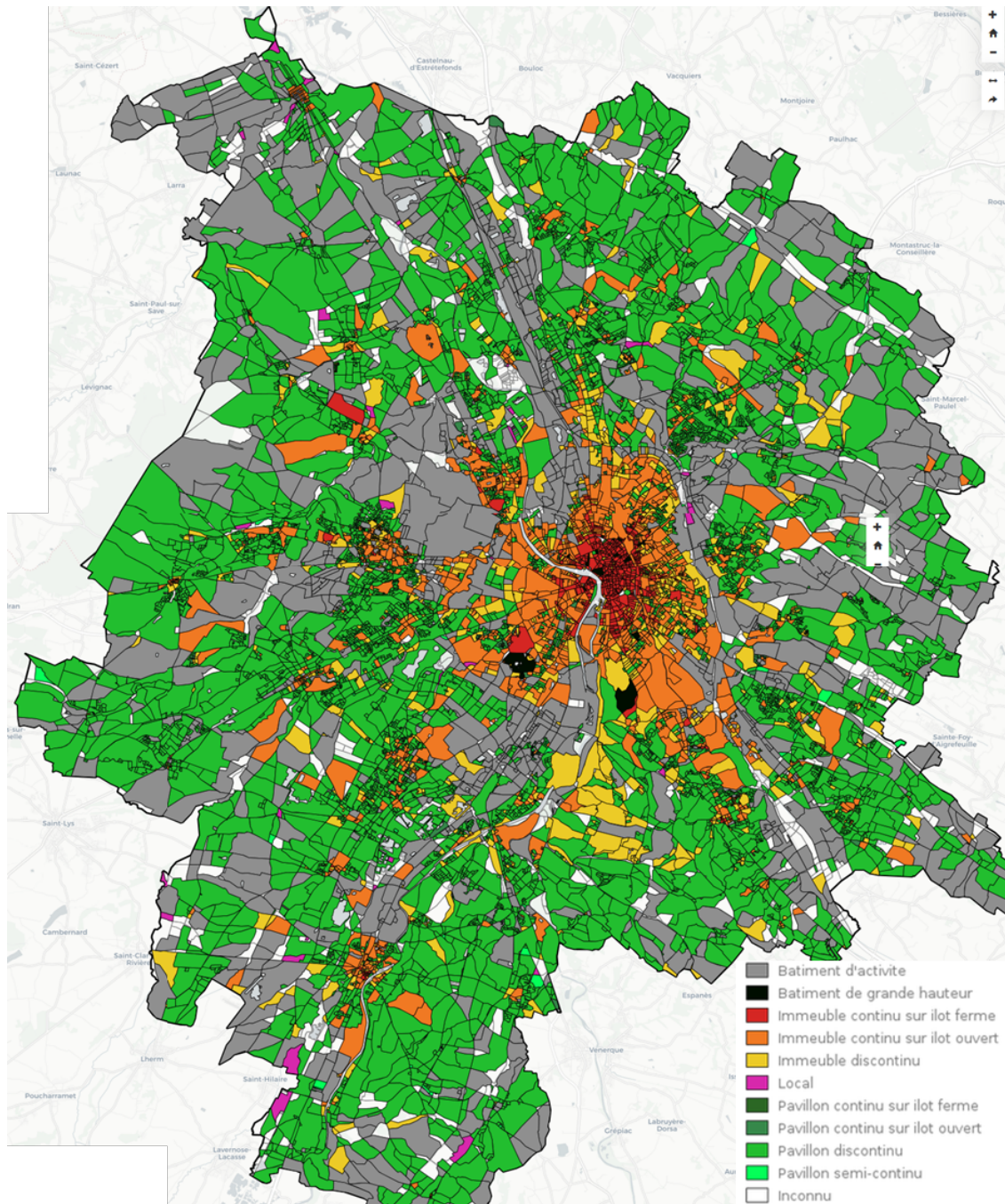


Figure 5 : Répartition typologique des différentes morphologies de bâtiment à Toulouse





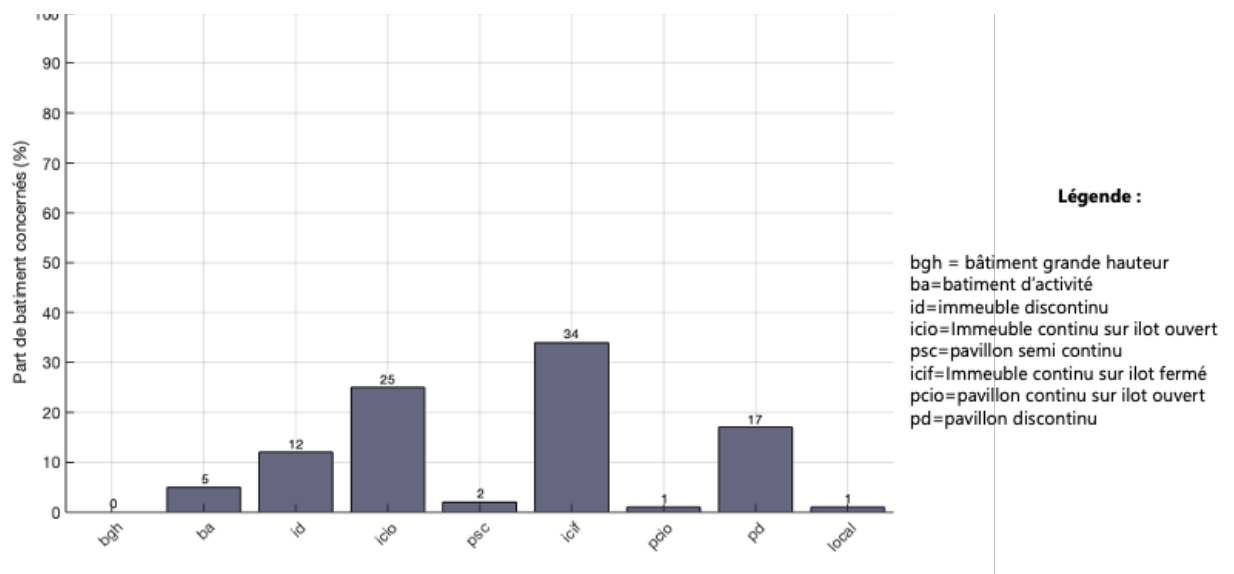


Figure 6 : Répartition des logements où a été effectué un DPE par types de bâtiments sur le territoire toulousain

### Classement des techniques de construction par dates

D'après les travaux de Mailhac [96] et Tornay *et al* [99], 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<sup>er</sup> Crash pétrolier, apparition de la 1<sup>ère</sup> réglementation thermique : Politique d'économie d'énergie.
- 1982/1989 : 2<sup>ème</sup> Crash pétrolier, apparition de la 2<sup>ème</sup> réglementation thermique : Politique d'économie d'énergie
- 1989/2000 : Application de la 3<sup>ème</sup> réglementation thermique : politique de maîtrise de l'énergie.
- 2001/2012 : Application de la 4<sup>ème</sup> réglementation thermique : réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- A partir de 2013 : Application de la 5<sup>ème</sup> Règlementation thermique. Mise en place d'objectifs de consommation énergétique et de production de GES à l'échelle nationale : horizon 2040.

Le croisement des données de constructions issues de la base de données des DPE et des typologies bâtiments issues du projet MAPUCE permettent d'aboutir à la Figure 7.



L'analyse du graphique permet de constater que la répartition des types de logements est assez homogène quelle que soit la période de construction envisagée.

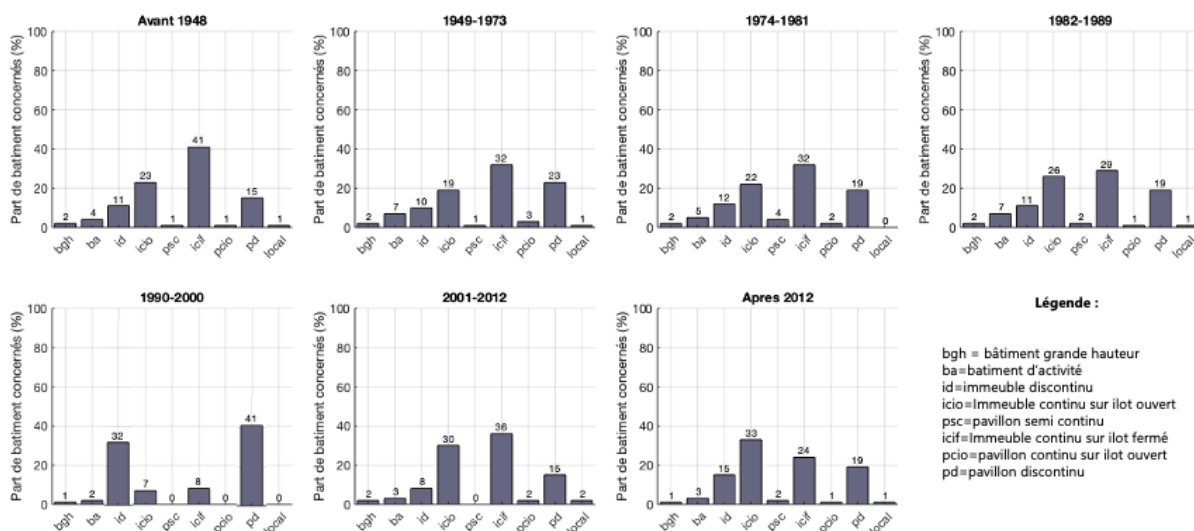


Figure 7 : Répartition des typologies en fonction des années de construction

### Méthodes de construction

Les deux parties précédentes détaillent les différences d'un parc de logement en fonction de la typologie ou de la période de construction. L'objectif ici est de mettre en perspective ces deux indicateurs dans un nouvel indicateur d'étude : les méthodes de construction. En effet l'impact environnemental des bâtiments dépend de la rigueur climatique, de l'utilisation des bâtiments et de leurs composantes physiques. Recourir à une rénovation permet de modifier ce dernier paramètre. Caractériser les bâtiments en fonction de leurs techniques de construction et leurs consommations doit donc permettre de mettre en avant le potentiel de rénovation d'un territoire et de choisir des stratégies de mise en œuvre pour une rénovation adaptée.

Plusieurs études proposent des classements de caractéristiques 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 [98], Genius[99] ou encore du programme Pacte[95].

La Figure 8 détaille la méthode utilisée par le moteur de calcul Genius pour déminer les compositions des paramètres (menuiseries, des façades, équipements, etc.) en fonction des



paramètres définis précédemment. Le détails de ces tableaux sont disponibles dans le manuscrit de These de Adelaïde Mailhac [96]

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

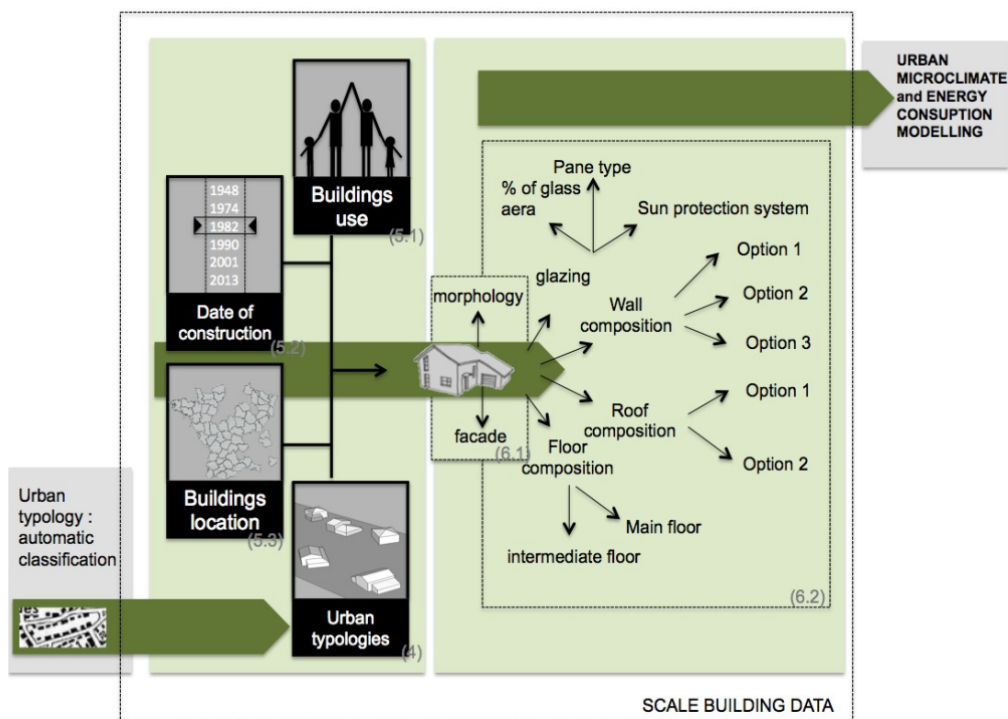


Figure 8 : Schématisation de la logique de sélection de la matérialité d'un bâtiment selon l'algorithme GENIUS

En couplant la base de données des DPE avec celle du projet MApUCE, il devient possible de définir les caractéristiques énergétiques et environnementales des bâtiments en fonction de l'âge, de la typographie et donc de leurs techniques de constructions. C'est l'objet des deux figures suivantes.



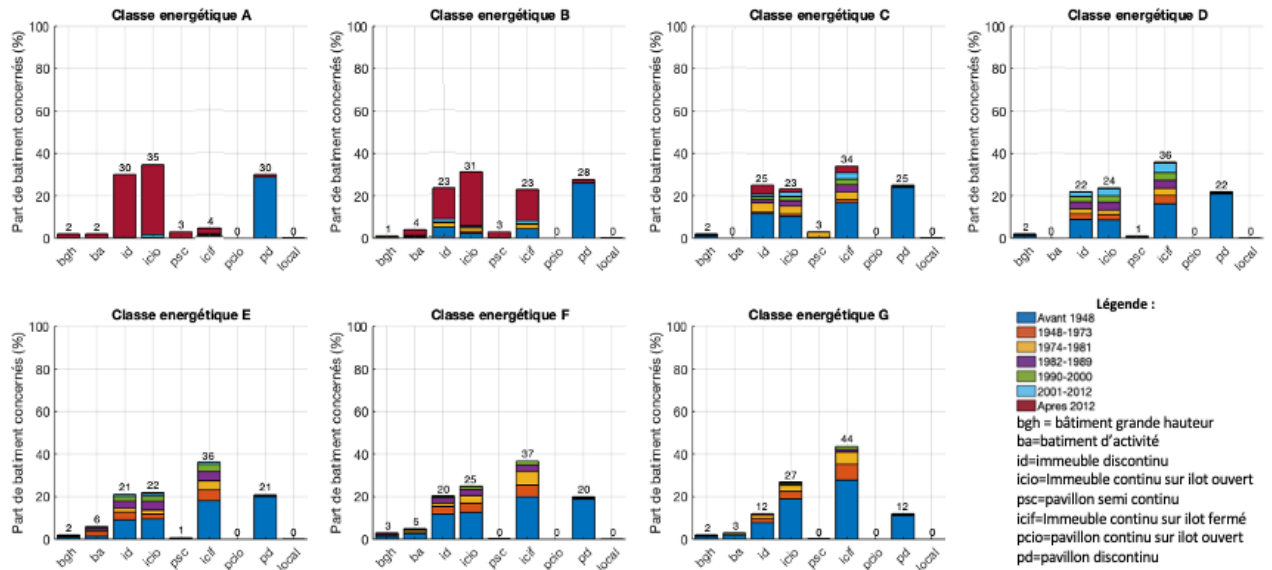


Figure 9 : Répartition des caractéristiques énergétiques DPE des bâtiments toulousains en fonction de l'âge et la typologie

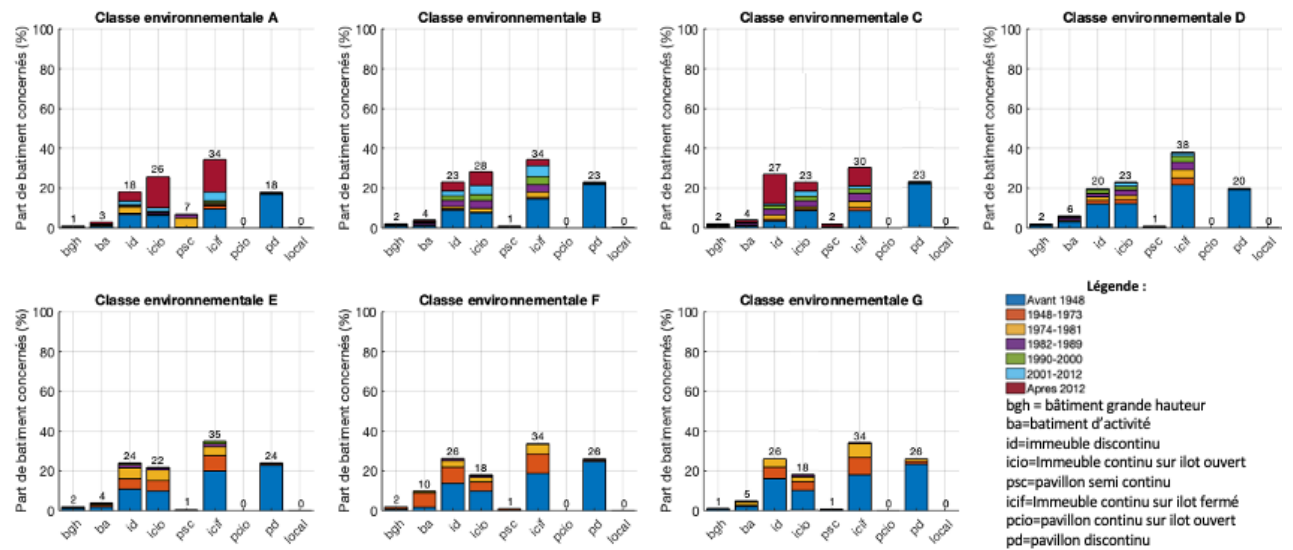


Figure 10 : Répartition des caractéristiques environnementales DPE des bâtiments toulousains en fonction de l'âge et la typologie

Les Figure 9 et Figure 10 représentent les proportions de logements par classes énergétique et environnementale en fonction des typologies et des classes d'âges. De manière générales, les répartitions typologiques sont représentatives des proportions totales présentes sur le bâtiment (Figure 6). 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 9 et Figure 10 soient conditionnés par les 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 [90]. La majorité du parc de bâtiments est ancienne et consommatrice d'énergie. Stratégiquement, les typologies de bâtiments à cibler en priorité sont donc les immeubles continus sur du centre historiques, les immeubles discontinus de la première couronne et les pavillons discontinus de la périphérie.

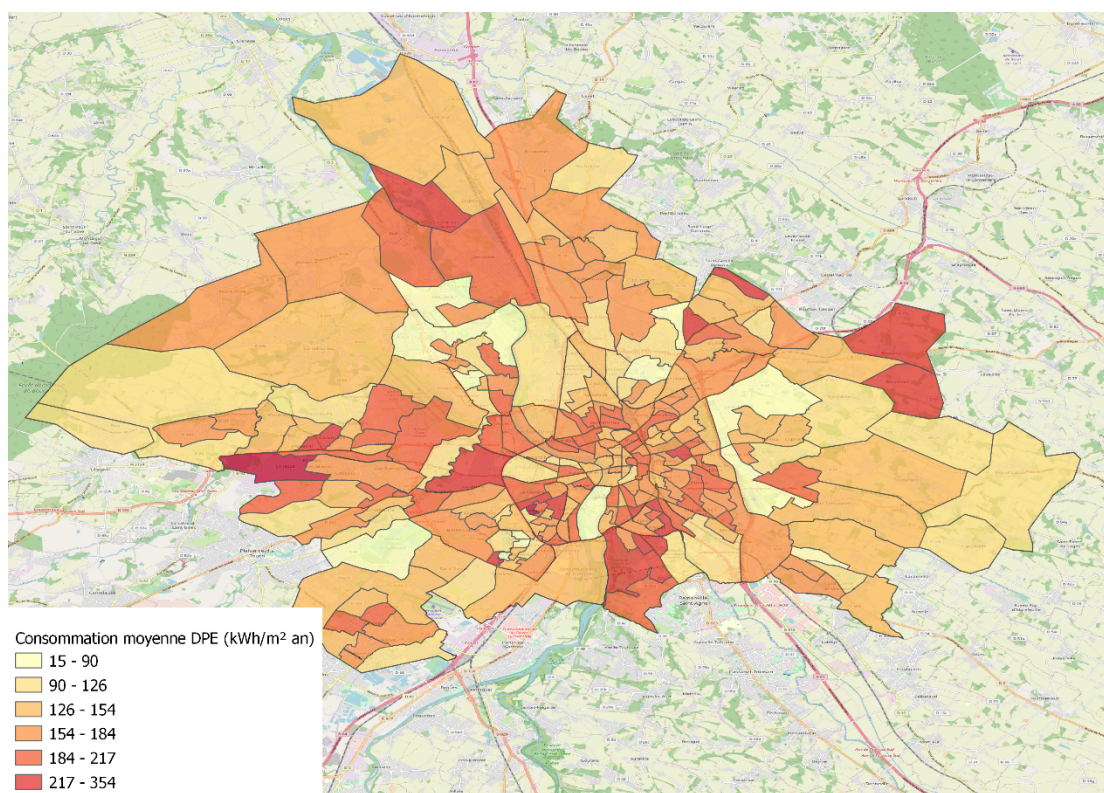


Figure 11 : Répartition des consommations énergétiques moyennes par maille IRIS sur le territoire de Toulouse





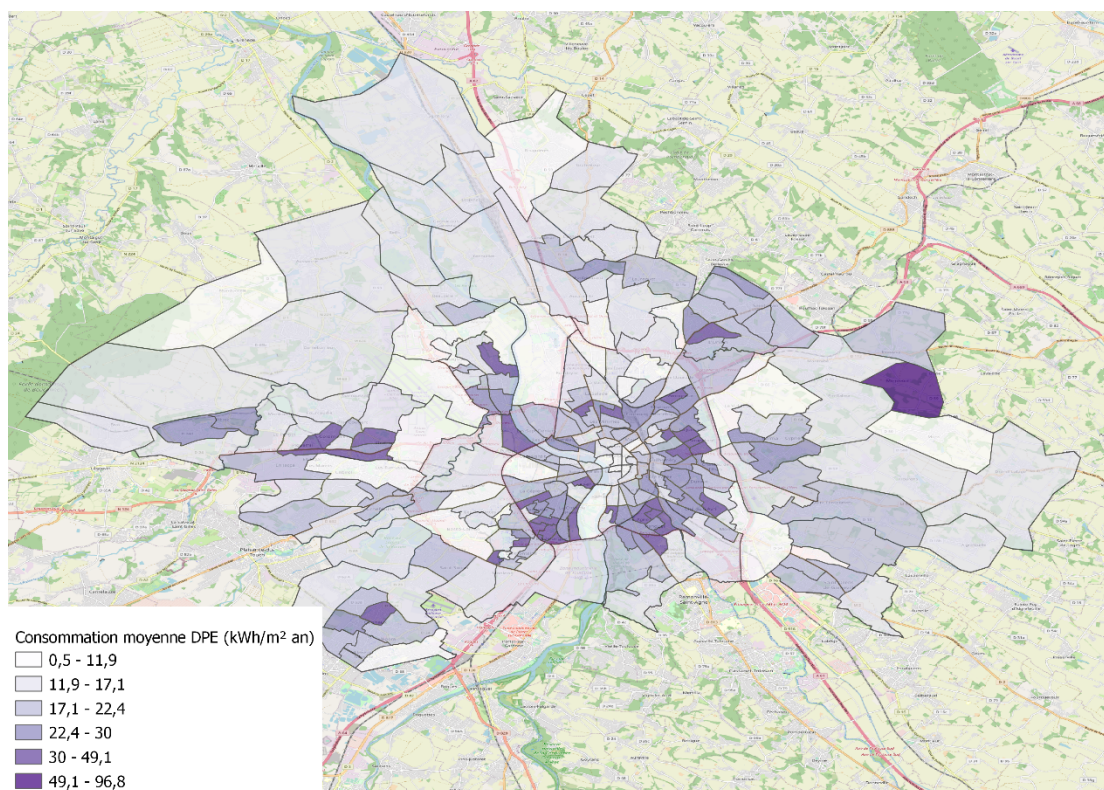


Figure 12 : Répartition des émissions GES moyennes par maille IRIS sur le territoire de Toulouse

Les Figure 11 et Figure 12 représentent les zones où la consommation énergétique et les émissions de GES sont les plus importantes sur le territoire de Toulouse Métropole. Au vu de ces résultats issus de la base de données des DPE, les zones clés correspondent aux bâtiments situés au centre et en périphérie du centre-ville. En recroisant ces résultats avec Figure 5, les principales typologies concernées sont les bâtiments historiques de type immeuble continu, les immeubles continus, discontinus et les résidences pavillonnaires.

Il existe donc un fort potentiel sur ces bâtiments. Les solutions de rénovation mises en place sur le territoire doivent donc permettre de répondre à ces enjeux spécifiques.

### Focus sur les enjeux financiers

L'étude de préfiguration sur le parc de bâtiments de Toulouse métropole introduit également une notion d'enjeux financiers liée à la rénovation [90] : de manière générale, pour des objectifs de consommations égaux après travaux, moins le bâtiment de base est efficace, plus le coût des travaux est élevé. En effet cela représente souvent un plus grand nombre de mesures de modifications. L'observatoire de la rénovation énergétique détaille ces coûts dans son rapport [105]



- Scénario -25% : moyenne de 88€/m<sup>2</sup>, avec des coûts allant de 10€ à 254€/m<sup>2</sup>
- Scénario -35% : moyenne de 117€/m<sup>2</sup>, avec des coûts allant de 22€ à 261€/m<sup>2</sup>
- Scénario -45% : moyenne de 127€/m<sup>2</sup>, avec des coûts allant de 25€ à 236€/m<sup>2</sup>

On constate que le coût moyen d'une opération est multiplié par 1,5 lorsque l'objectif du scénario passe de -25% à -45%. En revanche, dans tous les scénarios, l'étalement des coûts varie de 1 à 10, selon l'état initial des logements.

Il est donc important de préciser que, même si certaines typologies ou quartiers semblent avoir un très bon potentiel géo-local en rénovation, l'accompagnement et la réalisation des projets de travaux doit être abordé de manière globale pour être le plus pertinent possible. Ceci afin que les propriétaires de logements puissent bénéficier de tous les leviers pour optimiser les coûts d'investissement et éviter les freins liés à des surcoûts importants. C'est un sujet évoqué dans le document du projet I-HEROS sur les techniques d'accompagnements en rénovation.

En conclusion nous avons vu dans les premières parties que le choix d'une solution de rénovation était un procédé complexe et global qui devait être abordé selon une approche multicritère. Chaque solution ayant un impact sur les différentes caractéristiques de fonctionnement du bâtiment, il est nécessaire de connaître et comprendre le panel de techniques, méthodes et matériaux existants. Le choix de la solution la plus adaptée est alors celle qui correspond le plus aux besoins du logement et de ses occupants. C'est pour cette raison que ce dernier chapitre s'intéressait de manière théorique aux caractéristiques du parc de bâtiments de Toulouse Métropole. Une fois le profil énergétique et environnemental établi, pour bâtiment, il est possible de simuler et étudier différents bouquets de travaux pour trouver le meilleur compromis.



## 5 RETOUR D'EXPERIENCE DE PROJETS DE RENOVATION : ETUDE DE CAS

---

Après avoir étudié et comparé les différentes solutions techniques et matériaux de rénovation, avoir défini le profil énergétique et environnemental du parc immobilier de Toulouse Métropole, l'objectif est ici de mettre en perspective ces deux points. Pour cela, les deux sous-parties d'intéressent à des retours d'expériences de projets existants. Ceci permet notamment d'illustrer le choix d'une stratégie de rénovation adapté pour un bâtiment donné, en tenant compte de facteurs multicritères spécifiques.

Le retour d'expérience en question consiste en des projets s'étant déroulés dans la ville de Cahors dans le Lot. En s'intéressant à l'étude de la Direction Générale de l'Energie et du Climat, aujourd'hui et sur les différents scénarios à venir, les parcs de bâtiments de Toulouse et de Cahors sont soumis à la même astreinte climatique [106]. Du point de vue architectural, l'Ecole d'Architecture de Toulouse a produit un guide comparant les principales caractéristiques du midi toulousain [107]. Ce sont pour ces deux raisons qu'il est possible de s'inspirer des projets de rénovations passés des logements d'autres villes d'Occitanie. Une attention particulière devra tout de même être porté au caractère hyper-urbain de Toulouse pour la répliation.

### 5.1 RESIDENCE PAVILLONAIRE 1945 – 1975

La première étude de cas, issue de l'Union régionale des Conseils d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement d'Occitanie s'intéresse à une maison individuelle construite dans la période d'après-guerre [100]. Une photo du bâtiment avant rénovation est disponible à la Figure 13. En comparant la typologie avec celles proposés par Mailhac au Tableau 1, il s'agit ici d'un pavillon discontinu. Le Tableau 2 détaille les caractéristiques du bâtiment avant rénovation.







Figure 13 : Étude de cas : rénovation d'une maison pavillonnaire à Cahors

Tableau 2 : Étude de cas : descriptif du bâtî MI à Cahors avant rénovation

| Menuiseries                                           | Toiture                          | Façades                                                   | Plancher bas                                                                       |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Fenêtres et portes<br>fenêtres simple<br>vitrage bois | Charpente<br>traditionnelle bois | RDC : Tout venant<br>hourdé au ciment                     | Plancher bas :<br>Dalle béton,<br>chape, carrelage                                 |
| Volets extérieurs<br>en métal                         | Couverture tuiles                | R+1 : Brique<br>porteuse, lame<br>d'air, brique<br>plâtré | Plancher<br>intermédiaire :<br>solives bois, dalle<br>béton armé,<br>plancher bois |
|                                                       |                                  | Enduit lissé ou<br>tyrolien extérieur                     | Plafond :<br>plafonnettes en<br>terre cuites,<br>solives de bois,<br>enduit        |

En plus des techniques de construction, du retour d'expérience des occupants et du profil énergétique du bâtiment présenté en Figure 14 il est possible de détailler et d'analyser le comportement thermique du bâtiment.

**Hiver :** La pose d'un isolant du type laine de verre dans les combles perdus a permis de limiter les déperditions thermiques dans les années 80. L'absence de VMC et les défauts d'étanchéités des menuiseries entraînent une mauvaise gestion de la ventilation du logement. La production de chaud est assurée par un couplage chaudière au gaz de ville, radiateurs à eau chaude en fonte installés dans les années 2000. Un ballon électrique assure le besoin d'ECS.



**Été** : L'exposition des menuiseries, les protections solaires et la ventilation nocturne permettent une bonne gestion du confort thermique estival. Les volets métalliques peuvent engendrer des surchauffes entre les protections et le vitrage, limitant alors leur efficacité.

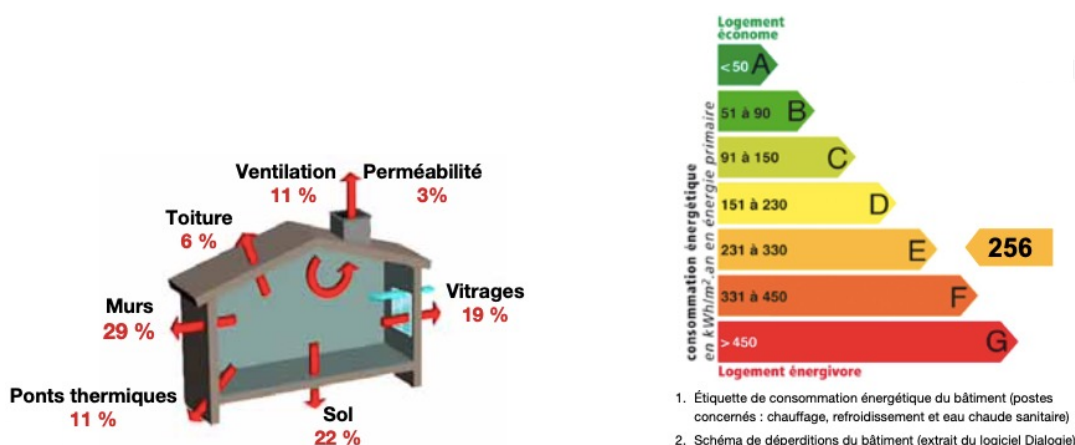


Figure 14 : Profil énergétique maison pavillonnaire Cahors avant rénovation

La consommation énergétique initiale du logement est estimée à 256 kWh/m<sup>2</sup> an et la majorité des déperditions thermiques est imputables à l'enveloppe et aux menuiseries. C'est pour cette raison que la première étape d'amélioration concerne le bâti et la régulation. Pour une consommation énergétique estimée à 180 kWh/m<sup>2</sup> an, les solutions proposées sont :

- Le remplacement de l'isolant dans les combles perdus par une laine de verre plus performante,  $R=7$  (m<sup>2</sup>.K)/W
- L'isolation des planchers  $R=3$  (m<sup>2</sup>K)/W
- Isolation par l'intérieur des murs SDB et WC ,  $R=3,7$  (m<sup>2</sup>K)/W
- Installation de robinets thermostatiques

Bien que la part de déperdition des murs soit importante. La forte épaisseur de la lame d'air suscite la prudence pour la pose d'un isolant. Il n'est en effet pas possible de connaître l'état sanitaire ou de poser un pare vapeur dans cet espace.

Les couts économiques pour l'isolation sont estimés entre 6 000 à 7 000 € HT et 500 à 1000 € HT pour l'installation d'un système de régulation.



La deuxième étape de maîtrise de consommation énergétiques concerne les systèmes de gestion du chauffage et de la ventilation

- Remplacement des menuiseries simple vitrage par des menuiseries en double vitrage.  $U_w = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ .
- Mise en place d'une VMC hygro-réglable.
- Pose d'un poêle à bois pour la cuisine et le salon.

Pose d'un chauffe-eau thermodynamique de 150 / 200 Litres.

Une attention particulière doit être portée au système de ventilation. Le remplacement de menuiserie simple vitrage doit impérativement être couplé avec le dimensionnement d'un système de ventilation adapté.

Les travaux sur les menuiseries et la VMC sont estimés entre 12 000 et 15 000 € HT, l'installation du poêle à granulés 3 000 € HT et le remplacement du système de production d'ECS à 3 000 € HT. Les performances énergétiques attendues sont estimées à 118kWh/m<sup>2</sup> an.

En conclusion cette partie met en avant les possibilités d'amélioration pour un bâtiment de type résidence pavillonnaire datant d'avant 1975. En fonction du budget et des objectifs de rénovation il est possible d'aborder le projet par étapes. La solution présentée ici est une solution répondant aux besoins de ce bâtiment. Il est possible, qu'en fonction de la morphologie, des occupants, de l'implantation...ect, que d'autres solutions puissent être envisagées sur les autres bâtiments de même typologie

## **5.2 COPROPRIETE BELLE PAULE – IMEUBLE DISCONTINU 1994**

## **5.3 CENTRE HISTORIQUE CAHORS – BATI ANCIEN AVANT 1945**



## 6 CONCLUSION

---

Ce document a permis de dresser un panorama des différentes techniques de rénovations. Détailler et analyser un catalogue de solutions est une aide indispensable pour choisir la solution la plus adaptée aux besoins d'un bâtiment. 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 par exemple

En effet, les caractéristiques architecturales d'un parc peuvent être déterminées au travers de son histoire (mode de construction, modifications actuelles d'utilisation) et de son environnement urbain (morphologie de la parcelle, accès à l'énergie). Le mode de construction d'un bâtiment, son utilisation et son environnement proche affectent de manière significative la viabilité de solutions présélectionnées.

Ce rapport a donc permis de s'intéresser aux aspects techniques des rénovations, tout en étudiant les caractéristiques des bâtiments représentant la majorité du parc immobilier toulousain existant. L'objectif était de dresser un état de l'art des différentes pratiques et matériaux utilisés pour les comparer selon une approche multicritère (énergétique, environnementale, hydrique, confort thermique, qualité de l'air, etc.). En parallèle, une étude des caractéristiques propres au parc de bâtiments toulousain a permis de comprendre les besoins de rénovations adaptés au territoire. C'est en couplant ces deux approches qu'il sera possible de proposer des grandes stratégies de rénovation adaptée au territoire de Toulouse.

Dans ce cadre, la première partie du document, plus théorique, s'intéresse aux connaissances fondamentales des critères de comparaisons qui serviront ensuite à comparer les matériaux et les techniques. A savoir, les transferts thermiques et hydriques, la qualité de l'air, le confort thermique et la qualité environnementale

Les deuxième et troisième partie dressent un benchmark des différentes solutions techniques en rénovation. La finalité est de mettre en avant la corrélation et le couplage des différents domaines. Le fonctionnement d'un bâtiment est un système complexe où chaque choix aura des incidences sur tous les plans. C'est pour cette raison qu'il est important d'aborder une approche multicritère.

Après avoir défini une méthode de comparaison et un classement des différents systèmes, méthodes et matériaux, la suite du document a précisé le cas toulousain et les besoins associés au parc de bâtiments du territoire. Au vu des résultats, la répartition typologique et démographique est très variable en fonction de la localisation des bâtiments en regard du centre-ville. On note néanmoins une part importante de maisons individuelle pavillonnaires et d'immeuble continus ou discontinus.



Enfin, la dernière partie de l'étude, qui illustre le document par une étude de cas d'une rénovation sur le territoire de Toulouse métropole permet d'introduire la notion de solutions adaptés au territoire de Toulouse. En effet, la réussite d'un parcours d'accompagnement dépend de plusieurs facteurs, par exemples sociaux ou financiers. Mais elle dépend également de la qualité des solutions techniques mises en place. C'est pour cette raison que la réflexion doit continuer autour des solutions à mettre en place sur ce territoire particulier de par son climat, son architecture spécifique, sa démographie et son patrimoine culturel.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] European Commission, « Energy topics », *Energy efficient buildings*. [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/2030-energy-%20strategy\\_en?redir=1](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/2030-energy-%20strategy_en?redir=1) (consulté le mars 25, 2020).
- [2] Marina Economidou, « EUROPE'S BUILDINGS UNDER THE MICROSCOPE : country-by-country review of the energy performance of building », *BIPE*, 2011, [En ligne]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/271200847\\_Europe's\\_buildings\\_under\\_the\\_microscope\\_A\\_country-by-country\\_review\\_of\\_the\\_energy\\_performance\\_of\\_buildings](https://www.researchgate.net/publication/271200847_Europe's_buildings_under_the_microscope_A_country-by-country_review_of_the_energy_performance_of_buildings).
- [3] Ministère de la transition écologique, « Objectifs et outils nationaux des politiques du climat, de l'air et de l'énergie ». Les politiques du climat, de l'air et de l'énergie se rejoignent dans une logique d'intégration croissante des objectifs, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-du-climat-lair-et-lenergie>.
- [4] MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER, EN CHARGE DES TECHNOLOGIES VERTES ET DES NÉGOCIATIONS SUR LE CLIMAT, *Arrêté du 29 septembre 2009 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label " haute performance énergétique rénovation "*. JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, p. 2009.
- [5] 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\\_Crosscutting\\_low\\_FINAL.pdf](https://urbact.eu/sites/default/files/import/general_library/19765_Urbact_Crosscutting_low_FINAL.pdf).
- [6] 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.



- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] CSTB, De Jean Patrick, Ebok, Marin Jérôme, Pouget-Consultants, Transsolar, *Le guide ABC : Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974*. 2011.
- [10] Simon Romain THÉBAULT, *Contribution à l'évaluation in situ des performances d'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments*. 2017.
- [11] Rémi Bouchié, Benoît Busson, Franck Leguillon, Kamel Zibouche, *RT : valeurs et coefficients pour l'application des règles Th-Bat*. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 2018.
- [12] CSTB, « Règles Th-bat – Ponts thermiques », 2017, [En ligne]. Disponible sur: [http://www.rt-batiment.fr/IMG/pdf/5-fascicule\\_ponts\\_thermiques.pdf](http://www.rt-batiment.fr/IMG/pdf/5-fascicule_ponts_thermiques.pdf).
- [13] LAYAL CHAHWANE, *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments*. Université de Grenoble, 2011.
- [14] Fabio Munaretto, *Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments*. 2014.
- [15] 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.
- [16] 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.

[17] D. Samri, *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique.* 2008.

[18] Technical University of Denmark, *Moisture Buffering of Building Materials.* 2005.

[19] Jean-Pierre Ollivier, Jean-Michel Torrenti, et Myriam Carcassès, *Physical Properties of Concrete and Concrete Constituents.* 2012.

[20] Bernard Abraham, Jean-Luc Salagnac, José Fontan, Daniel Quenard, Stéphane Gilliot, Claude Pompéo, « Transferts d'humidité à travers les parois, Évaluer les risques de condensation », 2009.

[21] *NF EN ISO 7933. Ergonomie des Ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondée sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible.* 2005.

[22] ASHRAE, *ASHRAE HANDBOOK 2017: fundamentals i-p and si editions.* S.l.: ASHRAE, 2017.

[23] K. C. Parsons, *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance,* Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.

[24] Fredery Lavoye et Françoise Thellier, « Le confort thermique dans les bâtiments », *Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie,* 2008.

[25] *ISO 7730 : 2005, International Standard, Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.* 2005.

[26] *Thermal environmental conditions for human occupancy: ansi/ashrae standard 55-2017 ...*





2017.

[27] *Thermal environmental conditions for human occupancy: ansi/ashrae standard 55-2017 ...* 2017.

[28] « International Standards », in *Human Thermal Environments*, CRC Press, 2014, p. 445-502.

[29] A. Alahmer, A. Mayyas, A. A. Mayyas, M. A. Omar, et D. Shan, « Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review », *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, n° 6-7, p. 995-1002, mai 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.12.004.

[30] 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.

[31] Givoni B, *Man, Climate & Architecture (2nd) Second Edition Paperback*, vol. Ltd. London, 1976.

[32] B. Givoni, « Comfort, climate analysis and building design guidelines », *Energy and Buildings*, vol. 18, n° 1, p. 11-23, janv. 1992, doi: 10.1016/0378-7788(92)90047-K.

[33] Gonzalez, R Arens, Edward A et Berglund, L, « Thermal comfort under an extended range of environmental conditions », *ASHRAE Transactions, 92 Part 1B*.

[34] 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.

[35] F. da Casa Martín, F. Celis D'Amico, et E. Echeverría Valiente, « Metodología para elaborar una cartografía regional y aplicar estrategias bioclimáticas según la Carta de Givoni », *HS*, vol. 9, n° 2, p. 52-63, déc. 2019, doi: 10.22320/07190700.2019.09.02.05.

[36] Peter Concannon, *Technical Note AIVC 57-Residential Ventilation. .*



- [37] N. A. Rosário Filho *et al.*, « Air pollution and indoor settings », *World Allergy Organization Journal*, vol. 14, n° 1, p. 100499, janv. 2021, doi: 10.1016/j.waojou.2020.100499.
- [38] D. E. Schraufnagel *et al.*, « Air Pollution and Noncommunicable Diseases », *Chest*, vol. 155, n° 2, p. 409-416, févr. 2019, doi: 10.1016/j.chest.2018.10.042.
- [39] Marc Abadie, Patrice Blondeau, Jérôme Nicolle, *Mémento Santé Bâtiment - Qualité de l'air intérieur*. 2014.
- [40] Roger Cadiergues, *La qualité de l'air intérieur*. .
- [41] Noëlie Daviau-Pellegrin, « Les labels de la Qualité de l'air intérieur : Étude des méthodes de prise en compte de la qualité de l'air intérieur des bâtiments tertiaires neufs dans les labels ». Rapport d'étude du Cerema, 2020, Consulté le: mars 16, 2021. [En ligne]. Disponible sur: [http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport\\_labels\\_qai-compresse.pdf](http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_labels_qai-compresse.pdf).
- [42] ANSI/ASHRAE *Standard 62.1-2019 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. .
- [43] 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.
- [44] M. Russell, M. Sherman, et A. Rudd, « Review of Residential Ventilation Technologies », *HVAC&R Res.*, vol. 13, n° 2, p. 325-348, mars 2007, doi: 10.1080/10789669.2007.10390957.
- [45] Bruno Peuportier, « L'analyse de cycle de vie dans la construction ». Rencontres AUGC-IBPSA , Chambéry, France., juin 2012, Consulté le: janv. 12, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01463190>.
- [46] Peuportier, Bruno; Kellenberger, Daniel; Anink, David; Mötzl, Hildegund; Anderson, Jane; Vares, Sirje;



Chevalier, Jacques and König, Holger, « Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools ». Regional Central and Eastern European Conference on Sustainable Building, 2004.

[47] Management  
environnemental, « ISO 14040 ». Analyse du cycle de vie, Principes et cadre, 2006.

[48] Management  
environnemental, « ISO 14044 ». Analyse du cycle de vie, Exigences et lignes directrices, 2006.

[49] *Analyse de Cycle  
de Vie pour l'Efficacité Energétique des bâtiments*. 2012.

[50] L. Wastiels, A.  
Janssen, et R. Decuypere, *Expanding Boundaries - Demolition versus Deep Renovation of Residential Buildings: Case Study with Environmental and Financial Evaluation of Different Construction Scenarios*. CH: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2016.

[51] Raphaël Claustre -  
île-de-France Energies, « La rénovation énergétique dans le résidentiel : industrialiser, professionnaliser ». Conférence groupe « Mines Aménagement & Construction », févr. 11, 2021.

[52] Rémi Bouché,  
Benoit Busson, Benoit Cormier et Aurélie Delaire, Salem Farkh, Franck Leguillon, *Performances énergétiques : les matériaux et procédés d'isolations - Guide : bâtir le développement durable*, Socotec. 2013.

[53] 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.

[54] Mathieu  
Bendouma, *Systèmes d'isolation thermique par l'extérieur: études expérimentales et numériques des transferts de chaleur et d'humidité*. 2019.

[55] CSTB, « Cahier



des Prescriptions Techniques d'emploi et de mise en œuvre : Systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé ». 2018.

[56] CSTB, « NF DTU 31.2 Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois ». 2011.

[57] 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.

[58] ADEME *et al.*, « Procédés d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé: emploi et mise en œuvre ». Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, 2014.

[59] AIA UPJOHN GRANT, « THERMAL PERFORMANCE OF FAÇADES ». 2012, [En ligne]. Disponible sur: [https://www.payette.com/wp-content/uploads/2017/09/2012\\_aia-upjohn-grant\\_thermal-performance-of-facades\\_payette-final-report.pdf](https://www.payette.com/wp-content/uploads/2017/09/2012_aia-upjohn-grant_thermal-performance-of-facades_payette-final-report.pdf).

[60] Enertech, « INFORMATIONS TECHNIQUES : LES PONTS THERMIQUES DANS LES BÂTIMENTS PERFORMANTS ». Mutuelle des Architectes Français assurances, 2012.

[61] JOAKIM KARLSSON, « Windows – Optical Performance and Energy Efficiency ». Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:161001/FULLTEXT01.pdf>.

[62] J. L. Aguilar-Santana, H. Jarimi, M. Velasco-Carrasco, et S. Riffat, « Review on window-glazing technologies and future prospects », *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 15, n° 1, p. 112-120, févr. 2020, doi: 10.1093/ijlct/ctz032.

[63] Kankana Dubey, Andrey Dodonov, « Mapping of Existing Technologies to Enhance Energy-Efficiency in Buildings in the UNECE Region - Geneva ». UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE-Joint Task Force on Energy Efficiency Standards in Buildings.



[64] M. Asif, T. Muneer, et J. Kubie, « Sustainability analysis of window frames », *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 26, n° 1, p. 71-87, févr. 2005, doi: 10.1191/0143624405bt118tn.

[65] A. Stegou-Sagia, K. Antonopoulos, C. Angelopoulou, et G. Kotsiovelos, « The impact of glazing on energy consumption and comfort », *Energy Conversion and Management*, vol. 48, n° 11, p. 2844-2852, nov. 2007, doi: 10.1016/j.enconman.2007.07.005.

[66] Haiying Wang, Bjarne W. Olesen, Ongun B. Kazanci, « Effect of glazing ratio on thermal comfort and heating/cooling energy use ». Conference: ISHVAC 2019At: Harbin, China, 2019, [En ligne]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/334760693\\_Effect\\_of\\_glazing\\_ratio\\_on\\_the\\_rmal\\_comfort\\_and\\_heatingcooling\\_energy\\_use](https://www.researchgate.net/publication/334760693_Effect_of_glazing_ratio_on_the_rmal_comfort_and_heatingcooling_energy_use).

[67] N. L. Sbar, L. Podbelski, H. M. Yang, et B. Pease, « Electrochromic dynamic windows for office buildings », *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 1, n° 1, p. 125-139, juin 2012, doi: 10.1016/j.ijse.2012.09.001.

[68] SNFA, *Réglementation Acoustique applicable lors du remplacement de fenêtre et porte extérieure en zone de bruit. .*

[69] Guide RAGE, « Doubles fenêtres : Prescriptions et mise en oeuvre - Rénovation ». Programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 », 2014, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.architectes-du-patrimoine.org/IMG/pdf/guide-rage-doubles-fenêtres-reno-2014-04.pdf>.

[70] Aline Branders, Arnaud Evrard, « Guide d'aide à la conception : Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en brique pleine ». département Énergie et Bâtiment durable du Service Public de Wallonie, 2010.

[71] Gérard Morin et François Bonneau, « Guide des écomatériaux pour les artisans ». Artisans et environnement, Chambre des Métiers et de l'Artisanat, 2010.



[72] 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.

[73] A. Kirsch, K. Ostendorf, et M. Euring, « Improvements in the production of wood fiber insulation boards using hot-air/hot-steam process », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 76, n° 4, p. 1233-1240, juill. 2018, doi: 10.1007/s00107-018-1306-z.

[74] M. Woloszyn et C. Rode, « Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings », *Build. Simul.*, vol. 1, n° 1, p. 5-24, mars 2008, doi: 10.1007/s12273-008-8106-z.

[75] 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.

[76] Georgios Martinopoulos et Agis Papadopoulos, « A Comparison of Various Heating Systems in Greece Based on Efficiency and Fuel Cost ». Conference: 17th International Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia At: Sokobanja, 2015, [En ligne]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/284019847\\_A\\_Comparison\\_of\\_Various\\_Heating\\_Systems\\_in\\_Greece\\_Based\\_on\\_Efficiency\\_and\\_Fuel\\_Cost](https://www.researchgate.net/publication/284019847_A_Comparison_of_Various_Heating_Systems_in_Greece_Based_on_Efficiency_and_Fuel_Cost).

[77] 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.

[78] 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.

[79] Toulouse Métropole, « Réseau de chaleur urbain ». Consulté le: févr. 20, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.toulouse-metropole.fr/missions/dechets-proprete/reseau->



urbain-de-chaleur.

[80] J. E. Brumbaugh et J. E. Brumbaugh, *Heating systems, furnaces, and boilers*, All new 4. ed. Indianapolis, Ind: Wiley, 2004.

[81] 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.

[82] 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.

[83] J. Seifert, M. Knorr, A. Meinzenbach, F. Bitter, N. Gregersen, et T. Krogh, « “Review of thermostatic control valves in the European standardization system of the EN 15316-2/EN 215” », *Energy and Buildings*, vol. 125, p. 55-65, août 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.04.066.

[84] G. Cao *et al.*, « A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings », *Building and Environment*, vol. 73, p. 171-186, mars 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.12.009.

[85] Juslin Koffi, *Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles*. 2009.

[86] Adrien Dhalluin, *Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire*. École Doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et Aéronautique (SI-MMEA), 2013.

[87] C. Dimitroulopoulou, « Ventilation in European dwellings: A review », *Building and Environment*, vol. 47, p. 109-125, janv. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.016.

[88] G. Guyot, M. H.



Sherman, et I. S. Walker, « Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review », *Energy and Buildings*, vol. 165, p. 416-430, avr. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.12.051.

[89] P. M. Bluysen *et al.*, « Why, when and how do HVAC-systems pollute the indoor environment and what to do about it? the European AIRLESS project », *Building and Environment*, vol. 38, n° 2, p. 209-225, févr. 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(02)00058-6.

[90] 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.

[91] 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.

[92] MÉTROSCOPE, « 50 indicateurs clés pour les métropoles françaises ». 2017, [En ligne]. Disponible sur: [https://www.aua-toulouse.org/wp-content/uploads/2017/07/pdf\\_metroscope-60-pages-juin-2017-bd-light.pdf](https://www.aua-toulouse.org/wp-content/uploads/2017/07/pdf_metroscope-60-pages-juin-2017-bd-light.pdf).

[93] Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire métropolitaine, « Portrait énergétique de la grande agglomération toulousaine ». Perspectives villes, Observatoire environnement, 2019.

[94] République Française - ADEME, « Diagnostics de performance énergétique pour les logements par habitation », *Portail open data de l'ADEME*, janv. 25, 2020. <https://data.ademe.fr/datasets/dpe-france>.

[95] 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>.

[96] Adelaide Mailhac, *Contribution au développement d'une méthodologie d'évaluation environnementale*





*aux échelles urbaines.*, Manuscrit de These. 2021.

[97] A. Mastrucci, A. Marvuglia, U. Leopold, et E. Benetto, « Life Cycle Assessment of building stocks from urban to transnational scales: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, p. 316-332, juill. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.060.

[98] Tobias Loga *et al.*, « Typology Approach for Building Stock Energy Assessment (TABULA) ». Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2012, Consulté le: janv. 13, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects>.

[99] Nathalie Tornay, Marion Bonhomme, Serge Faraut, « GENIUS, a methodology to integer building scale data into urban microclimate and energy consumption modelling ». Project: MAppUCE - Conference: ICUCAt : 12th Symposium on the Urban Environment, 2015, Consulté le: janv. 25, 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/307882000\\_GENIUS\\_a\\_methodology\\_to\\_integer\\_building\\_scale\\_data\\_into\\_urban\\_microclimate\\_and\\_energy\\_consumption\\_modelling](https://www.researchgate.net/publication/307882000_GENIUS_a_methodology_to_integer_building_scale_data_into_urban_microclimate_and_energy_consumption_modelling).

[100] 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.

[101] DREAL Occitanie, « Rénovation du bâti ancien en Occitanie - Fiches pratiques par typologies de bâtiment ». 2019.

[102] Service Départemental de l'Architecture et du Patrimoine de la Haute-Garonne, Ministère de la Culture et de la Communication Préfecture de la Haute-Garonne, et Mairie de Toulouse - Direction de l'Esthétique et du Patrimoine Urbains, « TOULOUSE La ville et ses faubourgs Couleur et architecture ». .

[103] Urbanisme - Habitat et Mairie de Toulouse, « Guides couleurs et matériaux des façades ». Façades et devantures de la ville de Toulouse, Consulté le: janv. 26, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.toulouse.fr/web/urbanisme-habitat/paysage-urbain/guides-couleurs-materiaux-facades>.



- [104] Marion Bonhomme, *Contribution to the generation of multiscale and evolutionary databases for a multidisciplinary approach to urban energy*. .
- [105] Annual Report of the Market Observatory for Energy et European Commission, « Europe's energy position-markets and supply ». 2010.
- [106] G. Ouzeau, M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard Sous la direction de Jean Jouzel, « Le climat de la France au XXIe siècle-Volume 4-Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer ». Direction générale de l'Énergie et du Climat-Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2014.
- [107] Rémi Papillault, Laura Girard, et Jean-Loup Marfaing, *Guide d'architecture du XXIe siècle en Midi-Toulousain*. Presses universitaires du Midi, 2016.





This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 890598.

# 1 ANNEXE 1 : NOTIONS THEORIQUES GENERALES

## 1.1 NOTIONS DE THERMIQUE

### 1.1.1 GENERALITES

Les principaux principes de la thermodynamique suggèrent que l'énergie ne se crée pas, elle se transforme ou se déplace. Dans le cas d'un déplacement de chaleur, le sens du flux se fait du chaud vers le froid.

Bien que ce principe d'échanges de chaleur soit simple, on constate que, lorsqu'il est appliqué à un bâtiment en évolution libre, les phénomènes peuvent se multiplier et interagir entre eux pour devenir une entité beaucoup plus complexe. La Figure 15 schématise ces principaux échanges [10].

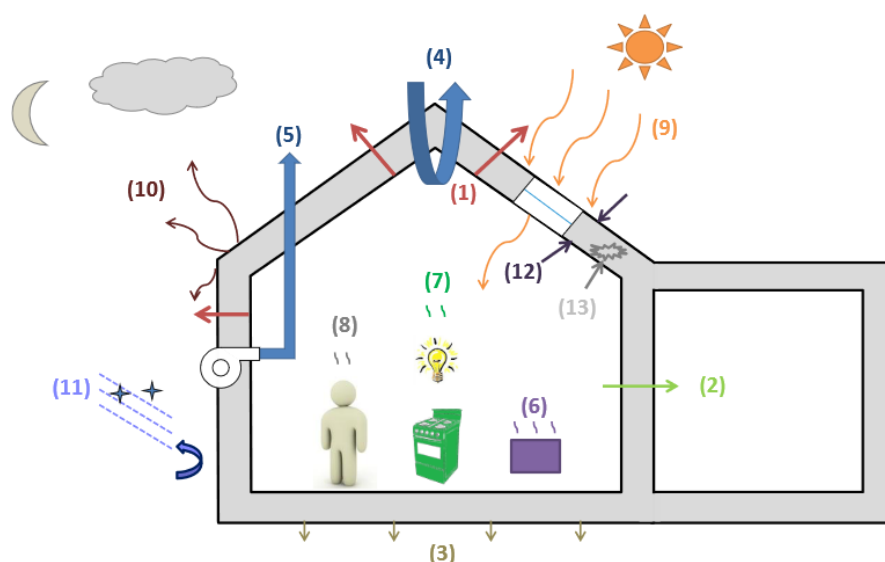


Figure 15 : Représentation schématique des différents échanges thermiques dans un habitat

**1 :** Le flux de chaleur échangé avec l'extérieur via l'enveloppe du bâtiment. La différence de températures entre l'intérieur et l'extérieur est le principal moteur de cet échange.

**2 :** Le flux de chaleur échangé vers l'extérieur via un local non chauffé. Le local non chauffé joue le rôle de zone tampon.

**3 :** Le flux de chaleur échangé avec le sol via le plancher bas.



**4 :** Le flux de chaleur porté par les infiltrations d'air dues aux défauts d'étanchéité : par exemple au niveau des menuiseries.

**5 :** Le flux lié au renouvellement d'air de la ventilation.

**6 :** Le gain ou les pertes de chaleur imputables aux systèmes de chauffage ou de climatisation du bâtiment.

**7 :** La chaleur dégagée par les équipements du bâtiment : par exemple un four ou une télévision.

**8 :** Le flux de chaleur dégagé par les occupants.

**9 :** Le gain énergétique apporté par le rayonnement solaire via les surfaces vitrés (direct ou diffus).

**10 :** Le flux solaire échangé par rayonnement infrarouge avec l'environnement extérieur.

**11 :** Le flux lié aux aléas climatiques : pluie, neige, givre...

**12 :** Le stockage ou déstockage de l'énergie thermique lié à l'inertie des matériaux de l'enveloppe.

**13 :** Le flux lié au transfert d'humidité à l'intérieur des parois du bâtiment : évaporation, condensation...

## 1.1.2 DEPERDITION SURFACIQUE D'UNE PAROI

### Conductivité thermique

La conductivité thermique  $\lambda$  est une grandeur qui permet de caractériser la capacité d'un matériau à faciliter le passage de la chaleur en conduction. Elle représente la puissance traversant une paroi de 1m pour 1°C d'écart pour un matériau donné ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

La conductivité thermique de l'eau est largement supérieure à celle de l'air,  $\lambda$  peut donc varier en fonction du degré d'humidité ou du mouillage d'un matériau.

Enfin, certains matériaux, dits anisotropes, n'ont pas les mêmes propriétés thermiques en fonction du sens de parcours du flux. Par exemple : les fibres de bois ou les blocs creux en maçonnerie.

### Résistance thermique

La résistance thermique  $R$  correspond à la capacité d'une paroi à retenir un flux de chaleur. Elle dépend directement de la conductivité et de l'épaisseur du matériau, selon la relation ci-dessous. Elle est donnée en ( $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ).

$$R = e/\lambda$$



Dans le cas d'un mur composé d'une superposition de plusieurs couches, il est possible d'additionner les différentes résistances partielles selon la relation suivante afin d'obtenir une résistance équivalente  $R_T$  :

$$R_T = \Sigma R = \Sigma_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}$$

### Coefficient de transmission surfacique

Le coefficient de transmission surfacique d'une paroi est l'inverse de sa résistance thermique en  $W.m^{-2}.K^{-1}$ . Il correspond à sa capacité à conduire la chaleur. Plus U est faible plus la paroi est isolante.

$$U = 1/R_T$$

### Impact de la convection

Le coefficient  $h_c$  décrit comme coefficient d'échange convectif, correspond au flux de chaleur échangé entre une surface et un fluide pour un différentiel de température de 1°C. La résistance thermique  $R_c$  correspondante à cet échange convectif peut être définie comme l'inverse de ce coefficient.

$$R_c = 1/h_c$$

### Déperdition d'un mur multicouche

Le flux chaleur traversant un mur (ou déperdition), en W, s'obtient avec la formule suivante :

$$\phi = \varphi \cdot S = U_{tot} \cdot \Delta T \cdot S = \frac{\Delta T}{\Sigma R} \cdot S = \frac{\Delta T}{R_i + R_T + R_e} \cdot S$$

Avec  $\varphi$  ( $W/m^2$ ) densité de flux de chaleur, S la surface d'échange ( $m^2$ ),  $\Delta T$  différentiel de température entre l'intérieur et l'extérieur ( $^{\circ}C$ ),  $R_i$  résistance convective intérieure ( $m^2.K.W^{-1}$ ) et  $R_e$  résistance convective extérieure ( $m^2.K.W^{-1}$ ). La Figure 16 représente l'échange.



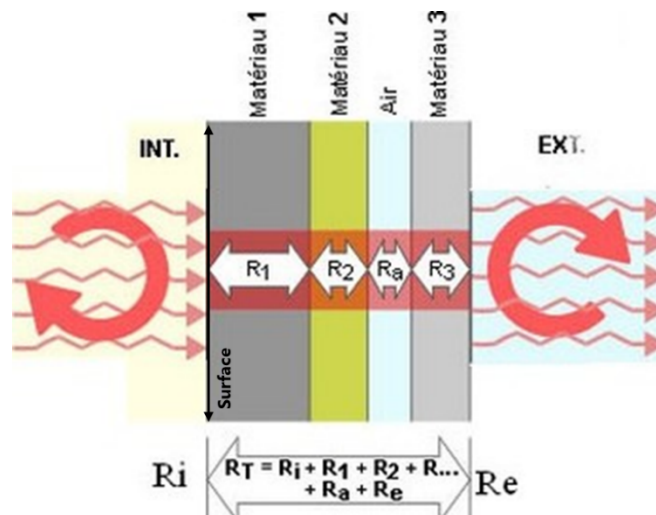


Figure 16 : Schématisation du flux thermique au travers d'une paroi multicouche

### 1.1.3 DEPERDITION LINEIQUE OU PONCTUELLE D'UNE PAROI

Selon le fascicule des règles de l'art de la thermique du bâtiment, le CSTB définit les ponts thermiques comme une partie de l'enveloppe où la résistance thermique est inférieure au reste du mur [11]. Plusieurs facteurs sont à l'origine de ces phénomènes :

- Les techniques constructives peuvent engendrer la perforation de matériaux. Par exemple, la fixation d'isolant grâce à des attaches métalliques.
- Un changement d'épaisseur des matériaux. Par exemple, à la jonction entre une façade et un plancher intermédiaire.
- Un changement de surface entre la surface intérieure et extérieure peut entraîner une plus grande surface déperditive. Par exemple un angle sortant entre deux murs.

Compte tenu de leur nature, les ponts thermiques peuvent être décrits de deux façons différentes.

#### Les ponts thermiques linéaires

Exprimés en fonction d'une longueur, ils sont caractérisés au moyen du coefficient  $\psi$  en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ . La déperdition associée se calcule en multipliant la longueur du pont thermique par la valeur du coefficient associé à la technique de construction et par la différence de température observée.

$$\phi = \psi \cdot L \cdot \Delta T$$

#### Les ponts thermiques ponctuels



Les ponts thermiques ponctuels décrivent les déperditions de la jonction concernée uniquement. Ils sont caractérisés par le coefficient ponctuel  $\chi$  exprimé en W/K

$$\phi = \chi \cdot \Delta T$$

Les différentes valeurs des coefficients des ponts thermiques linéiques ou ponctuels dépendent des techniques constructives. Les règles Th.Bat recensent de manière normalisée les coefficient associés à chaque composition [11], [12].

#### 1.1.4 INERTIE THERMIQUE

L'inertie thermique peut être appréhendée comme la vitesse de réaction d'un bâtiment lorsque on l'écarte de sa position d'équilibre thermique [13]. Le résultat d'expérience va directement dépendre des caractéristiques des matériaux qui jouent sur leur capacité à stocker et redistribuer la chaleur. Ces principales grandeurs sont la conductivité thermique, la capacité thermique et la masse volumique.[14]

De manière simplifiée, plus un matériau sera dense et plus son inertie thermique sera importante.

##### **Effusivité thermique**

Elle permet d'étudier la sollicitation du bâtiment aux conditions climatiques extérieures selon la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot Cp}$$

Ainsi pour améliorer la capacité à limiter les échanges et décaler dans le temps les pics de chaleurs, il faut privilégier des matériaux avec un faible  $\lambda$  et un fort  $(\rho \cdot Cp)$  .

##### **Diffusivité thermique**

La diffusivité permet d'étudier l'impact des conditions d'ambiances sur les parois intérieures.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot Cp}$$

Pour stocker l'énergie thermique dans les couches intérieures d'une paroi, le matériau doit être perméable à la chaleur et avoir une forte capacité d'accumulation. Les valeurs de  $\lambda$ ,  $\rho$ , et  $Cp$  doivent alors être élevées.





## 1.2 PROPRIETES HYDRIQUES

Un matériau hygroscopique peut être défini comme un matériau poreux ayant la capacité de stocker de l'eau sous forme liquide dans ses pores et de la déstocker sous forme de gaz. En fonction des conditions climatiques auxquelles est soumise une paroi, un transfert d'humidité s'opère avec son environnement. Ce transfert peut jouer sur la sensation de confort des occupants ainsi que sur certains éléments de consommation énergétique. Choisir des matériaux de rénovation possédant une forte inertie hydrique peut par exemple permettre de réguler le rafraîchissement et l'humidité de manière passive [15]. En effet, Couplés avec les phénomènes de transferts thermiques, les flux hydriques résultent de la capacité de changement de phase de l'eau à l'intérieur des matériaux constitutifs d'une paroi. Plusieurs documents détaillent les enjeux de ce domaine [16]–[20].

### 1.2.1 GENERALITES

#### L'Humidité relative et l'humidité absolue

L'humidité relative de l'air (HR), ou degré d'hygrométrie, peut être défini comme la part de vapeur d'eau par rapport à la part maximale théorique que peut contenir un air sec avant saturation. HR peut également s'exprimer en fonction du rapport de pression entre la part de vapeur dans l'air étudié et la pression saturante d'un air à la même température

$$HR(\%) = \frac{P_{vap}}{P_{sat}} \times 100$$

L'humidité absolue ( $r$ ) correspond, en situation réelle, à la quantité d'eau contenue dans un volume d'air sec (en  $\text{g.m}^{-3}$ ).

#### La teneur en eau

La teneur en eau ( $\omega_i$  ou  $\theta_i$ ) caractérise la quantité d'eau contenue dans les pores d'un matériau en fonction de la quantité de matériau sec. Elle peut être exprimée selon un rapport massique ou volumique

$$\omega_i = \frac{m_i}{m_0} \quad \theta_i = \frac{V_i}{V_0}$$

#### Transfert de l'humidité entre un air et un matériau

Ce sont les différences de pressions partielles de vapeur d'eau qui créent les mouvements de flux de vapeur. Dans son document, le CSTB détaille deux phénomènes de fixation de l'eau dans les matériaux [20]:



- L'adsorption : c'est un phénomène physique qui entraîne le dépôt d'un gaz ou d'un liquide sur une surface solide via les forces intermoléculaires. La surface de dépôts maximale disponible correspond à la surface développée des pores du matériau. Dans un seconds temps plusieurs nouvelles couches d'eau peuvent s'adsorber sur cette première.
- La condensation capillaire : Lors de l'adsorption, si le pore est suffisamment petit et les couches précédentes suffisamment épaisses, le phénomène de tension superficielle peut créer un pont entre deux faces. Apparaît alors une phase liquide dans le matériau même si l'humidité relative est inférieure à 100%.

La Figure 17 reprend ces trois étapes et présente une courbe de sorption d'un matériau en fonction de la teneur en eau et de l'humidité relative de l'air. Mnasri [16] propose dans son manuscrit de thèse une représentation schématique de hystérésis de sorption dans les matériaux hygroscopiques (voir Figure 18). La forme de la courbe d'hystérésis peut varier en fonction de la nature du matériau et sa structure poreuse. Plus l'écart entre la courbe de sorption et de désorbitions est grand, plus le matériau est capable d'assimiler des grandes quantités d'eau.

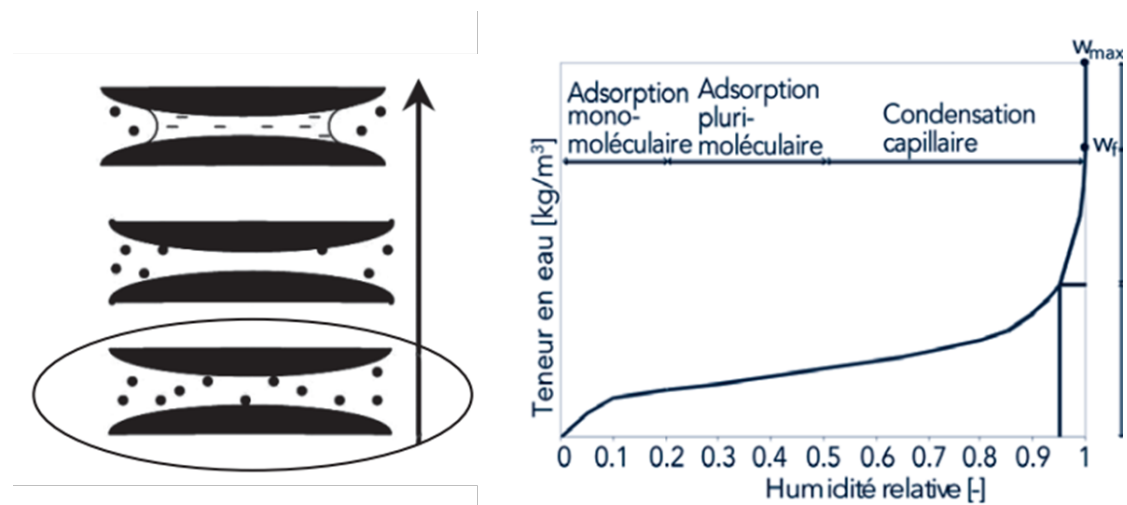


Figure 17 : Différentes étapes de fixation de l'eau dans les pores d'un matériau



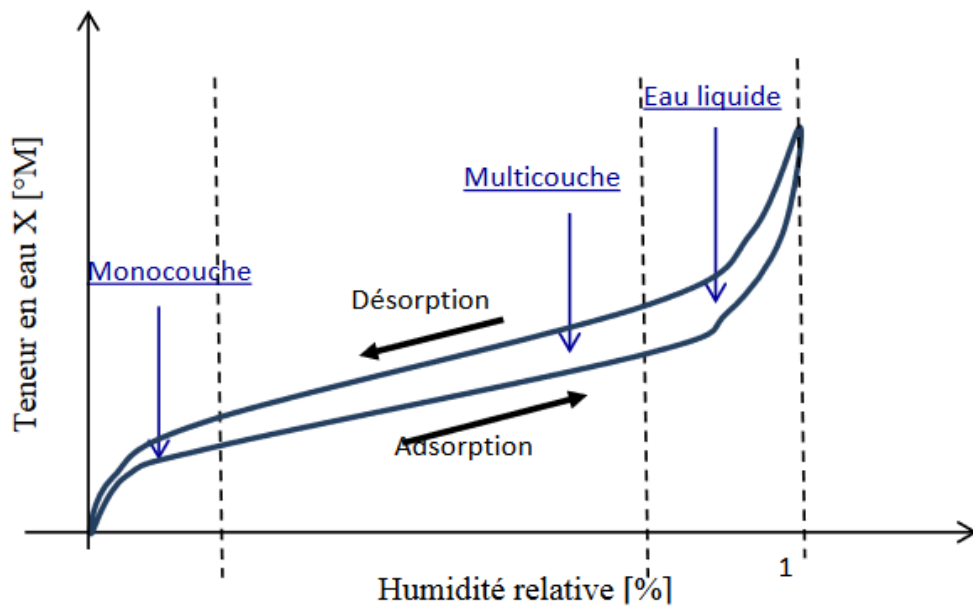


Figure 18 : Représentation schématique de hystérésis de sorption dans les matériaux hygroscopiques

### 1.2.2 FLUX DE VAPEUR AU TRAVERS D'UN MUR

Nous venons de voir que la différence de pression partielle de vapeur d'eau était le principal moteur de migration de flux de vapeur. La taille des pores et la teneur en humidité d'un air sont les principaux moteurs du changement de phase de l'eau au passage de ce flux. Plusieurs grandeurs servent à caractériser les matériaux en fonction de ces phénomènes.

#### La perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité correspond à la capacité d'un matériau à laisser passer le flux de vapeur associé. C'est le rapport de la quantité de vapeur traversante ( $W_p$ ) par unité d'épaisseur en fonction de la différence de pression partielle ( $kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$ )

$$\delta p = \frac{W_p}{e}$$

#### Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau

Le coefficient de diffusion à la vapeur correspond à la capacité de résistance à la diffusion hydrique d'un matériau. Il est basé sur la perméabilité de l'air ( $\delta o$ ) et est donc sans unité :

$$\mu = \frac{\delta o}{\delta p}$$



## **Épaisseur de la couche d'air équivalente**

C'est une grandeur ( $S_d$ ) permettant de comparer les propriétés des matériaux entre eux. Elle représente l'épaisseur d'une couche d'air (en m) correspondant à la diffusivité équivalente d'un matériau à épaisseur donnée.

$$S_d = \mu \times d$$

## **Diffusion de la vapeur dans une paroi multicouche**

Comme évoqué précédemment, le transfert de vapeur ( $g_v$ ) dans une paroi dépend de la différence de pression appliquée à la paroi et de la perméabilité à la vapeur de la paroi.

$$g_v = \frac{\delta p}{e} \Delta P_{vap} = \frac{\delta o}{\mu e} \Delta P_{vap}$$

Dans le cas d'une paroi multicouche, la méthode est similaire et doit être appliquée successivement aux différentes couches. Il peut exister un risque de condensation entre deux matériaux présentant une forte réduction de la perméabilité à la vapeur, en effet le flux de vapeur risque de s'accumuler au niveau de la jonction entre les matériaux si elle ne peut pas le traverser.

## **Valeur de capacité de tampon hydrique**

L'inertie hydrique d'un matériau, ou Moisture Buffering Value (MBV) en anglais, désigne la capacité d'un matériau à stocker ou déstocker une certaine quantité d'eau dans le temps. Donnée en  $\text{g.m}^2.\%\text{HR}^{-1}$ , la valeur correspondante est souvent obtenue de manière empirique grâce à un protocole standardisé : l'échantillon est soumis à une variation d'hygrométrie de 33% pendant 16 heures puis 75% pendant 8 heures. La différence de masse finale permet le calcul de MBV.

# **1.3 QUALITE DES AMBIANCES INTERIEURES.**

## **1.3.1 ETUDE THEORIQUE**

Un être vivant échange continuellement de l'énergie avec son environnement. Le fonctionnement de la physiologie du corps humain est un sujet largement traité dans la littérature scientifique. Il existe plusieurs équations du principe de conservation de l'énergie pour l'organisme humain. L'ASHRAE propose un bilan thermique basé sur les formules de Fanger [21], [22] alors que d'autres expressions se réfèrent aux équations de la chaleur de Fourier [23], [24] :



$$m_c \cdot c_c \frac{dT_{c_{moy}}}{dt} = (M - W) \pm \Phi_{ech}$$

$$= (M - W) \pm (\Phi_{evap} + \Phi_{res} + \Phi_{ray} + \Phi_{cond} + \Phi_{conv})$$

Avec,

M, Métabolisme (W)

W, Travail mécanique externe (W)

$\Phi_{ech}$ , Transferts de chaleur entre le corps et l'environnement (W)

$m_c$ , Masse corps humain (kg)

$c_c$ , Capacité thermique massique du corps (J/kg.°C)

$T_{c_{moy}}$ , Température moyenne du corps humain (°C)

t, Temps (s)

$\Phi_{res}$ , Flux de chaleur échangée par la respiration (W)

$\Phi_{conv}$ , Flux de chaleur convectif échangé avec l'environnement (W)

$\Phi_{ray}$ , Flux de chaleur radiatif échangé avec l'environnement - Échanges IR avec l'environnement + Apports solaires (W)

$\Phi_{cond}$ , Flux de chaleur conductif échangé avec l'environnement (W)

$\Phi_{evap}$ , Flux de chaleur échangée par évaporation à la surface de la peau (W)

Parmi les échanges cutanés avec l'environnement, l'importance des trois principaux modes d'échange (la conduction, la convection, et le rayonnement) ainsi que les échanges latents (l'évaporation de la sueur) sont clairement visibles dans cette équation.

L'être humain est un organisme homéotherme. Pour fonctionner correctement, il doit conserver sa température interne dans une certaine gamme de variation ( $37 \pm 1^\circ\text{C}$ ). C'est pour conserver cet équilibre dans un environnement extérieur que notre corps possède des mécanismes de thermorégulation. La réponse à la modification d'une condition d'ambiance peut être de plusieurs natures : physiologique, comportementale ou encore psychologique (sudation, frissons, modification de la posture ou de la vêtue, etc.) [23]

La variation de l'équilibre thermique et donc du confort, peuvent être perçus comme une conséquence de l'amplitude et de la fréquence des sollicitations des différents mécanismes thermorégulateurs pour faire face à l'ambiance environnante.



### 1.3.2 CONFORT ET MODELES DE PERCEPTION THERMIQUE (CT)

Les différentes normes définissent le confort thermique comme « *un état d'esprit qui exprime une satisfaction de son environnement* ». L'insatisfaction peut être causée par un inconfort pour le corps dans son ensemble.[25], [26]

Bien que les circonstances nécessaires à l'obtention d'une ambiance permettant l'équilibre thermique soient globalement similaires pour tous, l'interprétation, donc le confort, de chaque individu peut être très différente. Le jugement sur une ambiance est propre à chacun et ce jugement peut être influencé par des facteurs sociaux, culturels, systémiques, etc.

Il existe dans la littérature un grand nombre d'indicateurs de confort basés sur des régressions d'échelle de jugement d'ambiances [27], [28]

#### **PMV-PPD**

L'indice du PMV est une combinaison des équations de la physique auxquelles ont été ajoutés des formules empiriques [29]. Le vote prévisible moyen est compris entre -3 et 3. Un PMV égal à 0 revient à dire que les mécanismes thermorégulateurs de l'homme ne sont pas sollicités. Il équivaut une sensation thermique neutre. Il se calcule en fonction de 5 paramètres

- La température d'air
- La température moyenne de radiative
- HR, l'hygrométrie
- La vitesse d'air
- Le métabolisme d'activité
- La résistance thermique des vêtements

Le PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied est directement lié au PMV. C'est un indice qui permet d'estimer le pourcentage de personne en situation d'inconfort.

#### **Le confort thermique adaptatif**

Les modèles de Confort Thermique Adaptatif prédisent les conditions dans lesquelles les occupants sont susceptibles d'être en situation de confort dans les bâtiments. Il a été observé que, grâce à des actions d'adaptation des occupants, une zone acceptable de confort thermique plus large que celle du PMV est acceptable (température opérative d'air allant d'environ 17 à 31°C) [30].



Ces zones sont des indicateurs qui permettent une approche du confort dynamique car ils sont basés 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...

Cette régulation plus lâche permet souvent d'effectuer des économies d'énergies sur les systèmes de chauffages ou de refroidissement.

### **Zone de Givoni**

Givoni propose dans les années 70 une méthode de définition des conditions de confort en conditions homogènes pour différents paramètres de température, d'humidité et de vitesse d'air [31], [32]. Le couplage obtenu est cependant dépendant du métabolisme et de la vêtue[33]. C'est un indicateur encore utilisé aujourd'hui dans le domaine de la conception bio climatique [34], [35].

La Figure 19 est une des représentations des zones de Givoni. En fonction de la vitesse d'air d'une ambiance, il existe une zone de confort prédéfinie tracé sur un diagramme psychométrique. En comparant les caractéristiques d'un air il est possible de définir des conditions de confort. Les zones en question se déplacent sur le diagramme en fonction de la vitesse d'air ambiant. C'est pour cette raison qu'il faut choisir l'abaque la plus proche des conditions réellement observées.



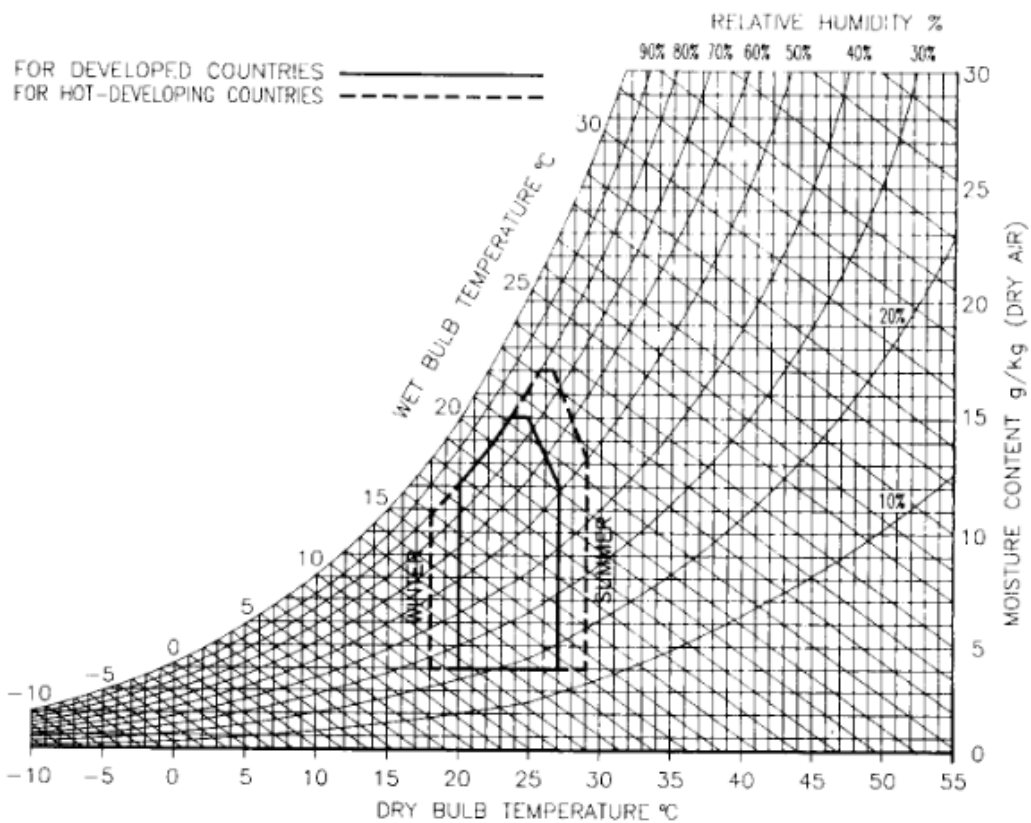


Figure 19 : Diagramme de Givoni : Zone de confort en fonction de la saison pour une vitesse d'air calmes [32]

## 1.4 QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

Selon l'ASHRAE, la qualité de l'air intérieure (QAI) fait référence à la qualité environnementale d'une ambiance intérieure par rapport à l'être humain. Elle comprend également la théorie et la pratique de l'évaluation et du contrôle des particules qui peuvent affecter la santé (risques chimiques, biologiques, physiques, etc.). L'objectif étant d'améliorer la salubrité des environnements intérieurs [22].

Du point de vue de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), un air peut être considéré comme acceptable si [36]:

- Moins de 50% des occupants peuvent détecter des odeurs dérangeantes
- Moins de 20% des occupants sont en situation d'inconfort
- Moins de 10% des occupants déclarent ressentir un assèchement des muqueuses





- Moins de 5% des occupants ne subissent des désagréments liés à l'environnement.

Il existe un large éventail de polluants. Certains peuvent entraîner des gênes alors que d'autres, comme par exemple le radon, ne sont pas visibles et peuvent porter atteinte à la santé des occupants sans pour autant avoir d'incidences sur le confort.

De nombreux polluants différents, tels que l'ozone (O<sub>3</sub>), les particules (PM), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), ont des effets irritants qui peuvent provoquer des toux et une dégradation des muqueuses. Ceci entraîne une augmentation des maladies et infections. Par exemple l'asthme [22], [37], [38].

Les polluants sont classés en fonction de la taille et du type de particules. La méthode de traitement peut être différente en fonction du type de particules. Par exemple les particules fines sont généralement traitées avec des filtres alors que les NO<sub>x</sub> peuvent être gérés par des procédés de catalyse.

#### 1.4.1 DIFFERENTS TYPES DE POLLUANTS

##### **Les polluants gazeux**

Les polluants gazeux peuvent être plus ou moins gênants, toxiques, nocifs, ou simplement odorants en fonction de leur nature ou de leur concentration. Ce sont des molécules chimiques évoluant librement. Les plus communes sont par exemple le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les monoxydes de carbone (CO) ou l'ozone (O<sub>3</sub>). Ce sont des polluants atmosphériques issus de l'activité humaine, qui peuvent provenir de l'extérieur via la ventilation ou être émis via les activités dans le bâtiment. Par exemple, lors de la combustion du système de chauffage, la fumée de tabac ou encore les processus d'impression [39].

Cadiegues propose dans son guide un référencement des principaux polluants gazeux. [40]

Les molécules d'eau contenues dans l'air peuvent, dans certains cas, être considérées comme un vecteur de la dégradation de la qualité de l'air. En dessous de 40% on constate un dessèchement des muqueuses et au-dessus de 60% une hausse de la prolifération de moisissures et d'agents infectieux.

##### **Les composés organiques volatils (COV)**

Les COV sont des familles de molécules faites d'atomes de carbone et d'hydrogène. La famille des COV est composée de plusieurs centaines d'espèces différentes dont certaines ne sont sûrement pas encore référencées.



Par ailleurs, la famille des formaldéhydes est le composé nocif le plus abondant dans les logements : lors de la campagne expérimentale de l'observatoire de la qualité de l'air menée entre 2003 et 2005, il a été détecté dans 100% des logements. Il provient principalement des colles et des peintures des matériaux manufacturés (panneaux de bois, laines minérales, ...). [39]

Les sources des autres COV sont diverses et peuvent avoir des effets variés sur la santé. Dans le cas des bâtiments, la provenance principale est le choix des matériaux de constructions (moquettes, peintures, meubles...) ou l'usage du bâtiment (Produits d'entretiens, produits médicaux...)[40]

### **Polluants particulaires et fibreux**

Les aérosols définissent l'intégralité des particules en suspension dans l'air. Elles se présentent de trois façons différentes [40]:

- Les particules inertes ou les poussières
- Les particules liquides
- Les particules vivantes (bactéries, virus...)

La granulométrie de ce type de particules est très variable et peut varier de de 0,001  $\mu\text{m}$  à plus de 1000  $\mu\text{m}$ . En fonction de cette taille, les effets de déplacement, les conséquences pour la santé ou les techniques d'interceptions des filtres sont différentes. C'est pour cette raison qu'elles sont déclinées en trois grandes familles [22]:

- Les PM 2.5 pour particules fines de diamètre inférieur à 2.5  $\mu\text{m}$
- Les PM 10 pour particules fines de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$
- Les particules grossières, pour le reste des aérosols

Seules les particules fines présentent un risque pour la santé, elles peuvent provenir de différentes sources, par exemple de procédés de combustion ou de l'activité humaine.

La Figure 20 met en perspective les principaux polluants référencés en fonction de leurs tailles et de leurs provenance [22].



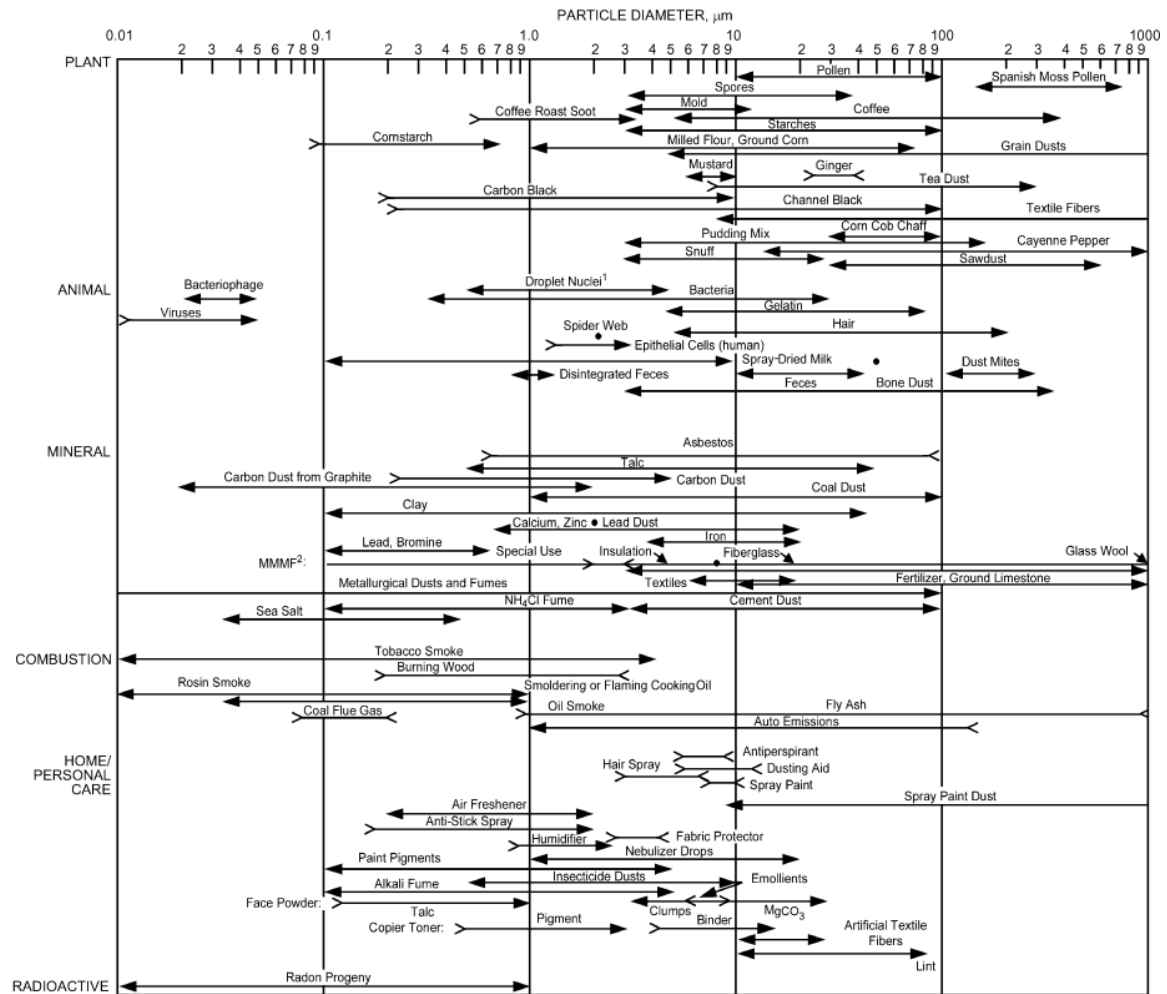


Figure 20 : Détail des principaux polluants référencés en fonction de leurs tailles de leurs provenances [22]

## 1.4.2 CONTROLE DE LA QUANTITE DE POLLUANTS

Le moyen le plus simple pour maintenir une qualité de l'air acceptable est de contrôler les sources d'apports en polluants.

La législation peut interdire l'utilisation d'un procédé jugé trop dangereux, par exemple l'amiante. Il existe également un certain nombre de labels qui, associés à des tables de classement ou de référencement, permettent de promouvoir l'installation de matériaux à faible émission de polluants. Par exemple les labels OsmoZ, WELL, LEED, BREEM et HQE prennent en compte des composantes de QAI [41].

Le deuxième mécanisme permettant de contrôler la pollution est basé sur la gestion de la pollution existante. Ceci passe par deux étapes : limiter l'apport de la pollution extérieure vers l'intérieur (grâce à des procédés de filtration par exemple), et gérer la dilution de la concentration intérieure. [36]



## La dilution

Celle-ci technique vise à maintenir la concentration d'un polluant donné en dessous d'un seuil acceptable en remplaçant l'air pollué par de l'air neuf. Dans l'idéal, les taux de ventilation sont donc ajustés en temps réel pour correspondre aux taux de production des polluants. Souvent, les mécanismes de régulation utilisés pour gérer le taux de ventilation ne permettent pas de contrôler réellement les taux de polluants : ils se basent souvent sur l'évolution de l'hygrométrie intérieure d'un local ou sur une mesure de CO<sub>2</sub>, ce qui permet d'estimer un indice de confinement de l'air intérieur. [36]

Pour pallier à ces incertitudes de mesures, des besoins de ventilation en fonction des bâtiments et de leurs usages ont été définis empiriquement. Différentes normes traitent de ce sujet, Par exemple la norme ASHRAE 66.2 ou la norme ISO 15251 [42], [43].

## Réduction des concentrations de polluants

Le deuxième moyen pour réduire la quantité de polluants présent dans la l'ambiance intérieure est d'avoir recours à une filtration spécifique. Les filtres sont généralement placés à la sortie du caisson de ventilation, du côté de l'air soufflé. Ainsi, pour les Centrales de Traitement d'Air (CTA) et les systèmes de VMC double flux, la filtration couvre l'air neuf extérieur et la part d'air intérieur recyclé. (Voir 3.3.4 Focus sur la QAI)

Russell et al[44] évoque le fait qu'augmenter la quantité d'air filtré permet de réduire les besoins de dilution vis-à-vis des hautes concentrations de polluants. Dans le cas des VMC simple flux, cette stratégie peut permettre de limiter les besoins d'air neuf. Une attention particulière doit être portée à l'entretien régulier des filtres. Dans le cas contraire, le colmatage peut engendrer une hausse des pertes de charges dans le circuit, et donc une surconsommation énergétique et une dégradation prématurée du ventilateur.

# 1.5 ANALYSE DE CYCLE DE VIE

## 1.5.1 DEFINITION

L'intégration de l'impact d'un bâtiment dans la démarche globale environnementale est un facteur primordial de l'écoconception. L'analyse de cycle de vie est un domaine permettant l'étude de l'impact environnemental d'un objet ou d'un procédé sur l'ensemble de sa durée de vie : de la conception jusqu'au recyclage de ses matériaux [45]. Dans le cadre du bâtiment, de nombreux outils de simulations permettent de calculer le poids d'un logement sur les différents impacts environnementaux, en particulier les impacts de la phase de construction du bâtiment qui sont souvent négligés. Les fabricants de matériaux alimentent



en parallèle des bases de données relatives à chaque constituant (par exemple la base INES) [46].

## 1.5.2 DEMARCHE D'UNE ACV APPLIQUEE AU BATIMENT

Les normes ISO 14044 et ISO 14040 détaillent l'étude une analyse de cycle de vie et définissent 4 phases a l'études [47], [48]:

- La définition des objectifs de l'étude
- L'inventaire des matériaux et méthodes employés
- L'analyse d'impact de cycle de vie des matériaux et procédés inventoriés
- L'interprétation des résultats

La méthodologie de l'ACV y est décrite comme un processus itératif et dynamique, La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** schématise la logique d'obtention des résultats d e l'étude.

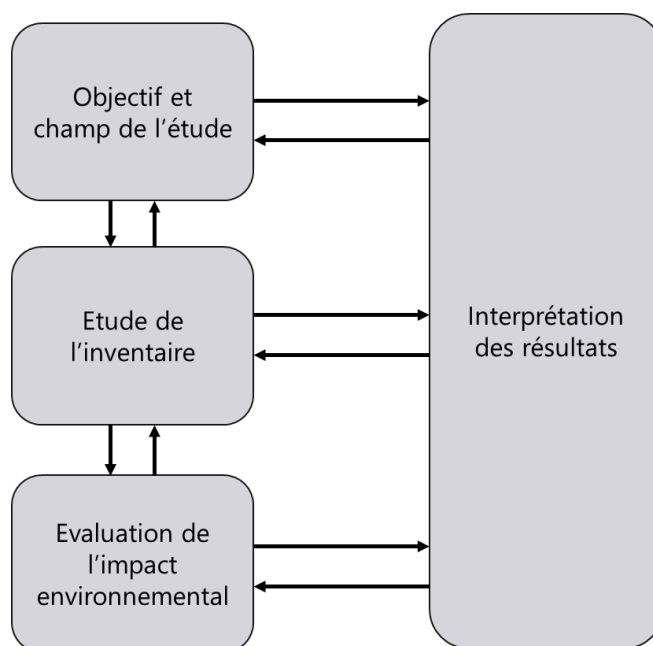


Figure 21 : Logigramme de fonctionnement d'une étude d'analyse de cycle de vie

Le projet européen EnerBuiLCA, ayant comme objectif de démocratiser et proposer de nouvelles approches de l'étude d'analyse de cycle de vie dans le bâtiment, propose un manuel complet dédié à l'ACV [49]. Selon cette étude, le cadre que doit couvrir une ACV dans le domaine du bâtiment est détaillé en Figure 22.



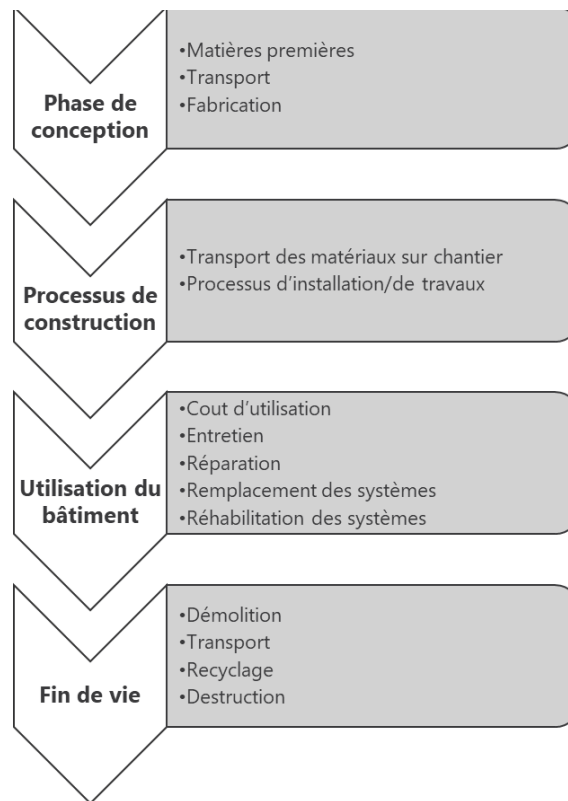


Figure 22 : Cadre d'étude d'une analyse de cycle de vie appliqué au bâtiment

En comparant les analyses de cycle de vie d'un procédé de rénovation par rapport à un procédé de reconstruction, l'impact environnemental en rénovation est largement plus avantageux. Ceci s'explique notamment par le réemploi des matériaux dans bâtiment. La « dette environnementale » a en effet déjà été payée [50].

### 1.5.3 INDICATEURS COURAMMENT UTILISES

L'étude de l'analyse de cycle de vie d'un bâtiment permet de comparer les matériaux et méthodes de constructions en fonction de différents indicateurs. L'intégralité des flux entrants et sortants sont classés en fonction de différentes catégories :

- Les ressources : par exemple l'eau ou l'énergie
- Les rejets de polluants : le CO2 dans l'air, les métaux lourds dans l'eau...
- La quantité de déchets produits : Inertes, radioactifs...

Une méthode de calcul standardisée permet de pondérer ces différents indicateurs pour proposer un bilan du bâtiment étudié. L'étude d'une ACV se présente sous la forme d'un diagramme radar à 12 axes représentant les différents postes clés (voir Tableau suivant).



Tableau 3 : Indicateurs environnementaux d'une étude ACV

| Indicateur                       | Unité                  |
|----------------------------------|------------------------|
| Epuisement ressources abiotiques | kg antimoine eq        |
| Consommation eau                 | m <sup>3</sup>         |
| Occupation au sol                | m <sup>2</sup> .an     |
| Dommages a la santé              | Daly                   |
| Dommages a la biodiversité       | PDF.m <sup>2</sup> .an |
| Effet de serre sur 100ans        | t CO2 eq               |
| Production ozone photochimique   | kg C2H4 eq             |
| Déchets produits                 | t                      |
| Déchets radioactifs              | dm <sup>3</sup>        |
| Eutrophisation                   | kg PO43 eq             |
| Acidification                    | kg SO2 eq              |

Les simulations tiennent également compte des usages des occupants durant l'occupation du bâtiment. Elles sont réalisées pour une durée de vie donnée (de 50 ans à 80 ans généralement). Ainsi il est possible de cibler les possibilités d'améliorations environnementales d'un projet : par exemple, est-il plus avantageux d'installer un système ayant un fort impact à la construction mais une faible consommation de flux ou inversement

En conclusion de ce chapitre, la définition est un processus complexe car multicritère. Chaque solution interagit avec un ensemble de domaines, du point de vue thermique, hygroscopique, ACV, confort ou encore QAI. De plus, Chaque projet de rénovation est un cas unique qui doit être traité de manière indépendante en fonction de son contexte historique et géographique. Il n'existe donc pas de solutions prédéfinies.

C'est pour cette raison que la suite du document est consacrée à l'étude des différentes techniques de façon indépendante. L'objectif est de définir quelles sont celles qui répondent à tous ces enjeux.



## 2 ANNEXE 2 : ETUDE DES DIFFERENTES SOLUTIONS DE RENOVATIONS EXISTANTES

---

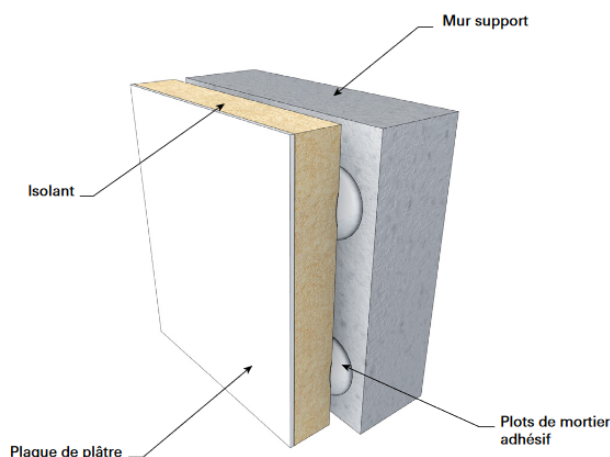
### 2.1 ISOLATION PAR L'INTERIEUR

L'isolation par l'intérieur (I<sub>TI</sub>) consiste à installer un isolant thermique sur la partie intérieure du mur afin de réduire les déperditions. Cette technique a l'avantage d'être moins coûteuse et plus facile à réaliser que l'isolation par l'extérieur.

En revanche l'I<sub>TI</sub> modifie l'inertie thermique du bâtiment. Dans le cas du confort d'été, une diminution du décalage du pic de chaleur journalière aura un impact sur le ressenti thermique et sur la consommation des systèmes de refroidissement. Un autre inconvénient majeur est la perte de surface habitable due au plaquage de l'isolant. Enfin, ce type d'isolation ne permet pas de gérer correctement les déperditions linéiques (ou « ponts thermiques »).

Dans les documents sur les techniques de construction [52], le CSTB propose un descriptif des techniques d'isolation par l'intérieur. L'ajout d'un isolant sur une paroi existante peut être réalisé par collage, par fixation sur une ossature métallique ou bois, ... Les figures suivantes présentent les 5 principales configurations utilisées.

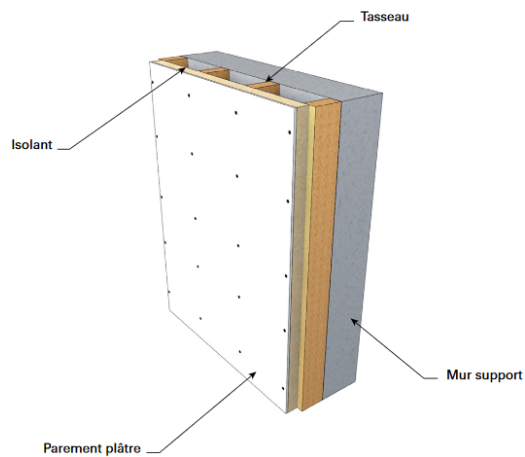
#### Configuration 1 : plaques d'isolants collées



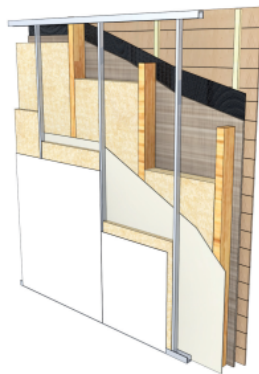
#### Configuration 2 : isolant fixé mécaniquement sur des tasseaux en bois



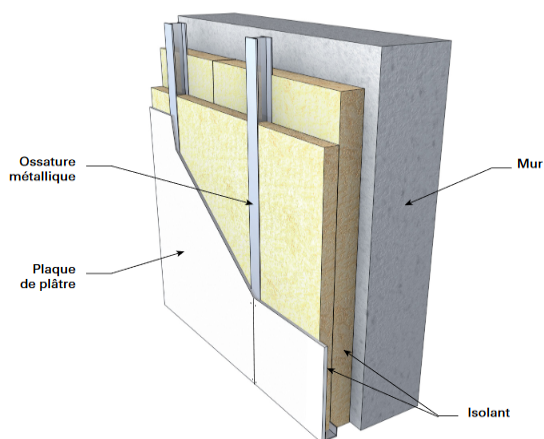




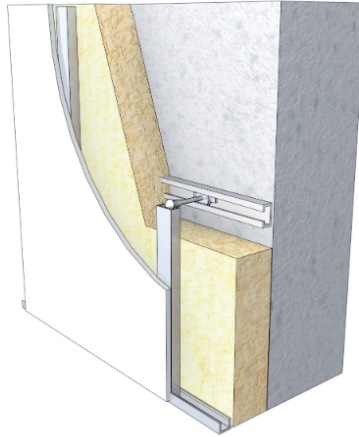
**Configuration 3 : complément d'isolation par doublage en plaque sur ossature métallique**



**Configuration 4 : isolant en contre-cloison sur ossature métallique sans appui intermédiaires avec deux couches d'isolants**



**Configuration 5 : isolant en contre-cloison sur ossature métallique avec appui intermédiaire sur rails métallique.**



Le CSTB propose, pour des caractéristiques de construction standard, des simulations numériques de conductivité thermique pour des murs composés de couches de différentes épaisseurs et de conductivité thermiques données.

L'exemple en Figure 23 représente une extrapolation des conductivités thermique de murs avec des épaisseurs d'isolants allant de 10cm à 100cm. La conductivité thermique équivalente de l'isolant modélisé vaut  $0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Les hypothèses de constructions respectent les « règles de l'art » pour les techniques de constructions simulées suivant les 5 configurations présentées ci-dessus.



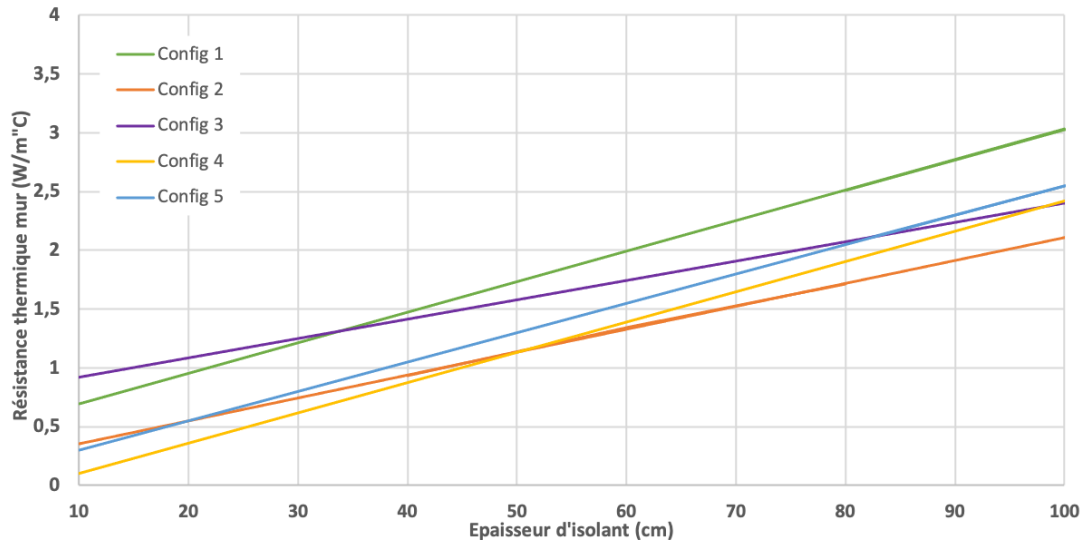


Figure 23 : Coefficient de conductivité thermique d'un mur type en fonction de l'épaisseur d'isolants pour les 5 configurations principales d'ITI

Il est possible d'observer sur la Figure 23 que pour des épaisseurs d'isolants équivalentes, certaines configurations permettent d'obtenir de meilleures performances thermiques : par exemple, la configuration 3 (doublage en plaque sur ossature métallique) pour des épaisseurs inférieures à 30cm ou bien la configuration 1 (plaques d'isolants collées) pour des épaisseurs supérieures à 40cm.

Il est important de préciser que la nature du matériau utilisable peut varier selon les différentes configurations. Par exemple, dans le cas d'une contre-cloison sur ossature métallique, l'isolant employé peut-être souple alors que, dans les configurations collées et vissés, l'isolant doit se présenter sous forme de plaques rigides. Ces différences ont des impacts sur les propriétés, hygrométriques, acoustiques et de durée de vie du composant. Il est donc judicieux de choisir la technique d'ITI en tentant aussi compte des propriétés des matériaux.

### Focus sur la rénovation :

Dans le cadre de la rénovation le choix de la pose d'un isolant n'est pas systématique et absolu. C'est une démarche qui s'étudie au cas par cas en fonction des atouts et des faiblesses du bâtiment. La décision finale doit reposer sur des critères thermiques, économiques, architecturaux mais aussi hygrométriques. En effet la perméabilité à la vapeur d'eau des parois joue un rôle très important pour la pérennité de l'installation. Par exemple, dans le bâti ancien, les enduits ou les jointements avec des matériaux hydrofuges sont à proscrire. Il est préférable d'installer des matériaux plus adaptés, comme les enduits à base chaux qui sont bien plus perméables.



Dans le cadre de leurs études, le CSTB conclut sur l'isolation par l'intérieur [20] :

- La condensation sur la surface intérieure du mur maçonné ou en béton est difficilement évitable, d'autant plus si l'isolation est faite par l'intérieur.
- Dans certaines circonstances, la condensation peut aussi se produire dans ou contre l'épaisseur de l'isolant

Par ailleurs, pour garantir un bon fonctionnement thermo hydrique sur le long terme, il est préférable de contrôler ce phénomène. Dans l'idéal, la condensation de doit pas se faire au contact de l'isolant. Au contact du mur, elle doit également être contrôlé et non dommageable dans le temps.

Pour forcer la condensation sur la surface intérieure du mur, il est possible de jouer sur l'épaisseur d'isolant pour essayer d'adapter la température de paroi et sur la résistance à la diffusion a la vapeur des matériaux. Les freins vapeur et les pares vapeur peuvent être de bons outils. Compte tenu du sens de progression du flux de vapeur d'eau, de l'intérieur vers l'extérieur, il est conseillé d'installer des matériaux qui de l'intérieur vers l'extérieur soient de plus en plus perméable. Le flux étant orienté dans ce sens, c'est un moyen de s'assurer qu'il ne rencontre pas de résistance sur son passage.

L'article de Magrini et al. propose une méthode d'étude pour évaluer les solutions intégrées les plus appropriées pour améliorer la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment tout en évitant les problèmes d'humidité [53].

## 2.2 ISOLATION PAR L'EXTERIEUR

Par opposition avec l'isolation par l'intérieur, l'isolation par l'extérieur (ITE) consiste à appliquer l'isolation sur la coté extérieur du mur. Les principaux avantages de ce procédé sont la possibilité de réaliser les travaux sans déranger le mode de vie des occupants et le maintien de l'inertie thermique du bâtiment.

En revanche, recourir à une ITE est souvent plus couteux qu'une ITI et entraine des modifications sur l'apparence du bâtiment. Ce dernier point peut être problématique pour un bâtiment historique.

Dans sa thèse, Bendouma [54] détaille les différentes techniques d'isolation par l'extérieur. Globalement il existe trois grands procédés détaillés ci-dessous et illustrés à la Figure 24 :

- L'isolation sous enduit (cas 1 et 2) : elle est réalisée à partir d'un isolant rigide (polystyrène, laine minérale ou végétales...) collé, plaqué ou fixé mécaniquement a la paroi. L'enduit doit pouvoir protéger l'isolant des intempéries.



- L'isolation sous bardage (cas 3 et 4) : Un système de tasseaux permet de soutenir l'isolant coté mur et le bardage coté extérieur. La lame d'air entre l'isolant et le bardage crée un espace tampon qui limite généralement l'impact du climat extérieur sur le mur.
- L'isolation sous vêtture ou vêtage (cas 5 et 6) : C'est une solution entre l'isolation sous enduit et l'isolation sous bardage. Les panneaux sont fixés mécaniquement sur le mur. Le parement qui protège l'isolant peut apporter une lame d'air.

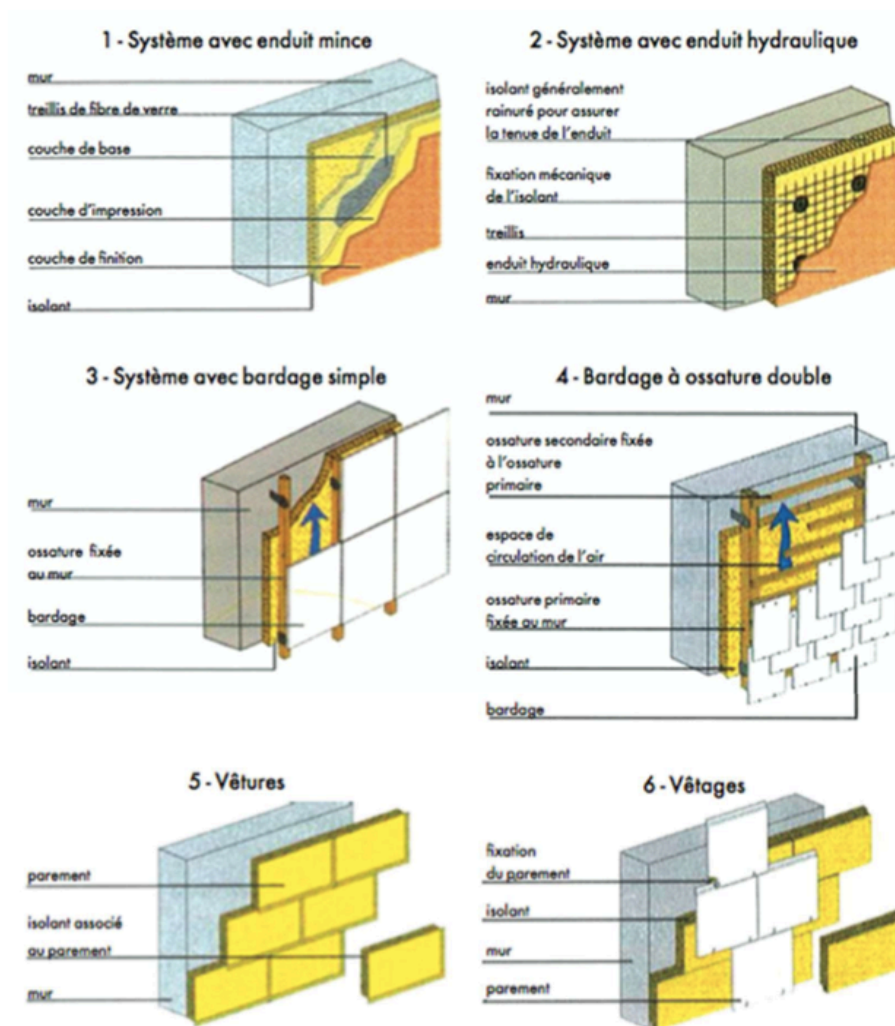


Figure 24 : Illustration des différentes techniques d'isolation par l'extérieur selon Bendouma [54]

Les règles de l'art pour encadrer la conception et assurer la bonne mise en œuvre de ce processus sont décrites dans différents documents, traités par plusieurs organismes : par exemple le CSTB [55], la norme NF DTU 31.2 [56] et les deux guides RAGE [57], [58].



La principale différence de performance de ces procédés se situe au niveau des ponts thermiques intégrés dus aux différences structurelles. Plusieurs documents de la littérature évoquent ce domaine [59], [60]. En effet, selon le type de techniques, l'isolant peut être collé, transpercé par des chevilles ou soutenu par des équerres ce qui peut générer des déperditions ponctuelles ou linéiques non souhaitées.

### **Collage**

Dans ce cas, il n'y a pas de rupture de l'isolant. Bien que la paroi ne puisse pas bénéficier des avantages d'une lame d'air, il n'y a pas de ponts thermiques intégrés.

### **Équerres.**

Ce sont des éléments en métal qui traversent l'isolant de part en part et qui servent à relier le mur au bardage. La rupture de la continuité du matériau isolant sur la hauteur du mur peut créer une dégradation thermique (voir Figure 25) de la paroi de près de 50% dans certains cas [60].

Il existe des rupteurs de ponts spécifiques afin d'en limiter l'impact : ce sont des cales en plastiques qui se placent entre le mur et l'équerre.

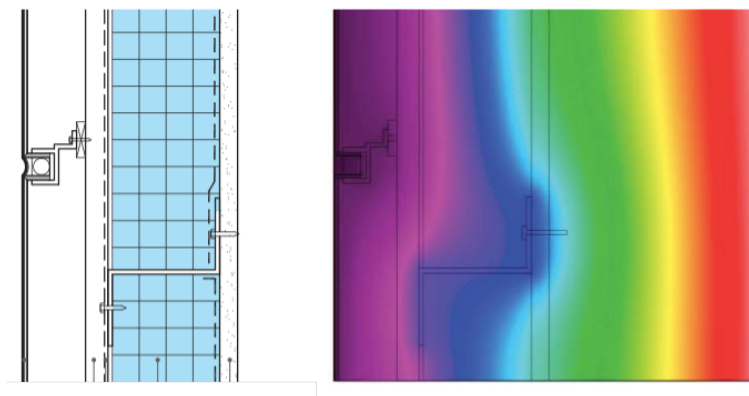


Figure 25 : Représentation d'un pont thermique intégré due aux équerres en ITE

### **Chevilles**

Les chevilles sont des éléments traversant la structure. Elles créent donc une déperdition thermique ponctuelle qui, pondérée par le nombre d'éléments, peut créer un affaiblissement global des propriétés du mur. La Figure 26 illustre ce type de ponts thermiques.

En fonction du matériau utilisé, par exemple le métal ou le plastique, cette technique peut avoir plus ou moins d'efficacité thermique.



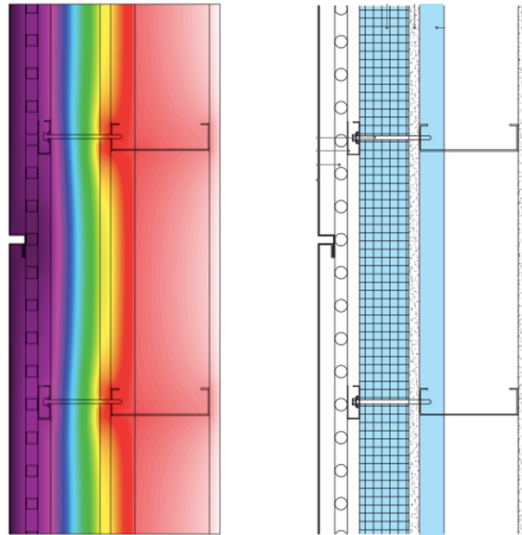


Figure 26 : Exemple de représentation pont thermique intégré due aux chevilles en ITE

### Focus sur la rénovation :

L'isolation par l'extérieur permet de traiter plus efficacement la protection au gel, à la pluie et à la migration des flux thermiques et hydrique, de ce point de vue c'est une technique qui protège mieux le bâti existant

En effet, de manière générale, la gestion des flux de vapeur n'est pas un problème dans le cas de la pose d'un isolant en extérieur. Ceci est particulièrement vrai dans le cas d'une utilisation d'un isolant perméable et d'un enduit capillaire. La règle d'ouverture de la diffusion à la vapeur des matériaux de l'intérieur vers l'extérieur est respecté.

## 2.3 MENUISERIES

Les menuiseries affectent l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments de 4 manières différentes : les transferts thermiques classiques, les gains solaires, les infiltrations ou interaction avec la ventilation et le besoin d'éclairage. De ce fait, pour améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment, les menuiseries doivent répondre à plusieurs objectifs [22]:

- Les matériaux du verre et du cadre doivent permettre de réduire les pertes thermiques.
- Les technologies du vitrage et des protections solaires doivent permettre de capter le rayonnement solaire en hiver, de s'en protéger en été et de maximiser l'éclairage naturel toute l'année ; dans l'objectif d'optimiser les besoins d'éclairage, de chauffage et de climatisation.
- Les infiltrations, exceptées pour les bouches d'entrées d'air, doivent être les plus faibles possibles.



Les différents domaines étant liés, modifier un paramètre pourra avoir un impact sur plusieurs domaines. Par exemple, modifier les protections solaires pour réduire les apports thermiques permettra une réduction des consommations de climatisation mais risque d'augmenter les besoins d'éclairage.

Cette partie est consacrée à l'étude des différentes grandeurs pouvant modifier ces paramètres.

### 2.3.1 ECHANGES THERMIQUES D'UNE FENETRE

Les performances thermiques en conduction et en convection s'étudient de la même façon que l'isolation d'un mur. C'est le coefficient de transfert thermique U qui décrit la capacité d'une menuiserie à conduire la chaleur pour une différence théorique de température de 1°C (W/m²K). La valeur totale de U correspond aux valeurs des différents composants d'une fenêtre, pondérés par leurs surfaces respectives. Les différents éléments sont schématisés en Figure 27.

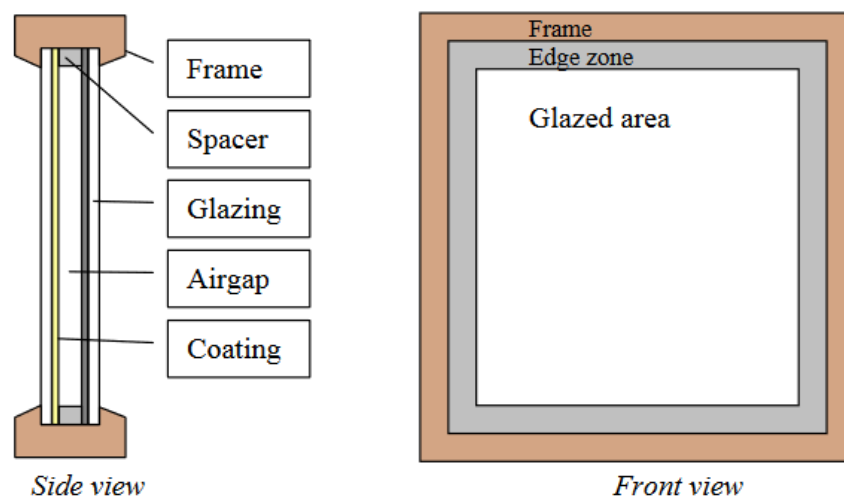


Figure 27 : Représentation des différents composants d'une fenêtre

Il est également possible de considérer la transmissivité thermique du cadre comme un pont thermique linéaire. A titre d'exemple, les valeurs classiques des coefficients U sont présentées dans le Tableau 4 pour les différents types de vitrages [61], [62].

$$\begin{aligned}
 U_{tot} &= \frac{U_{verre}S_{verre} + U_{cadre}S_{cadre} + U_{appui}S_{appui}}{S_{tot}} = \\
 &= \frac{U_{verre}S_{verre} + U_{cadre}S_{cadre} + \psi \cdot L}{S_{tot}}
 \end{aligned}$$





Tableau 4 : Valeurs classiques de coefficient de transferts thermique des baies en fonction du type de vitrage.

| Composition de la menuiserie                     | $U_{\text{glass}}$ (W/m <sup>2</sup> K) |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Menuiserie verre simple vitrage                  | 5.8-5.9                                 |
| Ancienne menuiserie double vitrage a lame d'air. | 2.8-3.0                                 |
| Menuiserie double vitrage avec lame gaz rare.    | 1.0-2.0                                 |
| Menuiserie triple vitrage avec lame gaz rare.    | 0.9-1.0                                 |

La Figure 28 compare des coefficients de transferts des menuiseries en fonction du type de gaz dans la lame d'air pour des émissivités basses et normales [22]. La configuration thermique la plus avantageuse ici pour réduire le transfert de chaleur est un gaz krypton couplé avec un revêtement à faible émissivité. La partie 2.3.2 traite plus en détail de la notion de gain d'efficacité lié à l'émissivité.

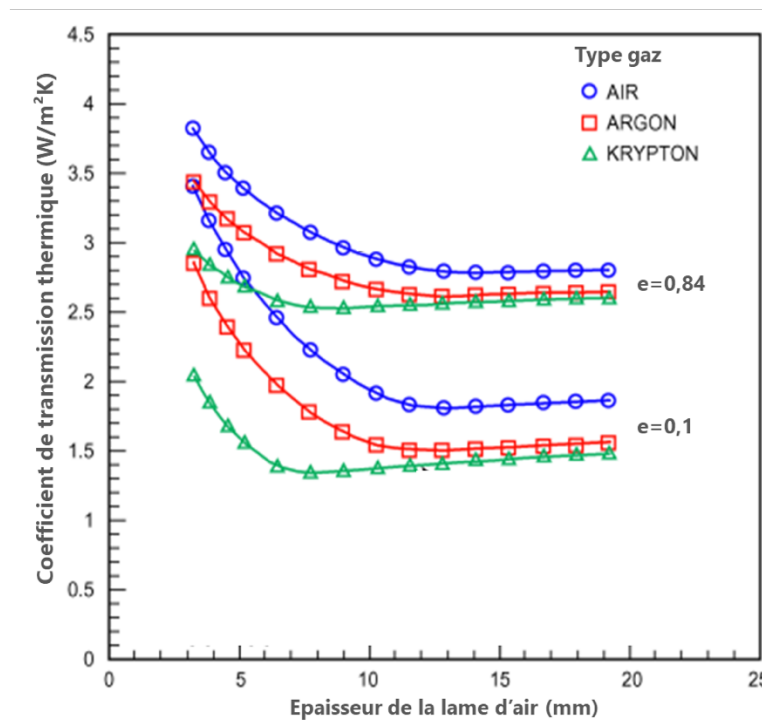


Figure 28 : Comparaison des coefficients de transferts du vitrage en fonction du type de gaz dans la lame d'air pour des émissivités basses et normales



Les valeurs des coefficients U présentés dans le Tableau 4 ne sont pas uniques. En effet, les matériaux de construction des cadres, les épaisseurs vitrages/lame d'air et les proportions cadre/vitrage peuvent être variables. En ce qui concerne les matériaux de fabrication, le Tableau 5 détaille les avantages et les inconvénients de chaque type de technologie [63]. Les arguments de comparaisons relatif à l'impact environnemental des cadres des menuiseries découlent de l'article de Asif et al. [64]

Le

Tableau 6 résume les caractéristiques d'efficacités thermiques en fonction du type de menuiserie, de vitrage et de gaz dans la lame d'air tel qu'elles sont répertoriées par l'ASHRAE [22].

Tableau 5 : Comparaison des matériaux de construction des cadres de menuiseries




| Bois                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Aluminium                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | PVC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Isolation thermique</li> <li>• Isolation acoustique</li> <li>• Grande disponibilité</li> <li>• Impacts environnementaux lors de la fabrication moins importants [64]</li> </ul> <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistance au feu</li> <li>• Hygroscopicité</li> <li>• Maintenance</li> </ul> |  <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durabilité</li> <li>• Résistances aux conditions météorologiques</li> </ul> <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvaise isolation acoustique</li> <li>• Mauvaise isolation thermique : nécessité de mise en place de rupteurs de ponts thermique dans la structure interne du cadre</li> </ul> |  <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Isolation thermique</li> <li>• Isolation acoustique</li> </ul> <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvaise durabilité au soleil.</li> <li>• Fragilité du plastique</li> <li>• Faible durée de vie</li> </ul> |



Tableau 6 : Tableau récapitulatif des coefficients de conductivité des menuiseries en fonction du type de matériaux, de gaz et de l'émissivité du vitrage ( $W/(m^2.K)$ ) [22]

| Type de menuiserie       | Bois | PVC  | Métallique sans rupteur de Pth | Métallique avec rupteur de Pth |
|--------------------------|------|------|--------------------------------|--------------------------------|
| Simple                   | 4,2  | 3,9  | 4,95                           | -                              |
| Survitrage               | 2,9  | 2,75 | 3,8                            | --                             |
| 4/12/4                   | 2,55 | 2,35 | 3,6                            | 2,9                            |
| 4/12/4 peu émissif       | 2    | 2,83 | 3,04                           | 2,34                           |
| 4/16/4                   | 2,4  | 2,3  | 3,6                            | 2,9                            |
| 4/16/4 peu émissif       | 1,75 | 1,70 | 2,95                           | 2,25                           |
| 4/16/4 argon peu émissif | 1,6  | 1,55 | 2,8                            | 2,1                            |
| Double fenêtre           | 2,3  | NC   | NC                             | NC                             |

### 2.3.2 IMPACT SOLAIRE : FACTEUR SOLAIRE, EMISSIVITE ET PROTECTION SOLAIRE D'UNE MENUISERIE

Nous avons vu précédemment que l'irradiation solaire peut avoir un impact sur les apports thermiques du bâtiment. Les rayons directs du soleil qui traversent le vitrage réchauffent les occupants et les murs de la pièce. C'est la part de rayonnement transmis.

Le facteur solaire, noté  $g$  exprime la part d'énergie solaire transmise par le vitrage. Compris entre 0 et 1, ce coefficient correspond à la somme du rayonnement transmis et du rayonnement absorbé puis retransmis vers l'intérieur par le vitrage, le tout ramené à l'irradiation totale. Plus  $g$  est proche de 0, plus la protection contre la surchauffe estivale est grande. Plusieurs articles de la littérature s'intéressent à l'impact de ce coefficient sur les consommations énergétiques/au confort d'été [65], [66] et montrent qu'il est important de trouver un juste milieu entre les apports thermiques qui limitent les consommations de chauffages et ceux qui augmentent les consommations de climatisation ou qui dégradent le confort estival.

Les menuiseries à haut rendement, à isolation renforcée ou à basse émissivité font référence aux vitrages disposant d'un film métallique sur le verre. De la même manière qu'un miroir thermique, la surface en question réfléchit la plupart du rayonnement solaire tout en laissant passer la lumière. Il existe différentes technologies de films basse émissivité pouvant améliorer l'efficacité énergétique des fenêtres jusqu'à 17% [62]. L'inconvénient des revêtements à faible émissivité est lié à la réduction des apports solaires (en hiver) qui devront alors être compensés par le système de chauffage existant.



La quantité de rayonnement solaire visible transmise par le vitrage est caractérisée par le facteur de transmission lumineuse  $TL$ . Le facteur de transmission lumineuse doit idéalement être élevé, cependant il est très lié à la valeur de  $g$ . Il est donc important de trouver un juste milieu pour optimiser les caractéristiques des vitrages :

- Par exemple en hiver, l'objectif est de maximiser les gains solaires, donc avoir une transparence maximale au rayonnement solaire ( $TL$  et  $g$  élevés).
- En été, pour limiter les surchauffes, les gains de chaleurs doivent être faibles (donc  $g$  faible) tout en garantissant un éclairage suffisant pour limiter les consommations liées à l'éclairage artificiel ( $TL$  élevé).

Par ailleurs, toutes les combinaisons  $TL$  et  $g$  ne sont pas possibles : D'un côté, une trop faible transmission lumineuse n'est pas souhaitable car elle implique le recours trop fréquent à l'éclairage artificiel. De l'autre, il existe une limite aux matériaux de fabrication des menuiseries combinant fort  $TL$  et faibles  $g$ . Sbar et al. proposent une analyse des performances énergétiques et environnementales de bâtiments tertiaires en fonction de différentes combinaisons de vitrages [67].

La protection solaire elle-même, permet d'adapter le coefficient  $g$  en fonction de la saison ou de la période de la journée. Prendre en compte la hauteur du soleil dans le ciel en fonction de la saison, l'ombre portée de la végétation ou encore la gestion de masques mobiles permet de dimensionner différemment un vitrage. En effet, un vitrage clair permet de bénéficier en hiver des apports thermiques du soleil alors que les protections mises en œuvre en été permettront d'abaisser le facteur solaire et limiter les surchauffes. Manzano-Agugliaro et al [34] évoquent notamment ce sujet dans leur guide de stratégies pour la conception architecturale bioclimatique (voir Figure 29).



Figure 29 : Représentation du fonctionnement des protections solaires saisonnières [34]



### 2.3.3 RENOVATION DES MENUISERIES

Dans le cadre des rénovations, il est possible de remplacer les menuiseries pour améliorer l'efficacité thermique, l'efficacité énergétique ou encore la qualité des ambiances intérieures. Comme par exemple les objectifs d'affaiblissement acoustique des façades en fonction du type de vitrage [68].

En fonction des objectifs de résultats et de l'état initial du bâtiment il existe plusieurs procédures d'interventions possible en rénovation [57] :

- **Le remplacement complet de la menuiserie** : C'est la solution la plus facile à mettre en œuvre et qui assure les meilleures performances et au niveau des infiltrations et de la gestion énergétique. Un remplacement n'est pas toujours possible pour les bâtiments classés.
- **Le remplacement des vitrages** : C'est une solution qui permet de conserver les ouvrants et les dormants existants. Ces éléments doivent donc être aptes à accueillir un double vitrage (contraintes géométriques et structurelles). Une attention particulière devra également être portée à la gestion des infiltrations et de l'humidité dans les éléments qui seront conservés.
- **La pose d'une double fenêtre par l'intérieur** : Cette solution consiste à installer une deuxième fenêtre dans la partie intérieure du bâtiment. Cette solution est particulièrement aux contraintes de classement au patrimoine, en effet l'apparence extérieure du bâtiment reste donc inchangée. Un gain important de confort acoustique est aussi notable. Spécialement sur les bruits aériens.  
Les différentes techniques de mise en œuvre font l'objet d'un document spécifique du programme RAGE [69]. Les avantages et les inconvénients de chaque technique y sont comparés. La gestion de la ventilation doit être étudié en détail. Elle peut devenir problématique si les entrées d'airs sont mal dimensionnés.
- **Installation d'une nouvelle menuiserie sur le dormant existant** : C'est la solution priorisée dans les cas où il n'est pas possible d'extraire les dormants des maçonneries existantes. De nouvelles menuiseries sont donc adaptés aux cadres existants. Ce type de technologie comporte néanmoins des inconvénients. Par exemple la réduction de la surface de vitrage ou encore l'apparition d'un pont thermique, et du risque de condensation associé entre les deux dormants.

## 2.4 COMPARAISON DES PRINCIPAUX MATERIAUX

Nous venons d'étudier dans cette dernière partie les différentes techniques disponibles dans le cadre de travaux de rénovation. Dans le cas de l'isolation, il est important de préciser que tous les types de matériaux ne se prêtent pas à toutes les techniques de poses. Par exemple, des rouleaux d'isolants en laines minérales ou végétales ne seront pas adaptés



dans le cas d'une isolation par l'extérieur. L'installateur aura alors tendance à privilégier des isolants rigides qui ont une meilleure tenue dans le temps.

L'enjeu technique pour réussir l'opération de rénovation des parois revient donc à trouver le meilleur compromis entre les matériaux et les techniques associées pour obtenir les meilleures caractéristiques sur le plan de la thermique de l'hygrométrie, du confort thermique, de l'analyse de cycle de vie...

Pour cela il est possible d'étudier les performances propres des matériaux indépendamment les uns des autres [70]–[72]. Nous présentons une vision synthétique des performances des isolants et enduits selon plusieurs critères, basée sur les données des références bibliographiques [70]–[72]. Les 2 tableaux ci-dessous rassemblent les caractéristiques techniques pour les principaux isolants et enduits. Les **Erreur ! Source du r envoi introuvable.**, Figure 33 et Figure 34 sont des diagrammes représentant les performances environnementales des différents matériaux.

Tableaux isolants et enduits : Pour obtenir des à résistance thermique équivalente, les matériaux en fibre naturelle doivent avoir des épaisseurs plus importantes. Les performances d'isolations thermiques sont donc moindres par rapport aux isolants synthétiques. A l'inverse, les propriétés d'inertie thermiques ( $\rho C_p$ ) sont bien meilleures et permettent de lisser les pics de chaleurs l'été. Par exemple  $260 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  pour le mélange chaux chanvre contre  $6,2 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  pour les panneaux de laine de verre.

En Figure 30, on note que l'énergie grise des panneaux rigides en fibres de bois est près de deux fois plus importante que pour les autres isolants (y compris en polystyrène expansé ou en laine de roche) mais présente un impact sur l'effet de serre pratiquement neutre. Ceci peut s'expliquer par la complexité du processus de fabrication. Le défibrage et la grande quantité de vapeur peut être une explication à cette différence[73].

En Figure 31 : l'enduit synthétique présente le meilleur profil pour l'énergie grise et l'impact sur l'effet de serre. Cependant, il faut étudier le profil environnemental complet avant d'opter définitivement pour un matériau. Les propriétés thermo hydriques des enduits auront également un impact sur le comportement de l'intégralité du mur

Le manuscrit de Thèse de Samri[17] a pour objet l'analyse physique et la caractérisation hygrothermique des matériaux de construction, par une approche expérimentale et par la modélisation numérique. Les résultats de ses travaux de recherche permettent de mieux analyser les tableaux des caractéristiques de matériaux. En ce qui concerne les bio-sourcés et plus particulièrement les enduits et les bétons de chanvre, le fonctionnement thermohydrique est très différent des autres matériaux. Les transferts d'humidités et les changements de phases de la vapeur d'eau contenue dans les pores sont responsables de



ces différences. L'évaporation (augmentation de HR) ou la condensation (chute de HR) étant des phénomènes endothermiques ou exothermiques, le recours à ces matériaux peut aider à la régulation d'une température de confort de manière passive. Couplés à des enduits classiques, plus ou moins perméables, il est possible de « filtrer » ces transferts de masses et donc maîtriser la chaleur latente en fonction du climat et des besoins des occupants.

Choisir des matériaux pour une composition d'une paroi est donc une action complexe qui aura une incidence directe sur les besoins de consommation des systèmes et sur le confort thermique des occupants. Bien que peu de logiciels de simulations soient capables de modéliser correctement les interactions thermiques et hydriques en même temps, le calcul numérique reste un excellent moyen d'estimer les résultats d'une composition de paroi. Woloszyn et al. propose dans son article une review et un comparatif des logiciels et modules existants dans le domaine [74].



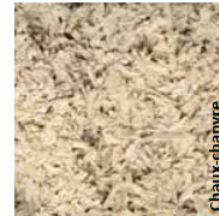
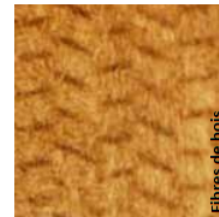
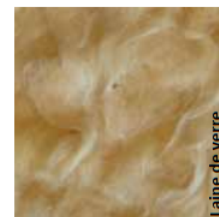


## 2.4.1 LES ISOLANTS

Tableau 7 : Comparaison des propriétés des principaux matériaux d'isolation [70]

| Densité<br>p<br>kg/m <sup>3</sup>           | Épaisseur<br>d<br>m | Masse<br>par m <sup>2</sup><br>kg/m <sup>2</sup> | Isolation |            | Inertie                   |                                                    |                                                  | Humidité   |                                         |                         | Inertie                    |             | Humidité     |      |
|---------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-----------|------------|---------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------|--------------|------|
|                                             |                     |                                                  | λ<br>W/mK | α<br>J/kgK | ρC<br>kJ/m <sup>2</sup> K | Diffusivité<br>10 <sup>-7</sup> ·m <sup>2</sup> /s | Effusivité<br>J/m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup> | μ sec<br>/ | A<br>kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> | U<br>W/m <sup>2</sup> K | dpC<br>kJ/m <sup>2</sup> K | μd sec<br>m | μd hum.<br>m |      |
| <b>ISOLANTS A BASE MINERALE</b>             |                     |                                                  |           |            |                           |                                                    |                                                  |            |                                         |                         |                            |             |              |      |
|                                             |                     |                                                  | 0,035     | 1030       | 103,00                    | 0,34                                               | 60,04                                            | 2          | 1                                       | [0]                     | 0,292                      | 12,36       | 0,24         | 0,12 |
|                                             |                     |                                                  | 0,035     | 1030       | 51,50                     | 0,68                                               | 42,46                                            | 2          | 1                                       | [0]                     | 0,292                      | 6,18        | 0,24         | 0,12 |
|                                             |                     |                                                  | 0,040     | 1000       | 110,00                    | 0,36                                               | 66,33                                            | [∞]        | [∞]                                     | [0]                     | 0,286                      | 15,40       | [∞]          | [∞]  |
|                                             |                     |                                                  | 0,070     | 1000       | 270,00                    | 0,26                                               | 137,48                                           | 3          | 1                                       | 1,2                     | 0,280                      | 67,50       | 0,75         | 0,25 |
| <b>ISOLANTS A BASE SYNTHETIQUE</b>          |                     |                                                  |           |            |                           |                                                    |                                                  |            |                                         |                         |                            |             |              |      |
|                                             |                     |                                                  | 0,035     | 1450       | 36,25                     | 0,97                                               | 35,62                                            | 100        | 40                                      | [0]                     | 0,292                      | 4,35        | 12,00        | 4,80 |
|                                             |                     |                                                  | 0,032     | 1450       | 55,10                     | 0,58                                               | 41,99                                            | 200        | 80                                      | [0]                     | 0,291                      | 6,06        | 22,00        | 8,80 |
|                                             |                     |                                                  | 0,023     | 1400       | 42,00                     | 0,55                                               | 31,08                                            | 100        | 30                                      | [0]                     | 0,288                      | 3,36        | 8,00         | 2,40 |
| <b>ISOLANTS A BASE DE FIBRES NATURELLES</b> |                     |                                                  |           |            |                           |                                                    |                                                  |            |                                         |                         |                            |             |              |      |
|                                             |                     |                                                  | 0,041     | 2150       | 86,00                     | 0,48                                               | 59,38                                            | 2          | 1                                       | 0,3                     | 0,293                      | 12,04       | 0,28         | 0,14 |
|                                             |                     |                                                  | 0,040     | 2150       | 107,50                    | 0,37                                               | 65,57                                            | 2          | 1                                       | 0,3                     | 0,286                      | 15,05       | 0,28         | 0,14 |
|                                             |                     |                                                  | 0,038     | 2100       | 157,50                    | 0,24                                               | 77,36                                            | 5          | 3                                       |                         | 0,292                      | 20,48       | 0,65         | 0,39 |
|                                             |                     |                                                  | 0,040     | 2100       | 386,00                    | 0,12                                               | 115,93                                           | 5          | 3                                       | 0,007                   | 0,286                      | 47,04       | 0,70         | 0,42 |
|                                             |                     |                                                  | 0,040     | 1600       | 192,00                    | 0,21                                               | 87,64                                            | 30         | 5                                       | [0]                     | 0,286                      | 26,88       | 4,20         | 0,70 |
|                                             |                     |                                                  | 0,040     | 1600       | 48,00                     | 0,83                                               | 43,82                                            | 2          | 1                                       |                         | 0,286                      | 6,72        | 0,28         | 0,14 |
|                                             |                     |                                                  | 0,110     | 1560       | 686,40                    | 0,16                                               | 274,78                                           | 5          | 3                                       | 0,07                    | 0,289                      | 260,83      | 1,90         | 1,14 |

REMARQUES : Les isolants sont comparés à résistance thermique (R) équivalente. Les épaisseurs indiquées ont été calculées pour atteindre une résistance thermique supérieure ou égale à 3,5 m<sup>2</sup>K/W (idem sur les graphiques illustrant l'énergie grise et l'effet de serre). Attention, toutes les valeurs présentées dans ces tableaux sont données à titre indicatif. Vérifiez si le produit possède un marquage CE ou un agrément technique et référez-vous à la législation en vigueur.





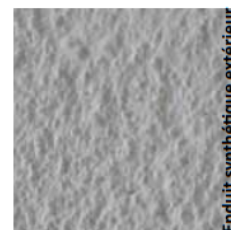
## 2.4.2 LES ENDUITS ET PLAQUES DE FINITION

Tableau 8 : Comparaison des propriétés des principaux matériaux de finition [70]

| intérieur                             |                     |                                  |           |             |                                                    |                                                  |                           |            |             |                                         |                         |                            |             |              |  |
|---------------------------------------|---------------------|----------------------------------|-----------|-------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|------------|-------------|-----------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------|--------------|--|
| Densité<br>p<br>kg/m <sup>3</sup>     | Epaisseur<br>d<br>m | Masse<br>par m <sup>2</sup><br>m | Isolation |             | Inertie                                            |                                                  |                           | Humidité   |             | Isolation                               |                         | Inertie                    |             | Humidité     |  |
|                                       |                     |                                  | λ<br>W/mK | ρC<br>J/kgK | Diffusivité<br>10 <sup>-7</sup> .m <sup>2</sup> /s | Effusivité<br>J/m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup> | pC<br>kJ/m <sup>2</sup> K | μ sec<br>/ | μ hum.<br>/ | A<br>kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> | U<br>W/m <sup>2</sup> K | dpC<br>kJ/m <sup>2</sup> K | μd sec<br>m | μd hum.<br>m |  |
| <b>ENDUITS INTERIEURS</b>             |                     |                                  |           |             |                                                    |                                                  |                           |            |             |                                         |                         |                            |             |              |  |
|                                       |                     |                                  | 0,52      | 1000        | 1300                                               | 0,40                                             | 822,19                    | 10         | 6           | 0,287                                   | 34,67                   | 19,50                      | 0,15        | 0,09         |  |
|                                       |                     |                                  | 0,73      | 1000        | 1800                                               | 0,41                                             | 1146,30                   | 10         | 5           |                                         | 48,67                   | 27,00                      | 0,15        | 0,08         |  |
|                                       |                     |                                  | 0,80      | 1000        | 1400                                               | 0,57                                             | 1058,30                   | 10         | 6           | 0,05                                    | 53,33                   | 21,00                      | 0,15        | 0,09         |  |
| <b>PLAQUES DE FINITION INTERIEURE</b> |                     |                                  |           |             |                                                    |                                                  |                           |            |             |                                         |                         |                            |             |              |  |
|                                       |                     |                                  | 0,25      | 1000        | 900                                                | 0,28                                             | 474,34                    | 10         | 4           | 0,287                                   | 20,00                   | 11,25                      | 0,13        | 0,05         |  |
|                                       |                     |                                  | 0,32      | 1100        | 1320                                               | 0,24                                             | 649,92                    | 19         | 5           |                                         | 25,60                   | 16,50                      | 0,24        | 0,06         |  |
|                                       |                     |                                  | 0,13      | 1700        | 850                                                | 0,15                                             | 332,42                    | 170-280*   | 0,002       |                                         | 8,67                    | 12,75                      | 2,55-4,2*   | 2,55-4,2*    |  |
|                                       |                     |                                  | 0,10      | 2100        | 1680                                               | 0,06                                             | 409,88                    | 60         | 20          |                                         | 5,56                    | 30,24                      | 1,08        | 0,36         |  |
|                                       |                     |                                  | 0,15      | 1600        | 960                                                | 0,16                                             | 379,47                    | 100        | 30          | 0,0004                                  | 6,82                    | 21,12                      | 2,20        | 0,66         |  |
| <b>extérieur</b>                      |                     |                                  |           |             |                                                    |                                                  |                           |            |             |                                         |                         |                            |             |              |  |
| Densité<br>p<br>kg/m <sup>3</sup>     | Epaisseur<br>d<br>m | Masse<br>par m <sup>2</sup><br>m | Isolation |             | Inertie                                            |                                                  |                           | Humidité   |             | Isolation                               |                         | Inertie                    |             | Humidité     |  |
|                                       |                     |                                  | λ<br>W/mK | ρC<br>J/kgK | Diffusivité<br>10 <sup>-7</sup> .m <sup>2</sup> /s | Effusivité<br>J/m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup> | pC<br>kJ/m <sup>2</sup> K | μ sec<br>/ | μ hum.<br>/ | A<br>kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> | U<br>W/m <sup>2</sup> K | dpC<br>kJ/m <sup>2</sup> K | μd sec<br>m | μd hum.<br>m |  |
| <b>ENDUITS DE FAÇADE</b>              |                     |                                  |           |             |                                                    |                                                  |                           |            |             |                                         |                         |                            |             |              |  |
|                                       |                     |                                  | 1,5       | 1000        | 1500                                               | 1,00                                             | 1500,00                   | 25-85*     | 0,008       | 150                                     | 15,00                   | 0,25-0,85*                 | 0,25-0,85*  | 0,25-0,85*   |  |
|                                       |                     |                                  | 1,4       | 1000        | 1500                                               | 0,93                                             | 1449,14                   | 10-30*     |             | 140                                     | 15,00                   | 0,1-0,3*                   | 0,1-0,3*    | 0,1-0,3*     |  |
|                                       |                     |                                  |           |             |                                                    |                                                  |                           | 170        | 171         |                                         |                         | 0,34                       | 0,34        | 0,34         |  |
|                                       |                     |                                  | 1,24      | 1000        | 1600                                               | 0,78                                             | 1408,55                   | 6-20*      | 0,05        | 124                                     | 16,00                   | 0,06-0,2*                  | 0,06-0,2*   | 0,06-0,2*    |  |



Briques sans finition extérieure



Enduit synthétique extérieur



Lambris en bois



Panneau OSB



Enduit intérieur à la chaux



Enduit intérieur à l'argile



## 2.4.3 IMPACT ENVIRONNEMENTAL PAR MATERIAUX

### Isolants

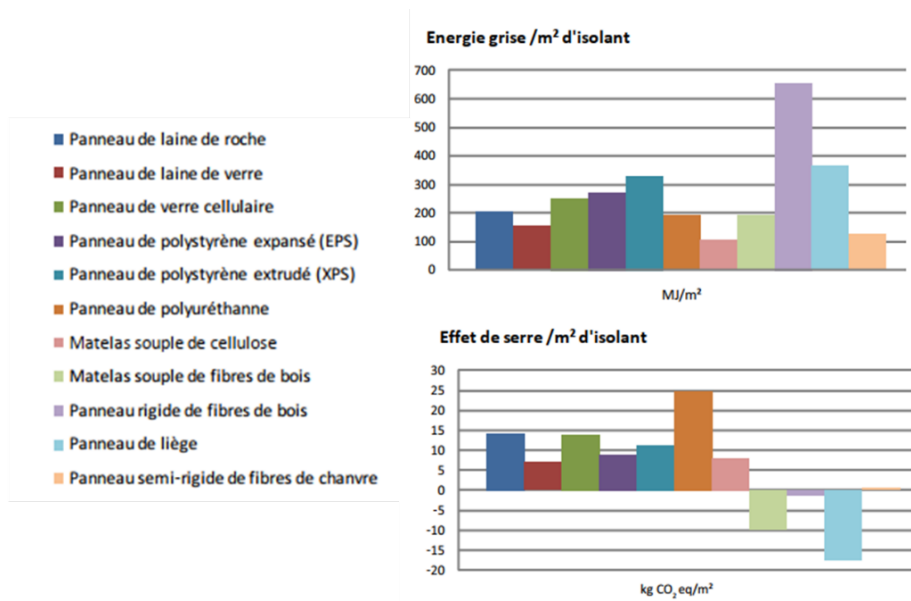


Figure 32 : Caractéristiques environnementales des principaux isolants [70]

### Enduits et plaques de finition intérieurs

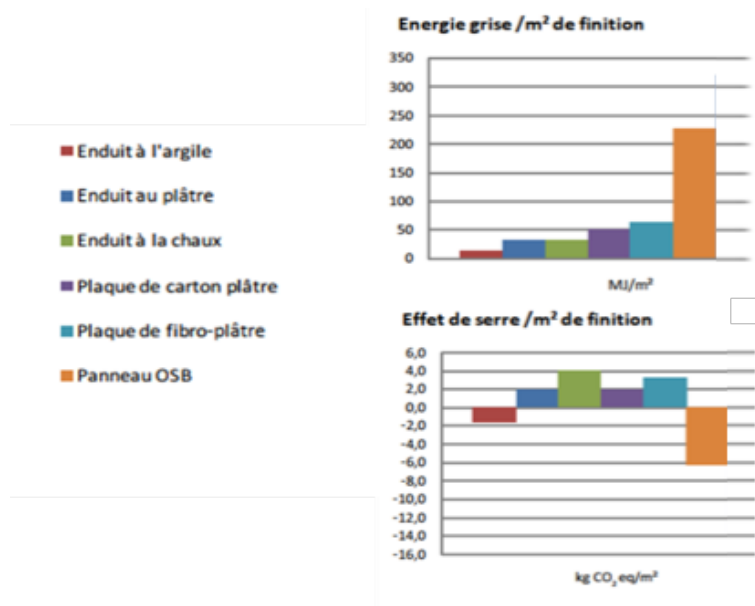


Figure 33 : Caractéristiques environnementales des enduits et plaques de finition intérieurs [70]



## Enduit extérieur

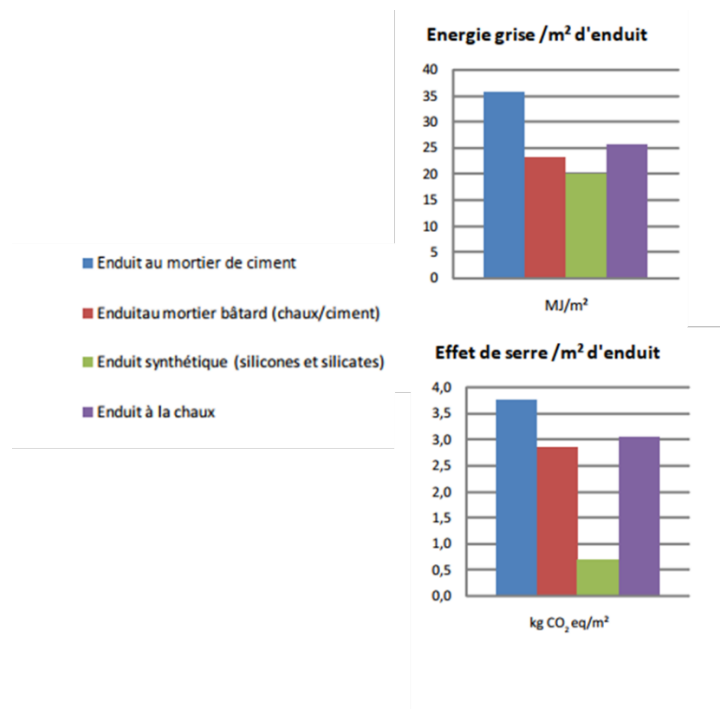


Figure 34 : Caractéristiques environnementales des enduits extérieurs [70]

En conclusion, le procédé de rénovation fait référence aux techniques d'amélioration des performances des parois et des systèmes. Ce chapitre, dédié aux performances des parois, compare sur différents critères les caractéristiques des méthodes et matériaux constitutifs. Modifier la constitution d'une façade, d'une toiture ou d'un plancher modifie les interactions entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment du point de vue thermique, hygrométrique, environnemental, acoustique, du confort et de la qualité de l'air. L'étude des différentes grandeurs et paramètres associés est utile pour choisir la solution la plus adaptée aux besoins d'un bâtiment. Il est important de préciser qu'une modification de l'enveloppe peut modifier les besoins des systèmes.

Par exemple, le remplacement des menuiseries peut modifier les infiltrations et entraîner une mauvaise gestion de l'humidité si elle n'est pas couplée à un remplacement de la ventilation. Ou encore, une isolation des parois sans adaptation du système de chauffage ou de sa régulation peut entraîner un surdimensionnement des équipements et un inconfort thermique.



## 3 ANNEXE 3 : LES SYSTEMES CVC

---

La rénovation d'un bâtiment ne se limite pas à l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment (isolation, menuiseries) mais doit aussi considérer les performances des systèmes associés au confort et à la qualité des ambiances, à savoir les systèmes de chauffage/climatisation et les systèmes de ventilation.

En effet, avant d'intervenir sur les systèmes pour chercher à améliorer leur efficacité il est important d'établir un diagnostic complet du bâtiment. En effet le bon fonctionnement d'une installation dépend des besoins du bâtiment, de la technologie et de l'état du système existant. C'est de cette façon qu'il est possible de proposer des solutions pour améliorer les consommations énergétiques [57].

### 3.1 SYSTEMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

L'objectif de cette partie est de détailler et comparer les systèmes de chauffage les plus communs utilisés en France afin d'orienter le type de rénovations envisageables. Plusieurs articles et livres de la bibliographie couvent ce sujet. [22], [75]–[78]

De manière générale, les systèmes de chauffage diffèrent de par leur source d'énergie, de la technologie ou de la méthode de transfert de chaleur. En fonction de l'emplacement du système de production, le système peut être qualifié local, central ou urbain. Par exemple dans le cas de Toulouse, le réseau de chaleur du quartier du Mirail est alimenté par la chaleur fatale issue de l'incinération des déchets [79], il s'agit donc d'un système urbain.

La plupart des systèmes de productions ont comme source d'énergie des combustibles solides, des combustibles gazeux, du gazole ou de l'électricité. Pour les systèmes de chauffage solaire, la principale source d'énergie est le rayonnement solaire. Le vecteur de transmission jusqu'au système d'émission est l'eau, l'air ou le courant électrique. La chaleur est alors transférée dans l'espace chauffé par convection, par rayonnement ou en distribuant de l'air chauffé dans toute la pièce [22].

Le choix d'un système de chauffage dépend des besoins de l'occupant et de la contrainte climatique à laquelle est soumis le bâtiment. Ce choix aura également un impact important sur le confort thermique des occupants et l'efficacité énergétique et environnementale du bâtiment. Différents articles proposent un classement et une comparaison des différents systèmes [75], [76] que nous détaillons ci-dessous.



### 3.1.1 CHAUFFAGE URBAIN

Le chauffage urbain est basé sur le principe de l'utilisation de combustible pour chauffer un réseau d'eau chaude souterrain. Les bâtiments raccordés à ce réseau peuvent alors utiliser cette chaleur pour couvrir leurs besoins en chauffage. La chaleur peut être obtenue à partir d'une centrale de cogénération utilisant des combustibles fossiles, des pompes à chaleur géothermiques ou de systèmes de chauffage solaire central. Ce type d'installation peut offrir un meilleur rendement et une meilleure maîtrise de la pollution que les chaudières individuelles. Dans le cas de Toulouse Métropole, les trois réseaux de chaleurs du Mirail, de Rangeuil et de Blagnac sont alimentés par un incinérateur de déchets, par des chaudières à biomasse, au gaz ou au fioul, ou encore via des réseaux géothermiques. [79]

L'Europe compte plus de 5000 réseaux de chaleurs urbains. Ils couvrent environ 10% de la demande énergétique actuelle. [75] En général, les systèmes de chauffage urbain sont plus difficiles à mettre en œuvre dans les zones semi-rurales et rurales que dans les zones très urbanisées. Pour que ce type de système soit viable, le tissu urbain doit être le plus dense possible pour limiter les pertes thermiques en ligne dans les conduites d'eau.

Les systèmes de chauffage urbain sont généralement exploités par des entreprises locales, ou des collectivités, qui proposent des tarifs différents en fonction du combustible utilisé, de la taille du système et des différents enjeux sociaux. La comparaison avec d'autres systèmes de chauffage peut donc varier.

Il est souvent plus avantageux, énergétiquement parlant, de centraliser le rendement de production pour pouvoir l'optimiser. De plus, du point de vue de la réhabilitation énergétique d'un quartier d'habitation, rénover le système de production de chaleur revient alors à intervenir sur une seule chaufferie

### 3.1.2 SYSTEMES DE CHAUFFAGES PONCTUELS

Les systèmes de chauffage locaux ne produisent de la chaleur que dans l'espace à chauffer. Ces systèmes sont adaptés aux petites surfaces. Ils présentent des avantages, tels qu'une installation rapide, un fonctionnement simple ou un faible coût initial. Toutefois, ils peuvent engendrer des problèmes d'uniformité de répartition thermique ou de fréquence d'entretien. Ils peuvent être difficiles à réguler avec précision lorsqu'ils sont nombreux dans un bâtiment. Les systèmes de chauffage locaux les plus connus et les plus répandus sont détaillés dans la partie suivante et comparés au Tableau 9. Ils découlent de la synthèse bibliographique de différents travaux [22], [75]–[77], [80].

#### **Cheminée à foyer ouvert**



Les foyers ouverts sont des appareils de chauffage domestique à faible rendement : 20 % au maximum. La plupart de la chaleur est évacuée avec les fumées via la cheminée. Dans le cas des foyers modernes, des modifications de conception et de fonctionnement permettent d'améliorer légèrement leur efficacité. La plupart de la chaleur est donc transmise à l'ambiance de manière radiative.

Du point de vue de la qualité de l'air ce type de systèmes engendre la diffusion de nombreux polluants dans l'espace de vie.

Ces systèmes de chauffage ne sont aujourd'hui plus commercialisés en raison de leur faible rendement de fonctionnement. On les retrouve généralement dans les logements individuels déjà existants. Le chauffage par mode de transfert de chaleur en rayonnement 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 granulés 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.

### **Cheminée avec chambre de circulation d'air ambiant**

L'efficacité d'un foyer ouvert peut être grandement améliorée en installant une chambre de circulation d'air. L'air froid de la pièce passe par les entrées de la chambre de combustion, circule derrière le foyer et revient chaud dans la pièce d'habitation. Lorsqu'elles sont équipées de portes vitrées hermétiques et d'un ventilateur pour forcer la convection de l'air, ces cheminées augmentent leur efficacité jusqu'à 30-40%. L'air ambiant peut également être réchauffé à l'aide de convecteurs sous la grille du foyer ou des buches.

Ce type de système se présente également comme une cheminée à foyer ouvert. Dans le cadre d'une rénovation énergétique, le constat est similaire au paragraphe précédent. Le mauvais rendement de fonctionnement ne permet pas d'optimiser l'utilisation des ressources de chauffage. Dans la mesure du possible il sera toujours avantageux procéder un remplacement.

### **Foyer avec échangeur de chaleur intégré**

Un échangeur de chaleur interne eau-air monté dans le conduit des fumées pour absorber la chaleur fatale de la combustion. L'eau passe par l'échangeur et circule dans un réseau de tuyaux vers des radiateurs ou vers un système de chauffage au sol. Une autre alternative



est le couplage d'un échangeur de chaleur air-air avec un système de conduits par lequel l'air chaud est distribué vers les pièces de l'habitation.

Les cheminées avec échangeur de chaleur intégré peuvent avoir un rendement allant jusqu'à 70-80%

Ce type de système se présente cette fois ci comme une cheminée à foyer fermé. Bien que le rendement de fonctionnement soit nettement meilleur que pour un foyer ouvert, il existe la possibilité de l'améliorer. L'utilisation d'un poêle, qui mixe le mode de transfert de chaleur convectif et radiatif peut être plus confortable et mieux adapté aux enveloppes plus étanches et mieux isolés. De plus, à poids égal l'énergie contenue dans les pellets est plus importante.

### **Poêles à bois et à granulés**

Avec les débits de ventilation adaptés, les poêles à bois permettent d'atteindre des efficacités entre 75 et 85%. Le chargement manuel des buches entraîne souvent une régulation compliquée de la température d'ambiance intérieure. Elle crée ainsi des pics de température.

Les poêles à granulés sont plus efficaces, la qualité du combustible permet d'atteindre 85 à 90% de rendement. La régulation thermostatée et l'allumage automatique permettent également un meilleur confort thermique et réduisent les contraintes de rechargement. La plus faible production de cendres nécessite un entretien moins régulier. En revanche, ces poêles doivent être raccordés au réseau électrique pour faire fonctionner les auxiliaires d'alimentation de combustible, de régulation et de ventilation.

Comme la plupart des systèmes de chauffage au bois ou à biomasse, un local de stockage est nécessaire au stockage du combustible. La combustion du bois entraîne également des émissions de particules pouvant dégrader la qualité de l'air intérieur. Les émissions, causées principalement par une combustion incomplète, comprennent les particules (PM), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes de soufre (SOx), les oxydes d'azote (NOx)... ect. La conception des foyers fermés, spécialement les poêles à bois et à granulés permet une combustion plus efficace, et limite les émissions.

Dans le cadre des logements existant, il est plus courant de trouver des poêles a bois que des poêles a granulés. En effet, ces derniers sont relativement récents. Les poêles sont des systèmes de chauffages performants qui sont adaptés au remplacement de systèmes dans les maisons individuelles.

### **Convecteurs électriques**





Les systèmes de type chauffage électrique, convertissent le courant électrique en chaleur par effet joule. Il existe différents types de convecteurs électriques. Par exemple, les chauffages à inertie, permettent de stocker de la chaleur dans des briques d'argiles pour la restituer plus tard. Ceci permet notamment de limiter les appels de puissances et de limiter la facture électrique. Un thermostat permet de réguler les apports de chaleurs en fonction de la température ambiante. La répartition du mode de transfert de chaleur est environ 90% de convection et 10% de rayonnement. Le principal vecteur de réchauffement est donc l'air de la pièce.

Un autre type de chauffage électrique est le panneau rayonnant. De la même façon que précédemment, l'électricité est convertie en chaleur par effet joule. Des pièces métalliques sont chauffées à haute température pour réémettre le rayonnement infrarouge vers l'ambiance et les occupants. Ils ne chauffent donc pas directement l'air de l'air mais les surfaces en ligne de vue directe avec les éléments chauds. Ils sont généralement utilisés dans des locaux de très grande taille ou avec des besoins de chauffage non uniformes. Le vecteur de transmission de chaleur étant le rayonnement, si les surfaces chauffées ne sont pas isolées, l'efficacité énergétique diminue grandement.

Il existe également divers autres types de chauffages électriques, comme les chauffages infrarouges portables, des cheminées électriques ou encore le chauffage au sol. 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 cadre de la rénovation, les systèmes électriques muraux sont faciles à installer, performants 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 isolée.

Il est tout de même important de préciser que le rendement de conversion entre l'énergie primaire et finale de l'électricité est de 2,58 pour l'électricité. Il faut donc 2,58kWh pour produire 1 kWh. Les systèmes à base d'électricité ne sont donc pas les plus rentables. Pour nuancer ce propos, la forte part de nucléaire dans le mix électrique français engendre de faibles émissions carbonées pour l'utilisation de ce type d'énergie.

Procéder au remplacement des convecteurs électrique est un bon moyen de mieux maîtriser ses consommations énergétiques. Notamment dans le cas des appartements ne disposants pas de d'installation centralisées.





Les systèmes en plafonniers ou en planchers sont plus spécifiques et doivent être étudiés au cas par cas

## **Pompes à chaleur**

Les climatiseurs individuels sont des pompes à chaleur (PAC) air/air électriques qui fonctionnent sur le cycle frigorifique de fluides ayant certaines propriétés thermophysiques. Ces cycles sont théoriquement réversibles, si la pompe à chaleur est prévue pour, elle permet donc de réchauffer l'ambiance en hivers et la refroidir en été. Par exemple en hiver, les climatiseurs tirent de l'air extérieur une énergie de faible qualité pour réchauffer l'air de l'ambiance.

L'efficacité d'une pompe à chaleur est quantifiée par le COP. Il est défini comme le rapport entre la quantité d'énergie déchargée dans l'ambiance (ou absorbée en été) et l'énergie électrique consommée par le compresseur. Les pompes à chaleur ont donc généralement des efficacités très élevées environ 3 à 4,5. La quantité d'énergie de chauffage fournie ainsi que rendement de l'équipement peut varier en fonction de la différence de température entre l'air extérieur et l'intérieur du bâtiment.

Les systèmes de chauffage air-air sont parmi les plus répandus dans les bâtiments de la plupart des pays du sud de l'Europe, en particulier dans ceux qui ne disposent d'aucun autre système de chauffage, puisqu'ils sont utilisés à la fois pour le chauffage et le refroidissement. Ils sont beaucoup plus efficaces sur le plan énergétique que les autres types de chauffage électrique, en particulier dans les régions où les hivers sont doux.

En s'intéressant uniquement à l'énergie finale, il est moins énergivore de déplacer la chaleur que de la produire via effet joule ou une combustion. Du point de vue de la conversion entre l'énergie primaire et finale, le constat est identique aux convecteurs électriques. Par ailleurs il est important de garder en tête que le compresseur de la PAC dispose d'un rendement de fonctionnement, que ces systèmes demandent un entretien régulier et que les procédures de recyclages sont plus complexes que pour un simple foyer ouvert. Si les émetteurs de chaleurs raccordés à la PAC sont des convecteurs, il existe les mêmes risques que ceux énoncés pour les radiateurs électriques.

Dans le cadre de la rénovation les pompes à chaleur sont des systèmes de remplacement plus adaptés aux maisons individuelles qu'aux habitats collectifs. En effet l'échangeur extérieur modifie l'apparence visuelle du bâtiment. Les démarches auprès des autres copropriétaires ou des services d'urbanismes peuvent être bloquantes.



Pour les rénovations globales de maison individuelles, si l'espace disponible dans le jardin est suffisant, installer une pompe à chaleur eau/eau entre un plancher chauffant et un réseau de géothermique peut par exemple être une solution efficace et permettant une bonne maîtrise de l'ambiance thermique.

Le Tableau 9 synthétise le contenu de ces derniers paragraphes.

Tableau 9 : Récapitulatif des différentes technologies de chauffages individuels

| <b>Cheminée a foyer ouvert</b>                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Cheminée a foyer fermé</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Cheminée a foyer fermé + récupérateur de chaleur</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Poêle a bois</b>                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Poêle a pellets</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible efficacité 10-20%</li> <li>• Mode de transfert radiatif</li> <li>• Souvent utilisé en complément d'autres systèmes</li> <li>• Dégradation de la QAI</li> <li>• Stockage du bois</li> <li>• Risques d'incendies</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 30-40% d'efficacité avec vitre en verre</li> <li>• Mode transfert principalement radiatif</li> <li>• Souvent utilisé en complément d'autres systèmes</li> <li>• QAI moyenne si entretien régulier</li> <li>• Stockage du bois</li> <li>• Risques d'incendies moins importants</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité 70-80% grâce à chaleur des fumées</li> <li>• Présence d'auxiliaires (pompes, ventilateur...)</li> <li>• Régulation plus complexe</li> <li>• Stockage du bois</li> <li>• Souvent utilisé en complément d'autres systèmes</li> <li>• Dégagement de polluants dans l'air</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité 75-85%</li> <li>• Dégagement de polluants dans l'air</li> <li>• Entretien régulier</li> <li>• Rechargement régulier en buche</li> <li>• Mode de transfert radiatif et convectif</li> <li>• Stockage du bois</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité 85-90%</li> <li>• Bonne capacité de chauffe</li> <li>• Gestion automatique de l'allumage et de l'approvisionnement en combustible</li> <li>• Régulation plus complexe</li> <li>• Mode de transfert radiatif et convectif</li> <li>• Stockage du bois</li> </ul> |
| <b>Convecteur électrique</b>                                                                                                                                                                                                                                              | <b>Panneaux rayonnants</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Pompes a chaleur</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité 100%</li> <li>• Mode de transfert convectif</li> <li>• Régulation thermostaté</li> <li>• Faible investissement financier</li> <li>• Facilité de maintenance</li> </ul>                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité 100%</li> <li>• Mode e transfert radiatif</li> <li>• Peut nécessiter une reprise de l'installation électrique existante</li> <li>• Investissement financier plus important</li> <li>• Mauvaise accessibilité</li> </ul>                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• COP 2 à 2,5 en réversible</li> <li>• COP 3 à 4,5 en chauffage seul</li> <li>• Régulation thermostaté</li> <li>• Mode de transfert convectif</li> <li>• Investissement financier élevé</li> <li>• Entretien régulier</li> <li>• Amplification des phénomènes d'ilots de chaleur urbain</li> </ul> |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

### 3.1.3 SYSTEME DE PRODUCTION CENTRALISEE

Un système de chauffage centralisé peut être défini comme utilisant une source de chaleur produite à partir d'un équipement installé dans un espace approprié du bâtiment. Par exemple une chaufferie ou une salle des machines. Bien que la production soit décentralisée, les équipements de distribution sont alimentés du même point. Il existe deux grandes familles fonction du fluide caloporteur : à eau ou à air. Peu importe le type, ils se composent tous de trois parties distinctes : le dispositif où la chaleur est produite, le système de distribution et le système de contrôle.

Délocaliser le système de production de chaleur permet de limiter la production de pollutions lié aux combustions incomplètes dans l'ambiance intérieure

Les systèmes de production centralisés sont des éléments communs aux logements collectifs. Il est possible de trouver des cas de maisons individuelles fonctionnant sur le



même système de production mais ce sont des cas isolés et devant faire l'objet d'une étude de cas.

## **Les systèmes hydrauliques**

Les chaudières utilisant l'eau comme fluide caloporteur se déclinent en fonction du type de combustible utilisé : le pétrole, le gaz, la biomasse (bois ou pellets), fioul, etc. Le réservoir et le type de brûleur évolue en fonction de ce combustible. En revanche le système de distribution entre la chaudière et les émetteurs est commun à toutes les technologies. Il comprend une pompe de circulation, un échangeur de chaleur et différents organes de sécurité. La régulation d'une chaudière peut être très complexe et asservie à des capteurs de température d'eau, d'air, de débits, etc. Les régimes de température de départ et de retour de l'eau sont généralement fonction des types d'émetteurs.

Il existe un grand nombre de technologies centralisés de chaudières utilisant l'eau comme fluide caloporteur. Dans le cadre d'une rénovation l'objectif principal est de maîtriser les consommations énergétiques de bâtiment. Une fois avoir travaillé sur l'enveloppe pour réduire les besoins, il existe deux moyens principaux pour réduire les consommations de chauffage :

- Optimiser les coûts de fonctionnement de la chaudière. Bien que le fonctionnement de base des chaudières soit resté inchangé, les progrès technologiques ont permis d'améliorer les rendements de fonctionnement et donc de réduire les volumes de combustibles pour des productions de chaleur égales. Remplacer ou moderniser les chaudières peut permettre d'améliorer son fonctionnement global (changement des brûleurs, installation d'un système de condensation ou de cogénération...)
- Limiter l'impact des réseaux : Décentraliser le système de production de chaleur des émetteurs oblige le recours à des réseaux d'eau qui peuvent être un poste de consommation d'énergie. Réduire les régimes de température et calorifuger les réseaux est une bonne solution pour éviter les déperditions thermiques en lignes. Remplacer les pompes de circulation des réseaux par des équipements performants ou à débit variable permet d'optimiser les coûts de fonctionnement.

*Les radiateurs* sont les émetteurs de chaleur les plus couramment utilisés avec les systèmes de production de chaleur hydrauliques. Ils sont reliés au dispositif de production via un réseau mono ou bitubes. Dans un système de monotube, tous les radiateurs sont connectés en série à la même conduite d'alimentation, et la conduite de retour va du dernier radiateur au circuit principal. Cela signifie que la température diminue le long du tuyau, les radiateurs doivent augmenter respectivement augmenter en taille pour fournir la même puissance de chauffage dans toutes les pièces. Le système monotube est par ailleurs complexe à réguler



ce qui n'est pas le cas avec un système à deux tuyaux, l'un alimentant le radiateur (départ) et l'autre ramenant l'eau à la chaudière (retour) : par analogie électrique, on parle d'un raccordement en dérivation. Une caractéristique générale du système à deux tuyaux est que les émetteurs sont dimensionnés pour la même température de départ et un écart de température donnés. Il peut donc être équilibré hydrauliquement pour fonctionner de manière optimale.

Le mode de transfert des émetteurs est mixte avec le rayonnement et la convection, la part de chaque peut varier en fonction du radiateur. 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 [81], [82]. Il existe différents types d'organes de régulation et d'équilibrage qui peuvent être plus ou moins adaptés à différents types de situation. Seifert et al. proposent une étude basée sur les principales méthodes utilisées aujourd'hui sur cette pratique [83].

En rénovation, il est peut-être pratique de condamner des plancher chauffant existant et les remplacer par des radiateurs d'eau chaude. C'est une pratique courante lors de désordres d'étanchéité des réseaux lorsque qu'il n'est pas possible de localiser avec exactitude l'origine de la fuite. Pour les immeubles construits avant les années 90, les régimes de températures des planchers chauffants étaient plus élevés qu'aujourd'hui. Il a été établi qu'une température de plancher trop haute était inconfortable et pouvait entraîner des problèmes de circulations sanguine dans les membres inférieurs. Il est alors possible d'installer des radiateurs fonctionnant sur les mêmes régimes de température que le système existant.

Le grand nombre de régimes de température existant pour les radiateurs a eau en font une solution très adaptable et donc attractive en rénovation.

Le deuxième émetteur le plus employé est *le plancher chauffant*. Ce sont des systèmes technologiques à haute efficacité thermique. Bien mis en œuvre, ils permettent le couplage de la convection, de la conduction et du rayonnement. Un réseau de tubes agencés dans la chape du bâtiment permet au sol de jouer le rôle d'échangeur thermique géant. 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.

La pose d'un plancher chauffant implique de couler une chape par-dessus les réseaux de tuyaux. C'est donc une opération impossible à réaliser sur site occupé. Une autre contrainte en rénovation est celle de la réduction de la hauteur sous plafond. Dans certains logements anciens dont la hauteur sous plafond est déjà très basse l'ajout d'une épaisseur d'isolant, des gaines et de la chape ne peut pas être envisagé. Compte tenu de ces contraintes et des équipements de productions de chaleurs classiquement raccordés, les planchers chauffants sont des solutions plus adaptées aux maisons individuelles qu'aux bâtiments d'habitations collectifs pour la rénovation.

Le dernier type d'émetteur sont *les ventilos convecteurs*. Ce sont des échangeurs eau-air qui, à l'aide d'un ventilateur, forcent le passage de la chaleur du fluide caloporteur à l'ambiance. Le mode de transfert est donc uniquement par convection. Ces systèmes peuvent être réversibles et sont adaptés aux systèmes de climatisation. Les modèles les plus complets peuvent aussi assurer la gestion de l'air de la ventilation avec un raccordement à la VMC ou à une Centrale de Traitement d'Air (CTA). La température ambiante souhaitée peut être choisie à l'aide d'un thermostat de manière indépendante dans chaque pièce. Les ventilo-convecteurs peuvent être adaptés à différents régimes de températures, ils peuvent donc être couplés à différentes technologies de systèmes de production de chaleur.

Au vu de fonction et du type d'équipement il est plus courant de retrouver ce type d'équipement dans le tertiaire que dans l'habitat. En rénovation, pour les grands immeubles équipés de CTA il peut tout de même être avantageux de coupler ces systèmes à des systèmes de chauffage plus conventionnels (par exemple chaudière.). Ils ont l'avantage d'être très modulables et de permettre une mise en chauffe rapide. C'est donc une solution adaptée aux espaces communs.

### **Les systèmes aérauliques**

Dans le cas des émetteurs utilisant de l'air pulsé comme vecteur de transport de la chaleur, les systèmes sont raccordés à une soufflerie qui diffuse l'air dans un réseau de gaines. Les diffuseurs peuvent être situés sur le mur, les planchers ou les plafonds. Comme tout autre type de système de chaufferie centralisé, la régulation est asservie à une température pour



contrôler l'allumage des systèmes de production de chaleur. Les pompes à chaleur air/air peuvent être utilisées comme alternative aux chaudières. Bien que le chauffage de l'air soit jugé par les occupants comme moins confortable qu'un chauffage réparti (comme par exemple les planchers chauffants), il permet une mise en température très rapide. Ce type de systèmes est généralement utilisé dans des espaces très occupés, où avec des besoins de renouvellement d'air spécifiques. Par exemple, espaces rarement chauffés, où l'on souhaite répondre rapidement aux exigences de température.

Dans les cas d'utilisation de systèmes de chaudières, de pompe à chaleur ou de géothermie, il est fréquent d'avoir recours à un réseau intermédiaire hydraulique de petite taille entre la production et le réseau aéraulique. Les propriétés de stockage thermiques de l'eau, couplées au volume d'un ballon tampon permet souvent de donner une inertie thermique au système. Ceci permet d'éviter les appels de puissance et de réguler le système de manière plus souple.

La plupart du temps les bouche de diffusion d'air pulsé sont couplées avec les bouches des gestions de l'air neuf/vicié.

### 3.1.4 COMPARAISON DES SYTEMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

Nous venons de survoler dans la partie précédentes, les différentes solutions existantes de production de distribution et d'émission de chaleur et de froid dans l'ambiance de vie. Compte tenu de tout ce qui précède, le choix d'une technologie aura des impacts sur les consommations énergétiques, sur les performances thermiques et environnementales du bâtiment, mais aussi sur le confort thermique et la qualité de l'air ambiante. Le renouvellement d'une installation de chauffage dépend donc d'exigences fonctionnelles tout en tenant compte de contraintes de réalisations et de performances. Outre le coût d'investissement, la fiabilité et la durabilité du système, les coûts d'exploitation peuvent également être un moteur de décision.

Selon Papadopoulos et al.[75], [76], le coût du combustible et l'efficacité globale du système sont les deux paramètres qui influent sur le coût d'exploitation de tout système de chauffage et sont les principaux paramètres économiques pour le choix d'un système de chauffage. Dans les cas où plusieurs sources d'énergie répondent aux exigences fonctionnelles, le facteur décisif est le coût d'exploitation (€/kWh) et la période d'amortissement du système de chauffage. Le coût d'exploitation est fonction du coût du combustible (€/kWh), de l'efficacité du système de chauffage (%) et des besoins spécifiques du bâtiment (kWh/m<sup>2</sup>). En tenant compte de ces facteurs, les différents



systèmes de production de chaleur peuvent être évalués. Les [75], [76] et Tableau 11 détaillent les différents couts exploitation et efficacité des différents types de systèmes en fonction du type d'énergie utilisé.

En termes financiers, il faut également tenir compte de l'investissement initial, des besoins d'entretiens et de durée de vie d'un système de chauffage. Par exemple, comparé à une cheminée à foyer ouvert, une pompe à chaleur demande un entretien plus régulier, et dispose d'une plus faible durée de vie. Une analyse en cout global peut donc s'avérer utile dans le cadre d'une rénovation.

Tableau 10 : Cout d'exploitation d'une installation par type d'énergie utilisé (€/kWh)

| Pays   | Electricité | Gaz         | Bois Pellets | Bois buche  | Dérivés pétroliers |
|--------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|
| France | 0,175 €/kWh | 0,076 €/kWh | 0,077 €/kWh  | 0,048 €/kWh | 0,09 €/kWh         |

Tableau 11 : Efficacité des différents types de systèmes de production de chaleur

| Energie     | Système de chauffage            | Efficacité |
|-------------|---------------------------------|------------|
| Bois        | Foyer ouvert                    | 0,15       |
|             | Foyer fermé                     | 0,35       |
|             | Foyer fermé avec échangeur      | 0,70       |
|             | Poêle a bois                    | 0,80       |
| Pellets     | Poêle a granulé                 | 0,85       |
|             | Chaudière à eau chaude          | 0,9        |
| Gaz naturel | Chaudière à eau chaude          | 0,88       |
|             | Chaudière a condensation        | 1,015      |
| Fioul       | Chaudière à eau chaude          | 0,86       |
| Electricité | Convecteur, panneaux rayonnants | 1          |
|             | Chaudière électrique            | 1          |
|             | Pompe a chaleur                 | 3          |
|             | Pompe à chaleur géothermique    | 3,7        |

### 3.2 SYSTEMES DE RAFRAICHISSEMENTS

*Les Climatiseurs* sont des machines frigorifiques. Leur fonctionnement est inverse à celui des pompes a chaleurs. Certaines pompes ont chaleurs été d'ailleurs réversibles permettant ainsi de produire de la chaleur en hiver et du froid en été. Différents types de ventilateurs sont aujourd'hui en vente pour les logements d'habitations :

- Les climatiseurs portatifs de plusieurs centaines de Watt, qui sont généralement dimensionnés pour répondre aux besoins d'une seule pièce. Ils sont généralement reliés à l'extérieur via un flexible fixé sur une menuiserie. Ce sont des solutions





d'appoint qui, dans le cadre de la rénovation ont l'avantage d'avoir un impact presque inexistant sur la façade du bâtiment.

- Les climatiseurs sur fenêtres. Le principe est le même que pour les climatiseurs portatifs mais l'unité est ici installée de manière fixe. Ces systèmes sont plus compacts et un peu plus efficaces. Ce sont des solutions plus courantes dans les appartements ou les besoins peuvent moins importants et individuels
- Les unités de climatisations, que l'on retrouve dans les maisons individuelles ou dans les chaufferies décentralisées des logements collectifs. Ce sont ces types de climatiseurs sont les plus courants et qui peuvent être réversibles. Ils s'étudient de la même manière et s'emploient globalement avec les mêmes équipements que les pompes a chaleur.

*La Climatisation adiabatique* est un système de rafraîchissement basée sur le principe d'évaporation de l'eau. Lorsque qu'une pellicule d'eau traverse un air chaud est sec, la différence de pression partielle de vapeur d'eau engendre l'évaporation des gouttelettes. Ce phénomène étant endothermique, l'air se refroidit en même temps qu'il s'humidifie

Il existe deux types de climatiseurs adiabatiques :

- Ceux à détente directe : l'air humide est directement pulsé dans l'ambiance
- Ceux à détentes indirecte : Un échangeur thermique croise l'air frais humide et l'air intérieur chaud pour éviter d'insuffler de l'air trop humide dans l'ambiance.

Les systèmes a détente directe sont principalement utilisé dans les espaces ouverts, par exemple les terrasses alors que pour les espace de vie on aura plutôt tendance à privilégier méthodes « sèches ». Les caissons adiabatiques peuvent s'installer de manière individuelle dans les maisons individuelles ou être couplés a des systèmes de ventilation dans des CTA. En rénovation ce types de solutions peuvent être un moyen de valoriser la récupération d'eau de pluie.

Par ailleurs, le pouvoir de rafraîchissement est bien plus limité que pour les PAC et est adaptable aux climats chaud et secs uniquement. La consommation d'eau étant non négligeable il est judicieux de dimensionner le système de façon à éviter une grande consommation d'eau potable.

Le *rafraîchissement passif* est un concept ayant pour objectif de limiter les apports de chaleurs par tous les moyens possibles sans utiliser de systèmes extérieurs. Ceci est possible soit par le biais d'action mécaniques ou de choix architecturaux au moment de la conception :

- **Choix architecturaux** : Avoir recours à des matériaux bio sources ou à certaines formes d'habitation peut avantager la gestion des flux hygrothermiques des





espaces de vie en faveur du confort thermique estival [72]. L'utilisation de puits provençaux permet de refroidir l'air de la ventilation des maisons individuelles en utilisant la géothermie de surface. Utiliser des couleurs claires pour la peinture et les enduits permet de réduire le coefficient d'émissivité des parois et d'éviter les surchauffes des façades a cause du rayonnement solaire. En ITE, la présence d'une lame d'air ventilée entre le bardage et l'isolant permet de jouer le rôle de double peau ou d'espace tampon. Planter des arbres dans les espaces verts peut également favoriser les échanges évapotranspiratif entre les végétaux et l'ambiance pour rafraichir l'air extérieur.

- **Impact des occupants :** L'homme dans son mode de vie a un fort impact sur le fonctionnement thermique de son habitat. Il peut par exemple optimiser la gestion des stores et des volets en fonction de la position du soleil. favoriser la ventilation nocturne par ouvertures de fenêtres pour favoriser l'inertie thermique des parois. Ou encore adapter ses habitudes de vie a la saison pour par exemple éviter d'utiliser un four ou une gazinière en période estivale.

Bien que ces deux listes ne soient pas exhaustives et que certaines suggestions soient du bon sens, limiter les apports thermiques permet d'éviter ou de sous dimensionner les systèmes de rafraichissement et donc de réduire les consommations énergétiques associés.

### 3.3 SYSTEMES DE GESTION DE LA VENTILATION

L'objectif principal des systèmes de ventilation est de contrôler les débits d'air entrant et sortant d'un bâtiment. La maîtrise de la ventilation est un système complexe qui a des conséquences sur le confort thermique, les consommations énergétiques, la gestion de l'humidité dans le bâtiment, la qualité de l'air ...

Historiquement, les techniques de construction rendaient les bâtiments perméables aux infiltrations, et les mouvements de flux d'air étaient assurés par ventilation naturelle. Les méthodes modernes ont permis d'étanchéifier les logements, notamment pour une meilleure maîtrise de la consommation énergétique. L'étanchéification des parois peut amener les bâtiments modifiés à être sous-ventilés, on observe alors une dégradation de la qualité de l'air et un nombre important de désordres liés à une mauvaise gestion de l'humidité.

L'objectif de cette partie est de dresser un état de l'art des techniques et systèmes de ventilation [22], [36], [44], [84].



### 3.3.1 VENTILATION NATURELLE

La ventilation naturelle est un flux d'air de l'intérieur vers l'extérieur due aux différences de pressions intérieures et extérieures. Les principaux moteurs de ce gradient de pression sont le vent et les pressions thermiques à travers des ouvertures dans l'enveloppe d'un bâtiment. Dans certaines circonstances, la ventilation naturelle peut contrôler la température, les éléments contaminants et éventuellement l'humidité. Le contrôle de la température par la ventilation naturelle est souvent le seul moyen d'assurer un certain refroidissement lorsque la climatisation mécanique n'est pas disponible. La disposition, l'emplacement et le contrôle des ouvertures de ventilation doivent combiner les forces motrices du vent et de la température pour obtenir un taux de ventilation le plus élevé possible tout en assurant une bonne distribution de l'air de ventilation dans le bâtiment.

Russel et Concannon proposent dans leurs articles, une représentation des principaux mécanismes moteurs de la ventilation naturelle[36], [44].

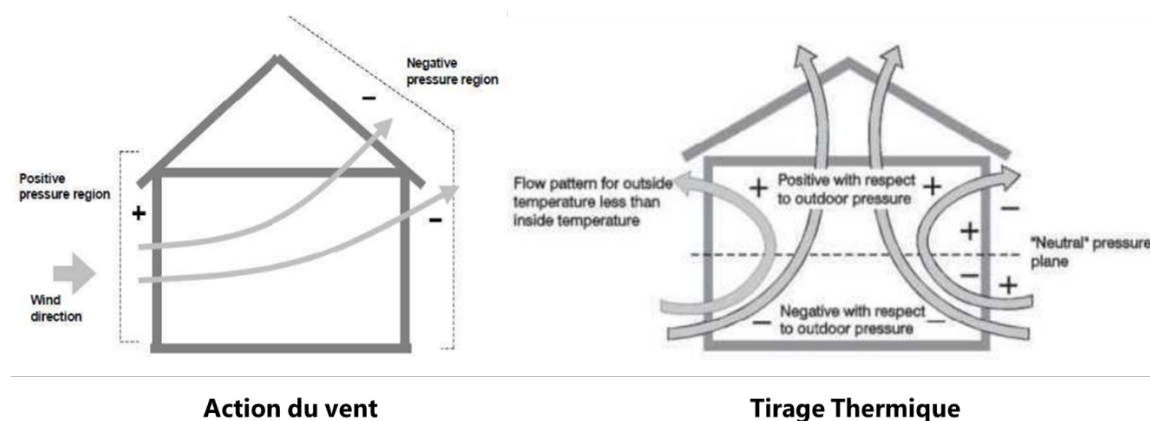


Figure 35 : Schématisation du fonctionnement des mécanismes de ventilation naturelle

### 3.3.2 VENTILATION MECANIQUE

Le fonctionnement des équipements mécaniques, tels que les systèmes d'admission ou d'extraction affectent les différentes pressions partielles du bâtiment de sorte à ce qu'elle s'équilibre en une pression statique. Pour prévoir les variations de pression et de débits, il faut connaître la modification de pression induite par le système de ventilation mécanique.

#### VMC simple flux a extraction

C'est un système de contrôle de la ventilation où l'air se déplace depuis les entrées d'air situées en façade, vers des bouches d'extractions dans les pièces « humides » grâce à un ventilateur électrique. Les bouches d'extractions sont situées dans des endroits



stratégiques, proches des émissions d'humidité ou de pollution. Par exemple dans les cuisines ou les salles de bain. En comparaison aux autres systèmes présentés plus bas, Il est simple à installer, peut couteux et qui ne demande peu d'entretien [85].

La Figure 36 illustre schématiquement le fonctionnement d'une VMC simple flux a extraction.

Le différentiel de pression est uniquement induit via la capacité du ventilateur à « tirer » l'air. Cette technique ne permet donc pas de maitriser la diffusion de l'air dans l'espace, la qualité de l'air entrant ou encore l'inconfort lié à la température de l'air entrant [22].

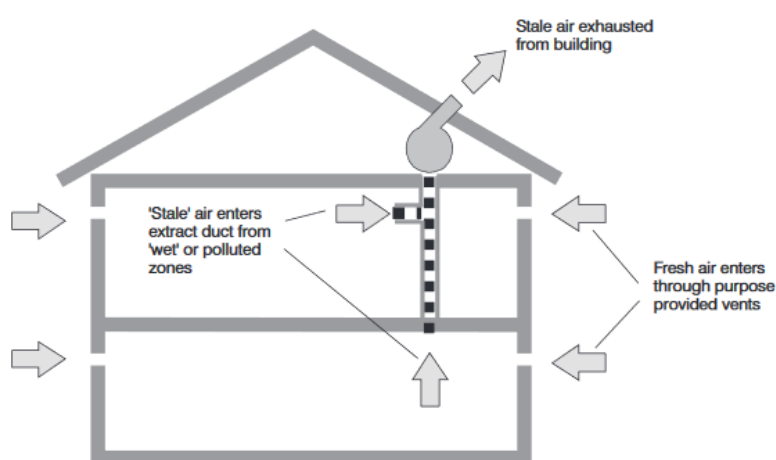


Figure 36 : Schématisation d'un système de ventilation simple flux [36]

### VMC simple flux par insufflation

Le procédé de traitement de l'air est similaire à celui de la VMC simple flux à extraction. Un différentiel de pression permet d'insuffler de l'air neuf via des bouches d'entrées et de l'extraire via un caisson d'extraction. Ici l'air neuf est injecté, le bâtiment est donc en surpression. Cette solution permet de garantir que les flux d'air se font uniquement de l'intérieur vers l'extérieur. Ceci permet par exemple, en utilisant les procédés adaptés, de maitriser les quantités de polluants en provenance de l'extérieur.

Ce type de système présente néanmoins une moins bonne gestion des concentrations intérieures de polluants. La maitrise des flux de vapeurs au travers des murs est également plus difficile à contrôler [86]. Néanmoins, en rénovation cette solution est souvent plus facile à installer. La quantité de gaines nécessaires est moins importante que pour les systèmes a extractions.

### VMC double flux



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 890598.

La VMC double flux se caractérise par une maîtrise des flux entrant et sortant du bâtiment. L'enveloppe du bâtiment est très étanche et les réseaux de ventilations sont doublés pour assurer en parallèle l'insufflation de l'air neuf et l'extraction de l'air vicié. Pour garder le contrôle des flux d'humidité au travers des murs, il est préférable de garder le logement en légère dépression. L'ajout d'un échangeur de chaleur entre l'air neuf et l'air vicié permet de limiter les déperditions thermiques liées au renouvellement d'air. Ce type de système assure la maîtrise de l'air entrant et sortant, et il est possible d'installer des modules de filtration pour contrôler les concentrations de polluants provenant de l'extérieur [44], [85].

La Figure 37 illustre schématiquement le fonctionnement d'une VMC double flux

Dans le cas des VMC doubles flux, une attention particulière doit être portée au confort thermique estival lorsque le système d'échangeur de chaleur ne possède pas de by pass. Dans ce cas, la sur-ventilation nocturne estivale n'est pas envisageable. La chaleur échangée tout au long de la journée est alors piégée à l'intérieur jusqu'au lendemain matin où le soleil recommencera à chauffer le logement.

Par ailleurs, l'investissement initial est plus élevé que pour une VMC simple flux et les contraintes de maintenance sont plus régulières. Compte tenu du deuxième ventilateur, le bruit engendré peut également être plus important ainsi que la consommation électrique associée. Une attention particulière devra être portée à l'agencement des réseaux. En rénovation le nombre important de gaines nécessaires à l'installation d'une ventilation double flux peut être problématique.

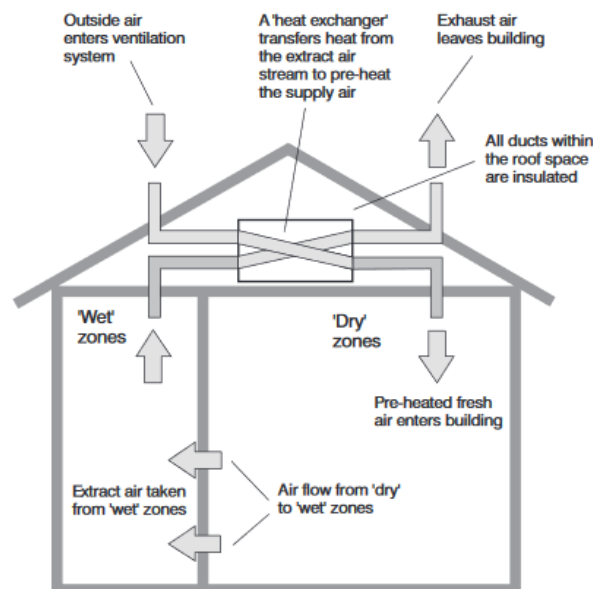


Figure 37 Schématisation d'un système de ventilation a double flux [36]



### 3.3.3 REGULATION DES CONDITIONS DE VENTILATION

#### Régulation asservie par la qualité de l'air

L'enjeu de l'asservissement du débit par des capteurs est de contrôler l'admission d'air en fonction d'une quantité de polluant pour limiter les consommations d'énergies. Le débit d'air théorique calculé est donc adapté. Par exemple, si les occupants quittent la pièce, la quantité de CO<sub>2</sub> diminue, le débit calculé est donc réduit, les consommations énergétiques également. [87], [88]

La sonde est placée pour mesurer le taux de CO<sub>2</sub> dans la gaine de reprise d'air. Le taux de recyclage du by pass s'ouvre ou se ferme en fonction de cette valeur. Dans son article, Guyot avance qu'il est possible d'économiser jusqu'à 60% d'énergie avec ce type de systèmes.[88]

#### Régulation asservie par l'hygrométrie

Ce type de ventilation a pour objectif de réguler le débit d'air extrait en fonction des conditions d'humidité de l'air intérieur. Ceci permet d'éviter les déperditions par renouvellement d'air lorsque les pièces humides ne sont pas utilisées. Il existe deux types de ventilations hygro-réglables : [44], [84]

- Hygro A : Les entrées d'air sont autoréglables ou fixes
- Hygro B : Les entrées d'air sont hygroréglables

Ce type de régulation ne prend en compte qu'un seul paramètre pour réguler le débit d'air bien que la ventilation puisse servir à gérer également la qualité de l'air intérieure, le confort thermique, etc. Il est donc important de trouver des compromis permettant les meilleures performances possibles dans tous les domaines.

#### Centrale de Traitement de l'Air (CTA)

Les CTA sont des systèmes permettant de maîtriser et modifier les caractéristiques d'un flux entrant en fonction d'une consigne. Les réseaux de distributions sont similaires à ceux d'une ventilation double flux avec des gaines pour l'air neuf et des gaines pour l'air vicié. Un CTA peut disposer aussi d'un caisson de mélange permettant le recyclage de l'air extrait et/ou d'un échangeur thermique pour limiter les déperditions thermiques liées à l'amenée d'air neuf [22], [84].

En fonction des besoins du bâtiment, il existe des modules permettant de traiter les caractéristiques de l'air. Les opérations possibles sont :

- Le remplacement de l'air vicié



- La purification de l'air, par filtration
- L'humidification/La déshumidification de l'air
- Gestion de la surpression/Dépression du bâtiment
- Refroidissement/Chauffage de l'air

La Figure 38 représente la schématisation des principaux organes de traitement de l'air d'une CTA et de son fonctionnement.

Il est donc possible de maîtriser presque toutes les caractéristiques de l'air humide à l'aide d'un CTA. Il est cependant nécessaire d'installer des capteurs sur le réseau d'air aspiré pour assurer une régulation précise, en boucle fermée.

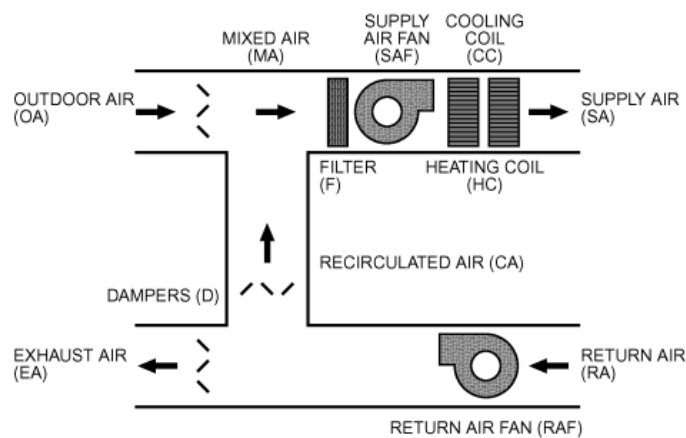


Figure 38 Schématisation d'un système de centrale de traitement de l'air [22]

### 3.3.4 FOCUS SUR LA QAI

Pour être efficace du point de vue de la qualité de l'air intérieur, un système de ventilation doit permettre de maîtriser les concentrations de polluants en provenance de l'extérieur, sans être elle-même un vecteur ou une source de pollution pour l'intérieur. L'utilisation de systèmes de brassage d'air (tels que les ventilo-convecteurs, les ventilateurs, etc.) ou les forts taux de recyclages dans les caissons de certaines CTA peuvent entraîner une recirculation des polluants et notamment des particules. C'est pourquoi les systèmes de ventilation sont généralement équipés de filtres [22], ces filtres assurent également une meilleure pérennité aux éléments du système eux-mêmes (notamment les ventilateurs). En effet, augmenter le flux d'air pour diluer les polluants ne semble également pas avoir d'effet sur la réduction des concentrations provenant de l'extérieur ou de la ventilation [89].

La pollution de l'air dans un système de ventilation peut varier considérablement selon le type de construction, l'utilisation et la maintenance du système. Dans les systèmes de ventilation courants, les filtres et les conduits sont eux-mêmes des sources de pollution, en



particulier au niveau des odeurs. Dans une CTA, si les humidificateurs et la chaleur tournante des échangeurs sont utilisés, ils peuvent également être des vecteurs de pollutions, surtout s'ils ne sont pas entretenus régulièrement et correctement. La charge de pollution causée par le chauffage et les serpentins de refroidissement est moins importante.

### 3.4 SYSTEMES SOLAIRES

*Le solaire photovoltaïque* peut être défini comme une technique de production de l'énergie utilisant des panneaux solaires pour convertir le rayonnement solaire en électricité au moyen de panneaux solaires. Les photons contenus dans le rayonnement solaire permettent de mettre en agitation les électrons d'un matériaux semi-conducteurs (souvent du silicium) pour faire de l'électricité. Le courant créé est ensuite transmis dans une grille métallique jusqu'au bornes du panneau. Ce mode de production d'électricité a l'avantage de demander peu d'entretien, de se faire sans bruit ni pollution de l'air intérieur.

L'électricité est sous la forme de courant continu a la sortie du panneau, un système de conversion et de régulation doit donc être installé avant de pouvoir réinjecter l'électricité sur le réseau.

Les panneaux utilisés en rénovations ont une durée de vie d'au moins 25 ans et peuvent être de différents types

- Les panneaux dits couches minces qui ont des rendements très faibles, inférieurs à 10% mais sont peu cher et disposent d'un encombrement très avantageux
- En silicium multicristalins : ce sont les plus courants et les moins chers, ils ont un rendement de conversion d'environ 13 et 15%
- Les modules en silicium multicristalin sont plus chers mais permettent d'atteindre des rendements jusqu'à 20%

Il est important de préciser que le rendement d'un panneau solaire peut décroître avec l'age et est fortement corrélé avec la température de fonctionnement du panneau. De plus toute l'énergie solaire non transformée en électricité sera transformé en chaleur. Le panneau a donc tendance naturellement à chauffer. Et plus il chauffera moins il sera efficace. Il est donc impératif de prévoir une lame d'air entre le toit et le support de fixation du panneau. Il est également déconseillé de poser des panneaux solaires sur des toitures non isolées, en effet le risque de surchauffes estivales est non négligeable.

*Le solaire thermique* est un autre mode d'utilisation de l'énergie solaire. Au lieu d'utiliser de la transformer les rayons servent directement à réchauffer un fluide vecteur, le plus souvent de l'eau. L'eau chaude est ensuite acheminée via un réseau de tubes jusqu'à un ballon de



stockage. L'énergie y est transmise via un échangeur. Compte tenu de la place nécessaire pour chauffer l'eau, ce type d'installation est plus adapté aux maisons individuelles

Il est rare que la température de l'eau dans le ballon soit assez haute pour être utilisé en l'état. L'appoint d'énergie est fait soit par effet joule soit au moyen d'une pompe à chaleur. Cette eau surchauffée peut ensuite être utilisée soit pour l'eau chaude sanitaire (CESI – Chauffe Eau Solaire Individuel) soit pour chauffer un plancher chauffant ou des radiateurs basses température (SSC – Système Solaire Combiné). Les systèmes électriques d'appoint sont surtout nécessaires pour les SSC.

Ces systèmes de production solaire couplés au chauffage sont moins répandus car ils sont beaucoup plus efficaces en été. C'est aussi le moment de l'année où le besoin de chauffe est le plus bas.

### **3.5 REMPLACEMENT D'UN SYSTEME**

Le choix du remplacement d'un système est donc un processus global et complexe qui aura des incidences sur le fonctionnement énergétique et environnemental du bâtiment, mais aussi sur l'aspect financier, sur le confort, sur l'entretien et le mode de vie des occupants. Bien que la recherche de performance énergétique soit un élément motivant dans le choix d'un type de solution, il est important de prendre en compte les différents éléments impactant et l'interfaçage des différents domaines. En effet il est important de comprendre les enjeux associés pour faire le choix le plus adapté aux besoins d'un bâtiment.

En rénovation, le choix du remplacement d'un système CVC dépend du système déjà existant mais aussi de la typologie du bâtiment et des besoins des occupants. Par exemple l'installation d'une chaudière et d'une installation à eau peut être complexe et coûteuse si les émetteurs existants sont des convecteurs électriques. De la même manière, l'installation de cheminées n'est souvent pas un choix adapté aux logements collectifs.

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. 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 [34].





Le graphique en question suggère le recours à une technologie ou un système en fonction des propriétés thermo hydriques d'un air donné. L'objectif étant de ramener ce même air dans des conditions dites confortables avec une consommation énergétique la plus optimisée. Par exemple, en hiver si les conditions de température et d'humidité situent l'air dans la zone 3, les seuls apports internes doivent suffire à maintenir des conditions d'ambiances acceptables. Tant que la rigueur du climat ne fait pas franchir la zone 7 aux caractéristiques de l'air extérieur, un système basé sur l'énergie solaire peut s'avérer suffisant. En revanche dépassé cette limite, il est indispensable d'avoir recours à des systèmes de chauffage plus « conventionnels »

De la même manière, dans le contexte estival, le recours à des systèmes de climatisation est nécessaire lorsque l'air extérieur se trouve dans la zone 13. Dans les autres zones, des systèmes moins gourmands en énergie s'avèrent généralement suffisants. A noter que ce graphique est valable pourvu que le bâtiment existant ne présente pas de défauts de conceptions.

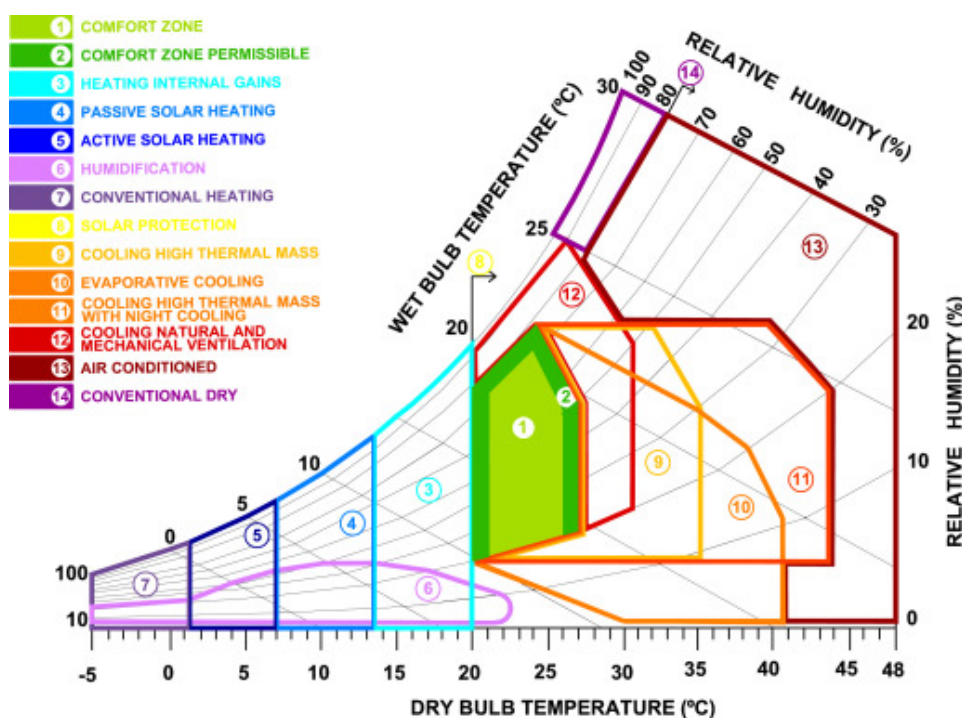


Figure 39 : Diagramme d'utilisation des systèmes CVC en fonction des caractéristiques d'un air extérieur

Ici aussi le remplacement d'un système de ventilation ou de système aura de fortes conséquences sur les performances énergétiques, environnementales, du confort acoustique, etc. Il en va de même sur le choix des émetteurs et du type de régulation mis en place. 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 seront plus ou moins optimaux

Finalement l'enveloppe du bâtiment, les habitudes de vie et les usages des bâtiments ont un très fort impact sur les besoins associés à la ventilation et aux systèmes de chauffage/climatisation. C'est en fonction de ces besoins que doivent être comparés et choisis les systèmes de chauffage, de ventilation et les émetteurs les plus adaptés. C'est pour cette raison que la rénovation de l'enveloppe est souvent effectuée avant le remplacement ou la modification des systèmes.





This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 890598.