

COMPRENDRE POUR AGIR

# HABITAT ANCIEN EN ALSACE

AMÉLIORATION ÉNERGÉTIQUE ET  
PRÉSERVATION DU PATRIMOINE



DREAL ALSACE DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DU LOGEMENT  
DRAC ALSACE DIRECTION RÉGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES

## Rapport méthodologique

Phase 2

juillet 2015



p. 1/63



## Étude Habitat Ancien en Alsace : énergie, durabilité du bâti et patrimoine

La phase 1 de cette étude est l'objet d'un rapport méthodologique spécifique.  
La phase 2 de cette étude a été menée entre novembre 2013 et juillet 2015.

### Maîtrise d'ouvrage :



DREAL Alsace  
Direction Régionale de l'Environnement et de l'Aménagement et du Logement  
2, Route d'Oberhausbergen – 67000 STRASBOURG  
t/03.88.13.05.00  
courriel : [alice.lejeune@developpement-durable.gouv.fr](mailto:alice.lejeune@developpement-durable.gouv.fr)  
courriel : [guillaume.durousseau@developpement-durable.gouv.fr](mailto:guillaume.durousseau@developpement-durable.gouv.fr)

DRAC Alsace  
Direction Régionale des Affaires Culturelles  
Palais du Rhin -2 place de la République — 67 082 STRASBOURG CEDEX  
t/03 3 88 15 57 00 – f/03 88 75 60 95  
courriel : [alsace@culture.gouv.fr](mailto:alsace@culture.gouv.fr) courriel : [malory.chery@culture.gouv.fr](mailto:malory.chery@culture.gouv.fr)

### Maîtrise d'œuvre :



Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema)

Direction territoriale Est (ex CETE de l'Est) Laboratoire Régional de Strasbourg  
11, rue Jean Mentelin -67 000 STRASBOURG  
t/03 88 77 79 31 – f/03 88 77 46 20 courriel : [elodie.heberle@Cerema.fr](mailto:elodie.heberle@Cerema.fr)

Direction territoriale Nord-Picardie (ex-CETE Nord-Picardie)  
2, rue de Bruxelles – CS 20 275 – 59 019 LILLE CEDEX  
t/03 20 49 60 00 – f/03 20 53 15 25  
courriel : [bertrand.reydellet@Cerema.fr](mailto:bertrand.reydellet@Cerema.fr) -  
courriel : [lionel.lombardo@developpement-durable.gouv.fr](mailto:lionel.lombardo@developpement-durable.gouv.fr)



Atelier ODM - SARL d'architecture  
8, quai Zorn -67000 STRASBOURG  
t/03 88 52 12 88 – f/09 58 14 86 55  
courriel : [atelier.odm@free.fr](mailto:atelier.odm@free.fr)

### Comité technique de suivi de l'étude :

Un comité technique de suivi de l'étude a accompagné le travail des prestataires :

- Conservation Régionale des Monuments Historiques, Services Territoriaux de l'Architecture et du Patrimoine pour la DRAC Alsace
- Service Énergie Climat Logement Aménagement pour la DREAL Alsace
- Atelier d'architectes ODM et le CEREMA (ex -CETE), prestataires de l'étude.

### Groupe de travail partenarial :

Un groupe de travail partenarial a été mis en place par la DREAL. Il réunit un ensemble d'acteurs concernés par l'enjeu de la réduction de consommation d'énergie dans le bâti alsacien:

Conseil Régional d'Alsace, Conseils Départementaux du Bas-Rhin et du Haut-Rhin, Eurométropole de Strasbourg, Mulhouse Alsace Agglomération, CAUE 67 et 68, ADEME, Espaces Info Énergie, PNR des Vosges du Nord et PNR des Ballons des Vosges, Pôle Energivie-Fibres, Caisse des Dépôts, FNAIM, AREAL/bailleurs sociaux, FFB, EDF, Ordre des Architectes, CAPEB, Association Maisons Paysannes de France/Association de sauvegarde de la maison alsacienne, AART-A.

Ce groupe de travail a été réuni aux moments-clés de la phase 2, pour discuter de l'orientation de l'étude, prendre connaissance de son avancement, et faire des suggestions.

Nous remercions particulièrement ces partenaires de l'étude pour l'intérêt qu'ils lui portent et pour leurs contributions précieuses.

Rapport méthodologique Phase 2 - V2

# Sommaire

<b>1. Objectifs et résultats de l'étude.....</b>	<b>6</b>
1.1. Contexte et utilisation de l'étude.....	6
1.2. Résultats synthétiques de la phase 1 : comprendre le bâti ancien alsacien.....	8
1.3. Résultats synthétiques de la phase 2 : agir pour rénover le bâti ancien alsacien	9
<b>2. Contours de la phase 2 de l'étude.....</b>	<b>11</b>
2.1. Différences entre le logement réel et le type modélisé.....	11
2.2. Type d'actions envisagées.....	11
2.3. La mise en œuvre des actions.....	11
<b>3. Méthodologie de la phase 2.....</b>	<b>13</b>
3.1. Inventaire des actions possibles.....	15
Liste des actions disponibles.....	15
Actions de rénovation thermique des éléments de l'enveloppe.....	18
Actions sur les systèmes.....	21
3.2. Approche architecturale du projet de rénovation énergétique.....	21
3.3. Analyse multi-critères qualitatives des actions possibles.....	22
Précisions sur l'élaboration du critère « patrimonial et architectural ».....	22
Analyse qualitative des enjeux patrimoniaux liés aux façades.....	24
Actions sur la ventilation.....	30
Actions sur les systèmes.....	32
3.4. Construction des bouquets d'actions adaptées suivant trois scénarios.....	33
3.5. Analyse multi-critères quantitative des bouquets d'actions adaptées.....	35
3.6. Analyse économique.....	35
<b>4. Élaboration de l'échelle de notation pour chaque critère....</b>	<b>37</b>
4.1. Critère « gain énergétique ».....	37
4.2. Critère « confort d'été ».....	38
4.3. Critère « diminution de l'effet de paroi froide en hiver ».....	39
4.4. Critère « absence de risques liés à l'humidité ».....	40
4.5. Critère « patrimoine et architecture ».....	41
<b>5. Analyse économique des bouquets.....</b>	<b>43</b>
5.1. Rentabilité.....	43
Coût du bouquet d'actions.....	43
Temps de retour actualisé (TRA) sur investissement.....	43
Evolution des charges énergétiques sur 20 ans avec et sans travaux.....	44
Monétarisation des tonnes de CO2 non émises grâce aux travaux.....	44
5.2. Soutenabilité.....	44
Introduction.....	44
Calcul du coût mensuel du plan de financement du bouquet d'actions.....	45
Prise en compte de l'éco-prêt à taux zéro.....	46
Modification du temps de retour sur investissement suivant le plan de financement	46
<b>6. Prolongements potentiels de l'étude.....</b>	<b>47</b>
6.1. Des types supplémentaires.....	47
6.2. Des critères supplémentaires.....	47

6.3. Des actions supplémentaires.....	47
6.4. Des systèmes supplémentaires.....	48
6.5. L'intégration d'un volet sociologique.....	48
6.6. L'approfondissement de l'analyse économique.....	48
6.7. Retours d'expériences.....	48
<b>7. Annexe 1 : hypothèses et définitions énergétiques et hygrothermiques.....</b>	<b>49</b>
7.1. Définition d'un enduit isolant « perspirant ».....	49
7.2. Définition de la mousse minérale.....	49
7.3. Propriétés thermiques et hygriques des matériaux isolants.....	49
7.4. Étiquette-énergie et niveau BBC rénovation.....	51
Hypothèses de départ.....	51
Passage du non conventionnel au conventionnel.....	51
Passage de l'énergie finale à l'énergie primaire.....	51
Passage d'un usage (le chauffage) à trois usages et cinq usages.....	52
Facteur 4 et objectif « Grenelle » -38 %.....	52
<b>8. Annexe 2 : calcul du critère « diminution de l'effet de paroi froide en hiver ».....</b>	<b>53</b>
<b>9. Annexe 3 : calcul du revenu minimum requis pour financer les bouquets d'actions.....</b>	<b>54</b>
<b>11. Annexe 4 : calcul du coût global.....</b>	<b>60</b>
11.1. Un outil d'intégration des coûts d'un investissement sur toute sa durée.....	60
11.2. Les hypothèses économiques à définir.....	63
Taux d'actualisation.....	63
Taux d'inflation du prix de l'énergie.....	63
Calcul de rentabilité.....	63

## Index des illustrations

Illustration 1: Démarche générale d'évaluation (source : Cerema).....	14
Illustration 2: Exemple d'analyse du fonctionnement thermique initial et projeté (dessin ODM) .....	21
Illustration 3:Série de maisons identiques, à gauche, mise en œuvre d'une ITE et remplacement des fenêtres et des volets, à droite rénovation extérieure avec conservation des éléments (source ODM).....	25
Illustration 4:Exemple d'isolation du toit par l'extérieur (photo ODM).....	26
Illustration 5: Remplacement de châssis bois : appauvrissement des moulures, modification des proportions (photos avant/après – source STAP 67).....	29
Illustration 6: Remplacement de porte d'entrées (source STAP 67).....	31
Illustration 7:importance du volume occupé par le matériel et son impact sur l'habitabilité des espaces (dessin ODM).....	32
Illustration 8: Coupe schématique de principe d'insertion d'une entrée d'air masquée derrière le dormant de la fenêtre, invisible à l'extérieur (dessin ODM).....	32
Illustration 9: Chaudières murales à ventouse, avec sorties extérieures (source ODM).....	34
Illustration 10: Algorithme des trois scénarios (source : Cerema).....	35
Illustration 11: Diagramme-radar pour le critère "gain énergétique".....	39
Illustration 12: Diagramme-radar pour le critère "confort d'été".....	40
Illustration 13: Diagramme-radar pour le critère "diminution de l'effet de paroi froide en hiver" .....	40
Illustration 14: Diagramme-radar pour le critère "absence de risques liés à l'humidité".....	41
Illustration 15: Diagramme-radar pour le critère "patrimoine et architecture".....	43
Illustration 16: Durée de l'éco-prêt supérieure à la durée du prêt de marché (source : Cerema) .....	46
Illustration 17: Durée de l'éco-prêt inférieure à la durée du prêt de marché (source : Cerema) .....	46
Illustration 18: Répartition des consommations d'énergie finale des résidences principales de France métropolitaine (source : Cerema, d'après 12).....	52
Illustration 19: Répartition des consommations d'énergie primaire des résidences principales de France métropolitaine (source : Cerema, d'après 12).....	53
Illustration 20: Température de surface intérieure avant rénovation.....	54
Illustration 21: Température de surface intérieure après isolation thermique.....	54
Illustration 22: Température de surface intérieure après correction thermique.....	54
Illustration 23: Durée de l'éco-prêt supérieure à la durée du prêt de marché (source : Cerema) .....	56
Illustration 24: Durée de l'éco-prêt inférieure à la durée du prêt de marché (source : Cerema) .....	56
Illustration 25: Types de ménages élémentaires (source : Cerema).....	57
Illustration 26: Distribution des catégories de ménages par tranches de revenu annuel imposable, individuel d'avant 1955, 80-100 m <sup>2</sup> , en Alsace (source : Filocom).....	58
Illustration 27: Distribution des catégories de ménages par tranches de revenu annuel imposable , individuel d'avant 1955, > 160 m <sup>2</sup> , en Alsace (source : Filocom).....	59
Illustration 28: Distribution des catégories de ménages par tranches de revenu annuel imposable , collectif d'avant 1965, 80-110 m <sup>2</sup> , en Alsace (source : Filocom).....	60
Illustration 29: Formule de calcul du coût global (source : Cerema).....	62
Illustration 30: Familles et occurrences des coûts retenus pour la présente étude (source : CGDD).....	63

# 1. Objectifs et résultats de l'étude

La Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL Alsace) et la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC Alsace) ont lancé ensemble en 2011 une étude sur l'amélioration de la performance énergétique des logements situés dans des bâtis d'habitation antérieurs à 1948 en Alsace.

La phase 1 de cette étude a eu pour but de mieux comprendre la complexité du comportement thermique réel de ces logements. La phase 2 a pour objectif de proposer des gestes de rénovation visant à améliorer leurs performances énergétiques tout en préservant leur qualité architecturale et patrimoniale et en maîtrisant les coûts.

## 1.1. Contexte et utilisation de l'étude

En France, le parc bâti existant (résidentiel et tertiaire) représente près de 45% de l'énergie finale<sup>1</sup> consommée en 2012. Gisement majeur pour l'atteinte des objectifs de moindre consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre, il concentre une attention et un investissement public et privé croissants depuis quelques années. L'enjeu énergétique est ainsi devenu une donnée incontournable de la réhabilitation du bâti ancien, au point de parfois passer avant la prise en compte de la durée de vie du bâtiment ou de son aspect patrimonial. Répondre à cet enjeu nécessite donc aussi d'interroger la qualité des rénovations entreprises.

Le constat s'impose : nombres d'actions de rénovation paraissant faciles et rapides à mettre en œuvre (changement de fenêtres, pose d'isolants étanches sur les parois, etc.) sont encore menées sans prise en compte de l'époque, ni du mode de construction du bâtiment, des données pourtant essentielles.

On distingue en effet plusieurs périodes de construction, ici présentées dans un ordre anté-chronologique :

- la période faisant suite au premier choc pétrolier de 1973, avec des réglementations thermiques (RT) successives (de 1974 jusqu'à l'actuelle RT 2012) qui se sont attachées, à améliorer la construction des logements neufs (performance des parois et de la ventilation, etc.). Elles ont introduit progressivement dans les pratiques des limitations de la consommation énergétique et des notions de confort.
- la période 1949-1974, entre la Reconstruction et la première réglementation thermique, période qui s'est caractérisée par l'emploi généralisé du ciment, du béton armé et des produits industriels préfabriqués, produisant des logements très énergivores
- la période antérieure à 1948, avec des bâtiments utilisant le plus souvent des matériaux traditionnels, locaux à faible énergie grise<sup>1</sup> et présentant une performance énergétique globalement meilleure que les bâtiments de la période 1949-1974, ainsi que des caractéristiques d'inertie conférant un remarquable confort d'été.

Les parois de ces bâtiments ont un fonctionnement hygrothermique très spécifique et radicalement différent de celui des constructions postérieures. Les isolants étanches sont inadaptés aux maçonneries anciennes et génèrent des pathologies (moisissures, pourrissement et altérations structurelles). Le remplacement des fenêtres n'est pas non plus une intervention anodine, en particulier pour les bâtiments anciens. Il s'agit d'une véritable modification architecturale qui, mal maîtrisée, peut dégrader la composition des façades, alors même que le besoin et l'efficacité qui peut en résulter ne sont le plus souvent pas précisément quantifiés et vérifiés.

Historiquement, cette approche qualitative de la rénovation du bâtiment ancien n'a pas ou peu été normée, la réglementation restant plus tardive et plus prudente pour les logements existants que pour la construction neuve.

<sup>1</sup> Quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie d'un matériau ou d'un produit : la production, l'extraction, la transformation, la fabrication, le transport, la mise en œuvre, l'utilisation, l'entretien puis pour finir le recyclage

C'est en 2002 que l'Union Européenne a imposé l'élaboration d'une réglementation thermique pour les logements existants dans chaque pays européen. La réglementation thermique en vigueur aujourd'hui en France est la RT Existant 2007. Pour les bâtiments antérieurs à 1948, c'est plus précisément le volet « élément par élément » de cette réglementation qui s'applique.

Ce volet définit une performance minimale pour l'élément remplacé ou installé, mais cette obligation ne s'applique pas aux travaux entrepris sur des parois constituées de matériaux traditionnels : maçonnerie de pierre hourdées à la chaux, pan de bois, remplissage de torchis, etc. La RT Existant reste donc très prudente concernant les parois sensibles aux transferts d'humidité et n'impose rien, afin d'éviter d'encourager la pose d'isolants imperméables à l'humidité et en raison aussi de l'absence de solutions « toutes faites » : la question du comportement hygrothermique des parois s'avère complexe.

La RT Existant prévoit de plus pour le bâti ancien l'exemption de certaines exigences de performances dans les secteurs protégés au titre du patrimoine, notamment : secteurs sauvegardés, zones de protection du patrimoine (ZPPAUP) et Aire de mise en valeur (AVAP), abords des monuments historiques, sites inscrits et classés. Dans ces secteurs, où le bâti d'habitation ancien antérieur à 1948 est bien sûr très représenté, les travaux éventuels d'isolation des murs par l'extérieur et les travaux sur les parois vitrées ne doivent pas entraîner de modifications de l'aspect de la construction en contradiction avec les protections prévues.

Malgré cette réglementation très prudente pour l'intervention sur les bâtiments antérieurs à 1948, l'amélioration de leurs performances énergétiques est devenu un enjeu sociétal fort, mobilisant les intervenants du bâtiment et les politiques publiques. Il est nécessaire d'agir pour réduire les consommations énergétiques, mais en préservant les caractéristiques historiques, architecturales et l'authenticité matérielle des bâtiments ainsi que les qualités visuelles et esthétiques des paysages urbains.

C'est pourquoi **comprendre le comportement thermique du bâti d'habitation ancien, puis rechercher et proposer des solutions techniques adaptées** pour permettre son amélioration énergétique constitue aujourd'hui un enjeu impératif.

Cette recherche ne peut se faire qu'à l'aide de logiciels de simulation thermique, plus adaptés au bâti ancien et à la problématique de la rénovation que les logiciels de calculs réglementaires, comme l'ont montré les études pré-BATAN et BATAN (2005-2011), menées au niveau national par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable et l'ADEME (prestataires : LASH-ENTPE, CETE de l'Est, CETE de l'Ouest, Maisons Paysannes de France et INSA de Strasbourg).

L'étude DREAL/DRAC Alsace se présente comme un approfondissement et une déclinaison régionale de cette étude nationale, appliqués aux **286 000 logements construits avant 1948 en Alsace (soit 32 % du parc de logements existants dans la région)**. **En explorant trois scénarios de rénovation sur 7 types de logements anciens, elle apporte des réponses à l'objectif de conciliation des enjeux de performance énergétique et de préservation du patrimoine.**

Dans le cadre des objectifs du **Grenelle de l'Environnement** (2009-2010), du **Plan de rénovation énergétique de l'Habitat** (2013) et de la loi de **Transition énergétique pour la croissance verte** (2015), cette étude a vocation à servir à la fois les politiques de protection du patrimoine et celles d'aménagement, d'habitat et d'énergie.

Elle s'inscrit de ce point de vue dans le cadre stratégique fixé pour le territoire alsacien par le Schéma Régional Climat Air Énergie et pourra trouver des déclinaisons dans les Plans Climat Énergie Territoriaux, les Schémas de Cohérence Territoriaux, les Plans Locaux d'Urbanisme et de l'Habitat.

Déclinée sous plusieurs formes - fiches-conseils, rapports méthodologiques, état de l'art des pratiques de rénovation du bâti ancien en France – l'étude DREAL/DRAC Alsace est destinée

au grand public, aux professionnels de la rénovation, aux acteurs de la formation et à ceux du conseil et de l'accompagnement (Point Rénovation Info Service, Plate-forme locale de la rénovation énergétique, CAUE, etc.), ainsi qu'à tout acteur participant aux politiques d'aide financière et de financement des travaux de rénovation du bâti ancien

L'étude DREAL/DRAC Alsace s'inscrit également dans une dynamique régionale actuelle d'amélioration de la connaissance du parc bâti alsacien en vue de sa rénovation :

- étude de l'Association Régionale des organismes HLM d'Alsace (AREAL) sur le parc HLM alsacien (étude énergétique et préconisations d'action, 2012).
- étude de la Région Alsace sur la définition de solutions techniques pour la rénovation énergétique des logements collectifs post-1948 (2014),
- élaboration du guide « Habiter le patrimoine, guide de l'éco-rénovation » par le Parc Naturel Régional des Vosges du Nord dans le cadre du programme Interreg Vosges du Nord/Pfälzerland (2014)

Elle fait également partie du corpus des formations continues sur la rénovation du bâti ancien mises en place par l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg et les Parcs Naturels Régionaux des Vosges du Nord et des Ballons des Vosges, à destination des artisans, des bureaux d'étude et des architectes.

**Tous ces résultats et ces documents de travail sont mis à la disposition des acteurs institutionnels, des professionnels et des particuliers, en téléchargement libre sur les sites internet de la DREAL et de la DRAC Alsace :** 8 fiches-conseils, le présent rapport méthodologique, le rapport technique du cas n°7<sup>2</sup> et l'État de l'art des pratiques de rénovation du bâti ancien en France.

## 1.2. Résultats synthétiques de la phase 1 : comprendre le bâti ancien alsacien

Différentes typologies thermiques ont été établies dans la phase 1 de cette étude. Pour ce faire, des éléments caractéristiques ont été rassemblés pour permettre d'identifier et de déterminer le comportement énergétique d'un logement situé dans un bâtiment d'habitation, qu'il soit individuel ou collectif. Ce dernier est représentatif du « patrimoine ordinaire » bâti avant 1948, par opposition aux monuments historiques :

- en milieu urbain ou rural selon sa situation géographique, son exposition et sa zone climatique
- selon sa structure architecturale, ses matériaux constitutifs et de second œuvre

Sur l'ensemble de l'Alsace, 18 types thermiques ont été déterminés en phase 1 de l'étude, 9 types ont été sélectionnés pour chercher des logements réels à étudier, et 7 logements ont finalement été sélectionnés et instrumentés.

Pour chacun de ces logements, une étude architecturale et thermique à l'échelle du bâtiment et une étude hygrothermique à l'échelle des parois ont été réalisées.

Avant toute intervention de rénovation thermique, des enseignements ont ainsi déjà pu être tirés de la phase 1 de cette étude :

- Leurs étiquettes-énergies sont proches de celles de la moyenne nationale des logements : entre D (moyenne) pour les appartements et F, voire E (faible) dans les autres cas, dans le contexte d'une région climatique définie comme rigoureuse.
- La situation du logement au sein de l'ensemble bâti est un facteur-clé pour la performance : l'appartement en étage courant, pris entre des murs mitoyens et des logements contigus chauffés, obtient la meilleure étiquette-énergie (D). La maison protégée du vent par des Schlupfs obtient (E). La maison indépendante est la plus

<sup>2</sup> Les rapports techniques des 6 autres cas sont disponibles à la demande dans les centres de documentation de la DREAL et de la DRAC Alsace.

énergivore (E ou F).

- Les caves et les greniers sont utiles comme espaces-tampons thermiques : en hiver, leur présence minimise les pertes de chaleur vers l'extérieur, sans les rendre négligeables pour autant. En été, ils atténuent les surchauffes.
- les portes et fenêtres ne représentent que 10 % à 25 % des déperditions totales du logement : elles doivent être prises en compte dans la stratégie globale de rénovation, mais ne représentent pas le premier poste de déperdition. Il ne faut, en effet, pas confondre la perte de chaleur par des défauts de calfeutremments qui peuvent être corrigés (fuites d'air) et les pertes de chaleur à travers les matériaux eux-mêmes (le verre, le bois).
- Les fuites d'air constituent le plus souvent un poste très important de déperditions : l'ensemble des fuites d'air (déperditions par les défauts d'étanchéité) est détectable par un test de perméabilité à l'air. Agir sur les fuites d'air est le premier geste de rénovation, simple et efficace. Par contre, ouvrir les fenêtres de manière normale au quotidien pour aérer et assurer une bonne hygiène du logement ne diminue pas la performance énergétique.
- Les logements anciens ne présentent quasiment aucun pont thermique.
- Les parois sont en équilibre hygrothermique : l'humidité est présente dans les murs, mais en quantité modérée et stable, et ne génère pas de pathologies dans les structures, ni d'inconfort pour les habitants.
- Le confort d'été est souvent meilleur que dans des constructions plus récentes : l'étude l'a démontré pour 5 cas sur 7, par comparaison avec des constructions des années 1970.
- lorsque la construction comporte des murs en torchis, ils ont un rôle positif pour le confort d'été : malgré leur faible épaisseur et inertie, ils ont la capacité de stocker une quantité d'eau importante qui a une influence positive pour le confort d'été : dans un premier temps, l'énergie solaire fait évaporer l'eau en surplus sans réchauffer le mur, ce qui diffère dans le temps et atténue l'intensité le transfert de chaleur de part et d'autre du mur et limite les surchauffes.

Fort de ces enseignements, la phase 2 s'attache à explorer les possibilités en termes de rénovation thermique de ces types, en tirant profit de leurs qualités intrinsèques (valeur patrimoniale, bon confort d'été), en diminuant leurs points faibles (fortes déperditions par les défauts d'étanchéité et par les parois) et en préservant leur comportement hygrothermique spécifique.

### **1.3. Résultats synthétiques de la phase 2 : agir pour rénover le bâti ancien alsacien**

Les observations de la phase 1 ont permis de modéliser les sept logements-types grâce à un logiciel de thermodynamique, sur lesquels un large panel de gestes de rénovation énergétique a été testé et comparé. Trois scénarios de rénovation ont été proposés pour chaque type, et évalué selon cinq critères : gain énergétique, confort d'été, diminution de l'effet de paroi froide en hiver, absence de risque lié à l'humidité dans les murs, respect de l'aspect patrimonial et architectural.

Tous les coûts de travaux ont été estimés, tant en termes de rentabilité que de soutenabilité, et ont été comparés au coût de l'inaction en euros et tonnes de CO<sup>2</sup> non émises.

En synthèse, la 2e phase de l'étude permet de tirer les grands enseignements suivants :

- l'approche de la rénovation doit être multi-critères
- le niveau BBC rénovation peut être atteint pour tous les types étudiés (scénario 1), par une intervention complète sur l'enveloppe qui préserve les caractères principaux des façades et des toitures, un remplacement de la chaudière et la mise en place d'une vmc. cette solution suppose qu'il n'y ait pas de décors intérieurs ou de menuiseries anciennes à conserver.
- il existe des alternatives satisfaisantes pour gagner une à deux classes d'étiquette-énergie, limiter les coûts, agir par étapes et ou/et préserver de manière plus complète la

qualité patrimoniale et architecturale du bâti (scénarios 2 et 3).

- le confort d'été est toujours très sensible à la rénovation thermique. ouvrir la fenêtre la nuit en été sera nécessaire (sauf si contre-indication sur notice vmc double flux). l'aménagement des combles, en supprimant l'espace-tampon du grenier, est défavorable au confort d'été.
- pour les appartements, la réflexion gagnera à être menée à l'échelle de l'immeuble, pour optimiser les travaux et les coûts.
- la pose d'un isolant thermique extérieur est écartée dans presque tous les cas, car elle ne permet pas de conserver les caractéristiques des façades et des toitures. L'isolation extérieure a néanmoins été testée pour la façade sur cour de l'immeuble mitoyen des faubourgs (fiche n°2). l'emploi d'enduits chaux chaux ou d'enduits isolants perspirants, posés comme l'enduit d'origine sur support compatible, est parfois possible.
- La conservation et l'amélioration des menuiseries existantes (fenêtres et portes) s'avèrent, du point de vue du gain énergétique, presque équivalent à leur remplacement, lorsque les murs et les planchers sont isolés. Cette solution peut permettre de préserver les menuiseries anciennes.
- l'impact des matériaux isolants sur la pérennité des murs anciens doit être pris en compte, surtout pour l'isolation par l'intérieur.
  - x la mousse minérale et les enduits isolants perspirants sont adaptés, en s'assurant de leur compatibilité avec le support. Ils permettent de conserver une certaine inertie, assurent une continuité capillaire et une perméabilité à la vapeur, diminuent l'effet de paroi froide. ils sont cependant encore coûteux.
  - x les isolants bio-sourcés (par exemple ouate de cellulose), mis en œuvre dans les règles de l'art, présentent moins de risques que les isolants conventionnels. ils permettent une meilleure continuité capillaire avec les matériaux anciens. Leur surcoût reste modéré (4 à 11 % par rapport aux isolants conventionnels).
  - x les isolants conventionnels, type laine minérale (testé en variante des scénarios 1) sont meilleurs marché mais comportent un risque d'accumulation d'humidité dans les murs s'ils sont mal posés et sont donc à éviter.

## 2. Contours de la phase 2 de l'étude

La phase 2 de l'étude DREAL/DRAC Alsace vise d'une part à proposer des bouquets d'actions de rénovation adaptés à chacun des types définis dans la phase 1 de l'étude, et de proposer une méthode d'évaluation de ces bouquets d'actions selon plusieurs critères. D'autre part, elle a également pour but de comparer et de tirer des enseignements généraux sur l'ensemble des actions de rénovation thermiques disponibles. Un large panel d'actions sera donc testé sur les types modélisés.

Les types de logements étudiés dans cette phase sont issus de la modélisation de logements réels et habités (phase 1).

### 2.1. Différences entre le logement réel et le type modélisé

Pour effectuer la modélisation de la phase 1, nous avons pris un ensemble d'hypothèses qui permettent de se distancier du cas réel, afin de passer du cas particulier à un type représentatif.

Nous avons par exemple considéré dès la phase 1 les logements comme étant tous régulièrement entretenus, alors que certains cas réels présentaient des défauts d'entretien.

De la même manière, en phase 2, nous avons abordé chaque type étudié en faisant abstraction de certaines dispositions trop singulières des cas réels, qui pourraient fausser l'extrapolation à d'autres bâtis du même type. (exemple : salle d'eau rajoutée dans un volume, peu fonctionnelle, dont la prise en compte pourrait fausser les calculs économiques et thermiques, alors qu'elle pourrait être relocalisée dans le cadre d'un projet global, etc.)

Par ailleurs, le type étudié est à chaque fois appréhendé en phase 2 comme étant proche de sa situation initiale. Afin d'approcher de la manière la plus pertinente possible le critère patrimonial, nous avons par exemple considéré qu'il était encore doté de menuiseries en accord avec sa datation et le cas échéant de ses décors intérieurs (moultures, etc.) si nous pensons qu'il en disposait à l'origine.

### 2.2. Type d'actions envisagées

Dans la réalité, le projet de rénovation énergétique n'est souvent pas réalisé seul : une réhabilitation plus complète du bâtiment peut être effectuée et la distribution intérieure repensée.

Dans cette étude, les bouquets d'actions proposés ne concernent que l'action de rénovation énergétique. Il n'y a pas de modélisation d'autres travaux, par exemple de modification de distribution, de recloisonnement ou de modifications fonctionnelles importantes, d'embellissement des pièces, etc.

Seules ont été prises en compte les actions connexes aux actions de rénovation énergétique qui sont indispensables à ceux-ci : par exemple les déplacements et mises en place des radiateurs ont été intégrés aux bouquets d'actions proposés. De la même manière, les modifications électriques induites par la pose d'un isolant (déplacement des prises, reprise du câblage, etc) ont été intégrées, ainsi que les finitions des murs (peinture, dépose repose de plinthe, etc) ou des sols lorsque leur dépose est nécessaire.

Ces actions connexes nécessaires ont été intégrées dans l'évaluation des différents coûts

### 2.3. La mise en œuvre des actions

Les détails de mise en œuvre demandés par les règles de l'art, qui obligent à réaliser des déposes de planchers ou de plafonds, ont été étudiés de façon réaliste afin de ne pas fausser la réalité économique en intégrant toutes les conséquences induites par le projet de rénovation thermique.

L'exemple de la continuité du pare-vapeur, qui doit envelopper l'ensemble du logement (sol

murs, plafonds) est représentatif de ces contraintes nécessitant des déposes, souvent délicates, des revêtements existants pour assurer une continuité parfaite de la membrane. Les travaux induits par une rénovation thermique ont été pris en compte car indissociables d'une mise en œuvre logique et correcte, répondant à la fois au DTU mais aussi à une réalisation propre et efficace.

Certains postes de travaux sont ainsi conséquents, tels que les réseaux existants à déposer le long des murs, qu'il convient de prendre en compte dans le calcul économique (tuyauterie, électricité, etc.). Cependant il ne sera pas envisagé systématiquement le remplacement des émetteurs, ceux existants pouvant être considérés comme réutilisables, les travaux de rénovation thermique n'impliquant pas forcément de revoir les installations de chauffage, à l'exception de la production, dont l'efficacité influe sur le calcul thermique.

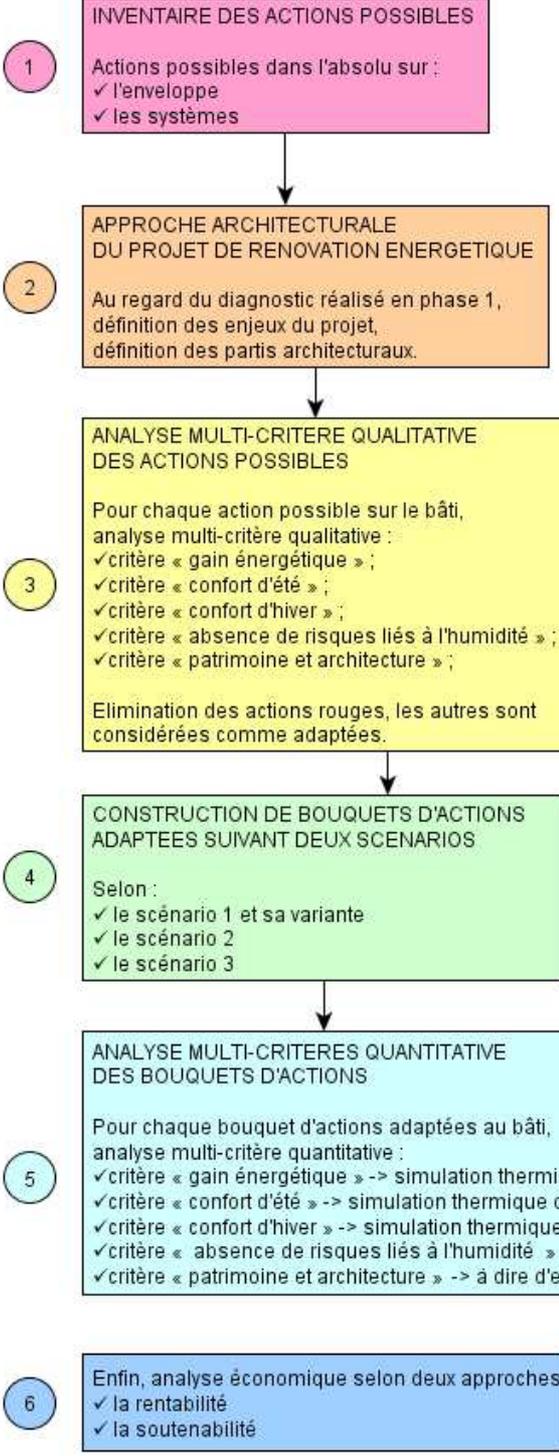
L'étude n'est pas non plus un guide de réalisation et de détails directement applicables. Il conviendra toujours d'étudier le cas précis et vérifier les règles de l'art.

## 3. Méthodologie de la phase 2

La démarche générale de la phase 2, qui constitue une démarche d'évaluation, s'applique à tous les types étudiés au cours de la phase 1. Elle se divise en six parties :

- l'inventaire des actions possibles (disponibles)
- l'approche architecturale du projet de rénovation énergétique ;
- l'analyse multi-critères qualitative des actions possibles ;
- la construction de bouquets d'actions adaptées suivant trois scénarios ;
- l'analyse multi-critères quantitative des bouquets d'actions ;
- l'analyse économique, par l'étude de la rentabilité et de la soutenabilité de ces bouquets d'actions, via les critères suivants :
  - coût total des bouquets d'actions ;
  - temps de retour sur investissement ;
  - évolution des charges énergétiques sur 20 ans avant et après travaux ;
  - évaluation des quantités de CO2 évitées sur 20 ans et monétarisation de ces quantités ;
  - coût mensuel du prêt nécessaire au financement des bouquets d'actions

Le schéma ci-après rappelle l'enchaînement des six étapes.



Élément	Technique	Matériau	
Murs extérieurs	Pas d'action mais amélioration de l'étanchéité à l'air		
	A - Isolation par l'intérieur	1 - Laine minérale en rouleau et pare-vapeur	
		2 - Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur intelligent	
		3 - Mousse de pierre en bloc	
		4 - Liège en panneau	
	B - Isolation par l'extérieur	1 - Polystyrène en panneau	
		2 - Fibre de bois en panneau	
	C - Correction thermique intérieure	1 - Enduit isolant "perspirant"	
		2 - Enduit chaux-charmie	
	D - Correction thermique extérieure	1 - Enduit isolant "perspirant"	



Élément ou système	Technique	Action	Conformations			Patrimoine et Architecture
			Confort	Énergie	Risques	
Murs extérieurs	A - Isolation par l'intérieur	1 - Laine minérale en rouleau et pare-vapeur	Vert	Vert	Vert	Vert
		2 - Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur intelligent	Vert	Vert	Vert	Vert
		3 - Mousse de pierre en bloc	Vert	Vert	Vert	Vert
		4 - Liège en panneau	Vert	Vert	Vert	Vert
	B - Isolation par l'extérieur	1 - Polystyrène en panneau	Vert	Vert	Vert	Vert
		2 - Fibre de bois en panneau	Vert	Vert	Vert	Vert

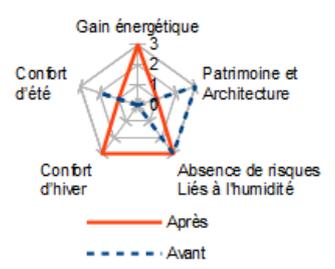
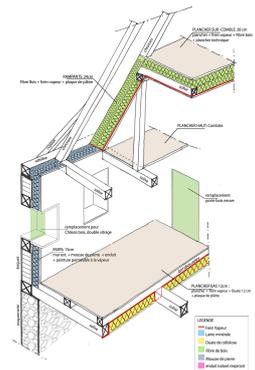


Illustration 1: Démarche générale d'évaluation (source : Cerema)

### 3.1. Inventaire des actions possibles

L'inventaire des actions d'amélioration énergétique possibles tous types confondus est présenté ci-après.

À cette étape du raisonnement, cet inventaire, relativement exhaustif, ne prend pas en compte :

- le bâtiment sur lequel est appliqué l'action ;
- le coût de l'action ;
- le patrimoine ;
- la faisabilité technique de l'action.

#### Liste des actions disponibles

La première des actions (A) listées dans chaque poste concerne l'entretien du bâti. Il s'agit de mettre l'accent sur une conservation des éléments en améliorant leur étanchéité et en restaurant leurs propriétés initiales.

Élément	Technique	Matériau et/ou mise en oeuvre
<b>Murs donnant sur l'extérieur</b>	A – Amélioration de l'étanchéité à l'air, y compris cloisons et refends	1 – Reprises d'enduit ou plâtres dégradés, rejointoiement de moellons ou de briques, colmatage des trous et fissures en partie courante et aux jonctions avec les autres éléments (planchers, passage de gaines, cheminées, etc.)
	B – Correction thermique intérieure, y compris cloisons et refends	1 – Enduit isolant « perspirant », épaisseur 6 cm
		2 – Enduit chaux-chanvre, épaisseur 6 cm
		3 – Béton de chanvre, épaisseur 15 cm
	C – Remplacement du remplissage du pan de bois, y compris cloisons et refends	1 – Béton de chanvre, épaisseur variable
	D – Isolation par l'intérieur, y compris cloisons et refends	1 – Laine minérale en rouleau et pare-vapeur, épaisseur 15 cm
		2 – Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur hygrovariable, épaisseur 15 cm
		3 – Mousse minérale en bloc, épaisseur 15 cm
		4 – Liège en panneau, épaisseur 15 cm
		5 – Polystyrène en panneau, épaisseur 15 cm
E – Correction thermique extérieure	1 – Enduit isolant « perspirant », épaisseur 3 cm	
	2 – Enduit chaux-chanvre, épaisseur 3 cm	
F – Isolation par l'extérieur	1 – Polystyrène en panneau, épaisseur 15 cm	
	2 – Fibre de bois en panneau, épaisseur 15 cm	
	3 – Liège en panneau, épaisseur 15 cm	
<b>Cloisons et refends donnant sur les espaces-tampons uniquement</b>	A – Amélioration de l'étanchéité à l'air	1 – Reprises d'enduit ou plâtres dégradés, colmatage des trous et fissures en partie courante et aux jonctions avec les autres éléments (planchers, passage de gaines, cheminées)
	B – Correction thermique intérieure	1 – Enduit isolant « perspirant », épaisseur 6 cm
		2 – Enduit chaux-chanvre, épaisseur 6 cm
		3 – Béton de chanvre, épaisseur 15 cm
C – Remplacement du remplissage du pan de bois	1 – Béton de chanvre, épaisseur variable	

	D – Isolation par l'intérieur	1 – Laine minérale en rouleau et pare-vapeur, 15 cm
		2 – Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur hygrovariable, épaisseur 15 cm
		3 – Mousse minérale en bloc, épaisseur 15 cm
		4 – Liège en panneau, épaisseur 15 cm
		5 – Polystyrène en panneau, épaisseur 15 cm
<b>Plancher bas</b>	A – Amélioration de l'étanchéité à l'air	1 – Rejointoiement des lames et reprises ponctuelles, colmatage des trous et fissures en partie courante et aux jonctions avec les autres éléments (murs, passage de gaines, cheminées, etc.)
	B – Isolation en sous-face	1 – Laine minérale en vrac et pare-vapeur, épaisseur 12 cm
		2 – Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur, épaisseur 12 cm
	C – Isolation dans le plancher existant	1 – Laine minérale en vrac et pare-vapeur, épaisseur 12 cm
		2 – Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur, épaisseur 12 cm
	D – Isolation sur le plancher existant	1 – Laine minérale en vrac et pare-vapeur, épaisseur 12 cm
		2 – Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur, épaisseur 12 cm
	E – Isolation sur dalle (sol drainé et ventilé sous la dalle)	1 – Polyuréthane en panneau, épaisseur 12 cm (inertie faible)
		2 – Liège expansé en panneau, épaisseur 12 cm (inertie faible)
	F – Isolation (ou correction thermique) sur terre plein	1 – Décaissage si nécessaire + Hérissou ventilé + Dalle + Polyuréthane en panneau, épaisseur 12 cm (inertie faible à forte selon ordre et revêtement)
2 – Décaissage si nécessaire + Hérissou ventilé + Dalle + Liège expansé en panneau, épaisseur 12 cm (inertie faible à forte selon ordre et revêtement)		
3 – Décaissage si nécessaire + Hérissou ventilé à base de granulats (mousse de verre, argile expansée, pierre ponce, pouzzolane), épaisseur 12 cm + Dalle (inertie forte)		
4 – Décaissage si nécessaire + Hérissou ventilé + Béton de chanvre, épaisseur 12 cm		
<b>Plancher haut</b>	A – Amélioration de l'étanchéité à l'air	1 – Rejointoiement des lames et reprises ponctuelles, colmatage des trous et fissures en partie courante et aux jonctions avec les autres éléments (murs, passage de gaines, etc.)
	B – Isolation du plancher du grenier par le dessus	1 – Laine minérale en vrac et pare-vapeur, épaisseur 28 cm
		2 – Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur, épaisseur 28 cm
		3 – Fibre de bois en panneau et frein-vapeur, épaisseur 28 cm
		4 – Béton de chanvre, épaisseur 28 cm
	C – Isolation de la toiture par l'intérieur	1 – Laine minérale en rouleau et pare-vapeur, épaisseur 24 cm
2 – Ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur hygrovariable, épaisseur 24 cm		
3 – Fibre de bois en rouleau et en panneau et frein-vapeur, épaisseur 24 cm		

<b>Fenêtres</b>	D – Isolation de la toiture par l'extérieur	1 – Polystyrène en panneau, épaisseur 24 cm
		2 – Fibre de bois en panneau, épaisseur 24 cm
		3 – Béton de chanvre, épaisseur 24 cm
	A – Amélioration de l'étanchéité à l'air et maintien des volets	1 – Conservation et vérification des châssis, vérification du calfeutrement, réparation éventuelle des baies et des volets
	B – Conservation des châssis, remplacement des vitrages et maintien des volets existants	1 – Simple vitrage épais $U_g = 3,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		2 – Double vitrage $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2$ .
	C – Ajout de double fenêtres, maintien des volets existants	1 – Intérieures, châssis en bois, simple vitrage $U_w = 2,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		2 – Extérieures, châssis en bois, simple vitrage $U_w = 2,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		3 – Intérieures, châssis en bois, double vitrage $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		4 – Extérieures, châssis en bois, double vitrage $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		5 – Intérieures, châssis en aluminium ou PVC, simple vitrage $U_w = 2,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		6 – Extérieures, châssis en aluminium ou PVC, simple vitrage $U_w = 2,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		7 – Intérieures, châssis en aluminium ou PVC, double vitrage $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
8 – Extérieures, châssis en aluminium ou PVC, double vitrage $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$		
D – Remplacement des fenêtres, maintien des volets existants	1 – Châssis en bois, double vitrage $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a – avec petits-bois, b – sans petits-bois	
	2 – Châssis en PVC ou aluminium, double vitrage $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a – avec petits-bois, b – sans petits-bois	
	3 – Châssis en bois, triple vitrage $U_w = 0,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a – avec petits-bois, b – sans petits-bois	
	4 – Châssis en PVC ou aluminium, triple vitrage $U_w = 0,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a – avec petits-bois, b – sans petits-bois	
<b>Porte extérieure du logement</b>	A – Amélioration de l'étanchéité à l'air	1 – Conservation et vérification des châssis, vérification du calfeutrement, réparation éventuelle
	B – Remplacement du dormant de la porte	1 – Conservation de la porte avec modification du dormant et ajout de joints périphérique
	C – Remplacement du vitrage de la porte	1 – Simple vitrage épais $U_g = 4,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
		2 – Double vitrage $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
D – Remplacement de la porte	1 – Châssis en bois, âme isolante, double vitrage $U_d = 1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$	

		2 – Châssis en PVC ou aluminium, âme isolante, double vitrage $U_d = 1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
<b>Ventilation</b>	A – Conservation de l'existant	1 – Ventilation par ouverture des fenêtres et par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe
	B – VMC	1 – Simple-flux 2 – Double-flux avec récupérateur de chaleur et by-pass
<b>Chauffage et ECS</b>	A – Conservation de l'existant	1 – Chaudière fioul vétuste
	B – Chaudière à condensation	1 – Réutilisation des émetteurs existants et des conduits de fumée pour la sortie de la chaudière selon règles de l'art (pas de ventouse en façade)

À noter que pour toutes les actions de rénovation thermique de l'enveloppe, les volets ne sont pas changés et restent donc en l'état, ce qui participe fortement au maintien de la qualité patrimoniale des façades extérieures, mais aussi au confort d'été et d'hiver si les occupants les utilisent de façon adéquate (occultation solaire en été en journée et isolation thermique nocturne en hiver).

## Actions de rénovation thermique des éléments de l'enveloppe

### Précautions

Concernant les parois opaques, il faudra, dans tous les cas, s'assurer de la bonne préparation des supports avant toute action de rénovation thermique. Voici quelques exemples de mauvaises pratiques :

- isoler un mur présentant des traces d'humidité sans en avoir éliminé la cause ;
- isoler un mur avec un matériau capillaire et / ou perméable à la vapeur sans avoir, au préalable, supprimer une éventuelle couche superficielle étanche à l'humidité (papier peint vinyle, enduit ciment, etc.) ;
- isoler un mur avec des isolants sous forme de panneau sans avoir au préalable vérifié la planéité de ce dernier.

### Type d'isolants étudiés

L'état de l'art réalisé au démarrage de la phase 2 en prémisses aux études de bouquets d'actions, nous a interpellé sur la multiplicité des isolants disponibles. Nous ne pouvons malheureusement appliquer à chaque cas un panel de possibilités, mais en revanche, en fonction des caractéristiques (épaisseurs, mise en œuvre, conductivité thermique  $\lambda$ , facteur de résistance à la diffusion de vapeur  $\mu$ ) nous avons regroupé certains isolants, permettant ainsi d'éventuellement les remplacer par d'autres ayant des propriétés identiques.

Seuls certains matériaux isolants ont été répertoriés dans cet inventaire. Ils ont été choisis, car ils représentent des grandes familles qui diffèrent de par :

- leurs propriétés hygrothermiques ;
- l'origine de la matière première.

Le tableau suivant présente les différentes familles de matériaux isolants :

Différentes familles de matériaux isolants	Propriétés hygrothermiques	Origine de la matière première	Autres matériaux isolants de la même famille
<b>Polystyrène</b>	Peu capillaire Peu hygroscopique Peu perméable à la vapeur d'eau	Synthétique (à base de pétrole)	Polystyrène extrudé ou expansé
<b>Polyuréthane</b>	Non capillaire Non hygroscopique Non perméable à la	Synthétique (à / base de pétrole)	

	vapeur d'eau		
<b>Laine minérale</b>	Peu capillaire Peu hygroscopique Très perméable à la vapeur d'eau	Minéral	Laine de roche, laine de verre
<b>Mousse minérale<sup>3</sup></b>	Très capillaire Très hygroscopique Très perméable à la vapeur d'eau	Minéral	Silicate de calcium
<b>Granulats isolants</b>	Peu capillaire Peu hygroscopique Très perméable à la vapeur d'eau	Minéral	Mousse de verre, argile expansée, pierre ponce, pouzzolane
<b>Enduit isolant « perspirant »<sup>4</sup></b>	Très capillaire Très hygroscopique Très perméable à la vapeur d'eau	Minéral	/
<b>Béton de chanvre</b>	Très capillaire Très hygroscopique Très perméable à la vapeur d'eau	Végétal et minéral	/
<b>Enduit chaux-chanvre</b>	Très capillaire Très hygroscopique Très perméable à la vapeur d'eau	Végétal et minéral	Enduit avec apport de fibres végétales
<b>Liège</b>	Peu capillaire Peu hygroscopique Peu perméable à la vapeur d'eau	Végétal	/
<b>Ouate de cellulose</b>	Capillaire Hygroscopique Très perméable à la vapeur d'eau	Végétal	Laine de mouton, laine de lin, laine de chanvre, etc.
<b>Fibre de bois</b>	Peu capillaire Hygroscopique Perméable à la vapeur d'eau	Végétal	/

À titre indicatif, l'ensemble des propriétés thermiques et hygriques des matériaux isolants étudiés sont fournies [en annexe 1](#).

### Épaisseur de l'isolation

Le choix a été fait de d'attribuer, pour la plupart des actions d'isolation des parois opaques, l'épaisseur des isolants nécessaire à l'obtention du crédit d'impôt Transition Energétique. Ce dernier fait office, aujourd'hui, de référence en ce qui concerne le choix de l'épaisseur des isolants, notamment pour l'attribution de l'éco-prêt à taux zéro et des aides financières de l'ANAH<sup>5</sup> (Agence Nationale de l'Habitat).

Nous rappelons ici les épaisseurs d'isolants nécessaires pour différentes parois opaques :

	<b>Épaisseur e d'isolants autres que béton de chanvre (<math>\lambda = 0,04</math> W/m.K)</b>
<b>Planchers bas sur sous-sol, sur vide sanitaire ou sur passage ouvert</b>	12 cm

3 Pour une définition de la mousse minérale, voir 7.1

4 idem

5 [Le guide des aides, établi au 1<sup>er</sup> mars 2014](#), ANAH, à partir de la page 20 « Liste des travaux recevables »

<b>Murs en façade ou en pignon</b>	15 cm
<b>Planchers de combles perdus</b>	28 cm
<b>Rampants de toitures, plafonds de combles</b>	24 cm

Le béton de chanvre disposant, au mieux, d'une conductivité thermique  $\lambda$  de 0,06 W/m.K, il n'est pas possible d'obtenir le crédit d'impôt Transition énergétique pour ces épaisseurs.

À noter que :

- en cas d'actions par l'intérieur sur les murs donnant sur l'extérieur, les cloisons et refends donnant sur des espaces-tampons sont isolés par une épaisseur de 2/3 de celle des murs donnant sur l'extérieur, soit 10 cm d'isolation ou 4 cm de correction thermique, comme cela est préconisé à la page 20 du Référentiel technique de rénovation BBC pour maisons individuelles du programme « Je rénove BBC » d'EDF/ES et la Région Alsace.
- en cas d'actions sur les cloisons et refends donnant sur des espaces-tampons uniquement, ces derniers sont isolés par une épaisseur de 15 cm ou corrigé thermiquement par une épaisseur de 6 cm. Nous considérons en effet que lorsque cette seule action est sélectionnée, il est nécessaire d'être plus exigeant sur l'épaisseur d'isolant, puisque les murs donnant sur l'extérieur ne seront pas isolés. Cette action, puisqu'elle ne concerne pas les murs donnant sur l'extérieur, n'est pas éligible au crédit d'impôt Transition énergétique.

#### Épaisseur de la correction thermique

Pour les actions de correction thermique sur les murs donnant sur l'extérieur et les cloisons et refends donnant sur des espaces-tampons, l'épaisseur des enduits n'a pas été fixée à partir du crédit d'impôt Transition Énergétique, car cela conduit à des épaisseurs très importantes (plus de 70 cm pour un enduit chaux-chanvre et plus de 20 cm pour un enduit isolant), mais à partir de retours d'expériences :

- 6 cm en intérieur, à savoir l'épaisseur maximale étudiée par J-P. Oliva et S. Courgey dans L'isolation thermique écologique (2010, éditions terre vivante, p.159).
- 3 cm en extérieur, à savoir l'épaisseur moyenne d'un enduit traditionnel, toujours d'après les mêmes auteurs.

Ces épaisseurs ne permettent donc pas de bénéficier du crédit d'impôt Transition Énergétique.

Rappelons également que les murs anciens ne sont pas soumis à la Réglementation thermique et qu'il n'y a donc pas d'obligation à ce que leurs résistances thermiques, une fois corrigés thermiquement, soient supérieures à l'exigence de 2,3 m<sup>2</sup>.K/W. La résistance thermique du mur corrigé est toujours inférieure à 2,3 m<sup>2</sup>.K/W pour une correction thermique avec un enduit perspirant isolant ou avec un enduit chaux-chanvre.

#### Étanchéité à l'air des éléments de l'enveloppe (parois opaques et parois vitrées)

Toutes les actions de rénovation thermique des éléments de l'enveloppe supposent une amélioration de l'étanchéité à l'air de ces derniers. Cependant, il est apparu comme nécessaire d'un point de vue patrimonial et économique de disposer d'actions pour lesquelles seules l'amélioration de l'étanchéité à l'air de l'élément était considérée.

En effet, dans certains cas mis en évidence dans la phase 1, la seule amélioration de l'étanchéité à l'air d'un élément peut réduire les consommations énergétiques de manière significatives, pour un investissement financier modéré.

Cette action est donc à considérer comme une action à part entière. Elle est souhaitable à tout point de vue, car les problématiques liées à l'étanchéité à l'air sont souvent connexes des désordres sanitaires et relèvent souvent de l'entretien courant.

#### Associations membranes gérant l'apport de vapeur / isolants

Dans l'étude « Habitat ancien en Alsace », le choix a été fait d'associer un frein-vapeur hygro-réglable à la ouate de cellulose pour les murs, un frein-vapeur à la ouate de cellulose pour les planchers haut et bas et un pare-vapeur à la laine minérale pour les murs et les planchers

haut et bas.

Ce choix reflète une réalité technique :

- pare-vapeur et ouate de cellulose sont rarement associés car on se priverait des propriétés capillaires et hygroscopique de la ouate de cellulose et le pare-vapeur empêcherait la ouate de cellulose de se débarrasser de l'humidité qu'elle contient
- il faut ainsi différencier clairement l'association laine minérale / pare-vapeur et l'association ouate de cellulose / frein-vapeur
- l'association de la ouate de cellulose avec un frein-vapeur hygro-variable pour les murs correspond à la nécessité de pouvoir évacuer l'humidité lorsque l'isolant est humide ou au contraire de ne pas en apporter lorsque l'isolant est sec
- l'association de la ouate de cellulose avec un frein-vapeur pour les planchers haut et bas correspond au faible risque que l'isolant soit humide

### Actions sur les systèmes<sup>6</sup>

Seuls certains systèmes ont été répertoriés. L'accent est en effet mis sur les actions de rénovation thermique des éléments de l'enveloppe pour lesquels les interactions avec le patrimoine sont les plus sensibles.

Les actions sur l'enveloppe sont de plus toujours à envisager avant les actions sur les systèmes. En effet, en isolant l'enveloppe, on diminue les besoins de chauffage et donc la puissance des systèmes à mettre en œuvre.

## 3.2. Approche architecturale du projet de rénovation énergétique

L'approche architecturale permet d'énoncer les enjeux patrimoniaux et architecturaux du type étudié, que devra respecter le projet d'amélioration énergétique. Ces enjeux sont définis à partir des enjeux généraux de conservation du patrimoine et des caractéristiques patrimoniales et descriptions architecturales du type étudié en phase 1. Celles-ci sont listées et synthétisées, et permettent de définir les éléments à préserver.

Ces enjeux consistent à conserver la matérialité et la perception des éléments d'origine, en hiérarchisant : importance des façades extérieures par rapport aux éléments intérieurs pour des notions d'intérêt général, ce qui est en adéquation avec le système législatif (codes de l'urbanisme, du patrimoine et de l'environnement).

Par ailleurs, l'analyse, réalisée en phase 1, a permis de révéler le fonctionnement thermique initial et actuel du type (par exemple pour certain type, la faible isolation de certaines parties du logement permettait de faciliter la diffusion de la chaleur émise par un foyer unique, ce qui ne correspond plus au fonctionnement actuel). Le parti architectural va donc devoir déterminer le nouveau fonctionnement thermique, ainsi que la zone à chauffer et/ou à isoler. Le parti architectural va aussi permettre de déterminer l'échelle d'intervention : à l'échelle du logement ou à l'échelle de l'immeuble.

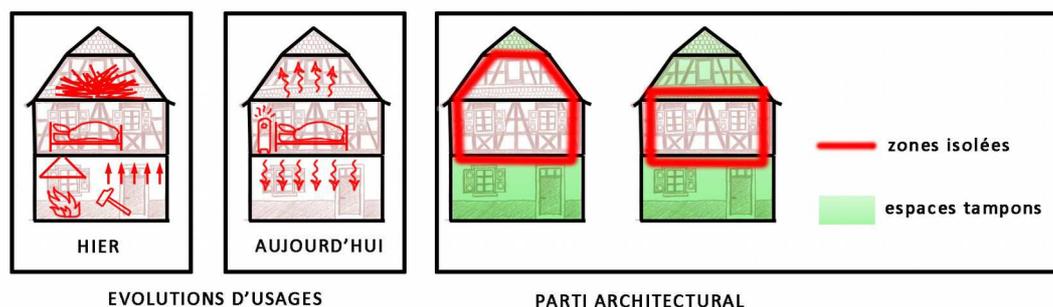


Illustration 2 : exemple d'analyse du fonctionnement thermique initial et projeté

Ce parti architectural ne concerne que les travaux liés à l'amélioration énergétique : pour rester dans le cadre de l'étude, il ne prend pas en compte les éventuels travaux de restructuration internes du logement qui accompagnent parfois dans la réalité les travaux d'amélioration énergétique.

<sup>6</sup> Un système de chauffage comprend une source et un émetteur de chaleur, éventuellement un système de stockage et de transport de cette chaleur.

### 3.3. Analyse multi-critères qualitatives des actions possibles

Cette analyse permet d'effectuer un premier tri, parmi toutes les actions possibles du point de vue technique, entre les actions adaptées au type étudié et les actions non adaptées selon les enjeux pointés.

Pour ce faire, cette analyse prendra la forme d'un tableau multicritères, où les critères étudiés pour chaque action sont les suivants :

- la diminution des consommations énergétiques (critère « gain énergétique »).
- le maintien du confort d'été (critère « confort d'été »).
- la diminution de l'effet de paroi froide en hiver (critère « diminution de l'effet de paroi froide en hiver »).
- le maintien d'un équilibre hygrothermique dans les murs et un renouvellement suffisant de l'air intérieur (critère « absence de risques liés à l'humidité »).
- la préservation du patrimoine et la qualité architecturale du bâtiment (critère « patrimoine et architecture »), des enjeux patrimoniaux et caractéristiques architecturales à préserver qui ont été identifiés pour le type étudié.

Ce tri s'effectue à dire d'expert, c'est-à-dire qualitativement, mais il sera argumenté pour chaque critère. L'objectif est de choisir, selon le scénario sélectionné, un bouquet d'actions adaptées.

Une échelle de quatre couleurs, allant du vert au rouge, est appliquée à chaque action, selon le critère étudié :

- vert : l'action répond bien au critère énoncé. Par exemple, du point de vue du critère « gain énergétique », l'isolation du plancher haut par 28 cm d'isolant se verra attribuer la couleur verte.
- jaune : l'action répond au critère énoncé. Par exemple, du point de vue du critère « confort d'été », l'isolation de la toiture par l'intérieur avec de la fibre de bois se verra attribuer une couleur jaune, car cette action diminue le confort d'été mais moins que si l'isolant choisi avait été un isolant disposant d'une inertie faible.
- orange : l'action répond mal au critère énoncé. Par exemple, du point de vue du critère « absence de risques liés à l'humidité », l'isolation par l'intérieur en laine minérale n'est pas capable de gérer un apport d'humidité et le risque de percement de la membrane pare-vapeur est élevée en rénovation. Ces deux constats font que cette action se verra attribuer la couleur orange.
- rouge : l'action ne répond pas au critère énoncé. Par exemple, l'isolation par l'intérieur, par polystyrène en panneau d'épaisseur 15cm a reçu une note rouge pour le critère « absence de risque lié à l'humidité » dans le cas type III.02 (fiche8)

Une action est considérée comme non adaptée au type étudié si l'un des critères étudié s'est vu attribuer la couleur rouge. L'argumentaire conduisant au choix de la couleur est développé dans la case du tableau d'analyse des actions qui figure dans le rapport technique de chaque type.

Au terme de cette analyse multi-critères, les actions qui se sont vues attribuer la couleur rouge pour un des 5 critères sont éliminées et ne seront pas choisies pour l'élaboration des bouquets d'actions. En effet, ces actions ne sont pas possibles techniquement ou présentent un risque trop important pour le bâtiment, en termes de pérennité des structures (risque d'accumulation d'humidité) ou en en termes de préservation de la qualité patrimoniale et architecturale.

#### **Précisions sur l'élaboration du critère « patrimonial et architectural »**

L'élaboration de ce critère complexe a été explicité de façon à permettre de partager son appréciation.

Celle-ci se fait en fonction :

- de la hiérarchisation de la préservation des éléments vus de l'extérieur sur ceux vus à

l'intérieur, conformément aux lois de protection du patrimoine (sauf pour le cas où il existerait un dispositif intérieur particulièrement remarquable et/ou protégé) ;

- du respect des grands principes de restauration du patrimoine, notamment:

- importance de la conservation de la matière d'origine,
- importance de la perception de la matière d'origine et souvent de sa patine, qui est un marqueur de son histoire
- préférence de l'usage des matériaux et techniques traditionnelles
- préservation de l'habitabilité des espaces

Ainsi, les actions se verront attribuer les couleurs suivantes :

Couleur verte :

- quand l'action permet le maintien de l'aspect extérieur et intérieur, et est réalisée par conservation de la matière d'origine (avec réparation éventuelle) sans ajout visible et sans modification d'aspect, et sans modifier l'habitabilité des espaces;
- OU quand l'action modifie l'aspect de l'extérieur (et maintien l'aspect intérieur) mais permet de restituer un état d'origine disparu, si celui-ci présentait une valeur architecturale et s'il est attesté par de la documentation, et est réalisée en conservant la matière d'origine avec ajout de matière posée de façon traditionnelle, et sans modification de l'habitabilité des espaces ;

Couleur Jaune :

- quand l'action permet le maintien de l'aspect extérieur et modifie l'aspect intérieur, en conservant la matière d'origine avec ajout de matière nouvelle, mais avec reproduction de l'aspect de la matière d'origine, à la fois en épaisseur et en finition de surface, et sans impact sur l'habitabilité des espaces ;

Couleur Orange :

- quand l'action permet le maintien de l'aspect extérieur et modifie l'aspect intérieur, en conservant la matière d'origine avec ajout de matière nouvelle, mais sans reproduction de l'aspect de la matière d'origine et des finitions non traditionnelles et sans impact négatif sur l'habitabilité des espaces;
- OU quand l'action modifie l'aspect extérieur ou intérieur en supprimant de la matière d'origine mais avec restitution d'un aspect traditionnel à la fois en épaisseur et en finition de surface; et sans impact négatif sur l'habitabilité des espaces;

Couleur Rouge :

- quand l'action modifie l'aspect extérieur, permet la conservation de la matière d'origine mais avec ajout de matière visible à l'extérieur ne permettant pas de finitions traditionnelles ; sans impact négatif sur l'habitabilité des espaces ;
- OU quand l'action modifie l'aspect extérieur en supprimant de la matière d'origine et en la substituant par un matériau ne permettant pas de finitions traditionnelles, sans impact trop conséquent sur habitabilité des espaces ;
- OU quand l'action supprime de la matière d'origine représentant une perte patrimoniale trop importante ;
- Ou quand l'action a un impact trop négatif sur l'habitabilité des espaces ;

## Analyse qualitative des enjeux patrimoniaux liés aux façades

### Actions sur les murs donnant sur l'extérieur

	<p>Si conservation des éléments existants (boiseries, plâtres, enduits d'origine) avec restauration et amélioration de l'étanchéité à l'air, sans ajouts ni substitution.</p> <p>Certains ajouts peuvent être admis dans le cas d'une restitution d'éléments traditionnels disparus sur la base de preuves documentaires (enduits) mais assurant la conservation de la matière originelle.</p>	<p>Si pose à l'intérieur d'un enduit à capacité avec une finition traditionnelle et ayant un faible impact sur les surfaces habitables intérieures assortie d'une repose des éléments d'architecture (moultures, etc) OU pose d'un isolant intérieur impactant peu les surfaces, et permettant une finition traditionnelle des supports.</p>	<p>Si pose d'une isolation intérieure permettant ou non une finition des supports de type traditionnel mais impactant considérablement les surfaces habitables ou ayant des conséquences sur les éléments d'architecture (moultures, allèges, etc) nécessitant leur déplacement ou leur reproduction.</p>	<p>Si pose d'un isolant thermique extérieur (polystyrène, fibre de bois, liège, enduit perspirant, etc) les caractéristiques architecturales et les modénatures (encadrements, soubassements, ordonnancement) seront masquées et les surfaces homogénéisées dans le cas de pose en panneaux.</p>
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères qualitatifs				
Note servant à l'analyse multi-critère quantitative	3	2	1	0

#### **L'isolation par l'extérieur a reçu le plus souvent une coloration rouge :**

Bien souvent, la pose d'une isolation thermique extérieure :

- masque les surfaces de façades existantes, la matière d'origine ainsi que les modénatures
- modifie la composition des façades (élargissement des cotés, rétrécissement des baies, réduction des débords de toit, inversion du socle...), elle appauvrit les détails de composition (bandeaux, encadrements, parfois même suppression de volets, balcons, marquises...)
- la pose par plaque raidit l'aspect de la façade



*Illustration 3: Série de maisons identiques, à gauche, mise en œuvre d'une ITE et remplacement des fenêtres et des volets, à droite rénovation extérieure avec conservation des éléments (source ODM)*

**La correction thermique extérieure par enduits à capacités isolantes, perspirants ou chaux-chanvre a reçu, selon le cas, une couleur rouge ou verte :**

hormis la notion de planéité des surfaces, les mêmes arguments que pour l'ITE peuvent être utilisés pour attribuer une couleur rouge à la correction thermique extérieure sur un bâtiment en colombage par exemple. Cependant, une couleur verte pourra être attribuée, si les recherches historiques, permettent d'affirmer avec certitude que son pan de bois avait été conçu pour être enduit (pan de bois non décoratif destiné à être enduit). Dans ce cas l'enduit à capacités isolantes, chaux-chanvre ou perspirant (s'il est compatible avec le support), posé de la même façon que l'enduit d'origine pourrait alors être étudié sur les façades extérieures.

### Actions sur les planchers et la toiture

	<p>SI conservation des éléments existants (moulurations, plâtres, d'origine) avec restauration et amélioration de l'étanchéité à l'air</p> <p>Conservation de la visibilité des éléments. SI plancher haut de comble non utilisé, pas de contrainte patrimoniale.</p>	<p>Dans le cas d'absence de décors ou de moulures sur les plafonds existants, l'isolation entre solives pourrait être envisagée avec une finition lambrissée ou en plâtre traditionnel sur support, selon le type étudié.</p>	<p>SI pose d'isolants dans les planchers existants fermés, obligation de dépose complète pour pose de la membrane et risque de dégradation des éléments originaux, malgré la conservation de la visibilité des éléments.</p> <p>SI isolation du toit par l'intérieur, nécessité de pose d'un pare-pluie. Cette disposition supprime la visibilité de la charpente et empêche son contrôle sanitaire après intervention.</p>	<p>SI rehausse des planchers, disparition de la visibilité de l'élément originel et modification des proportions intérieures et des éléments d'architecture (portes, allèges de fenêtres, décors, etc). Cette action a un impact très important sur les dispositions intérieures</p> <p>SI rehaussement du toit par sur-isolation, modification des proportions extérieures, et impact très visible.</p>
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères qualitatifs				
Note servant à l'analyse multi-critère quantitative	3	2	1	0

### L'isolation de la toiture par l'extérieur (procédé dit « sarking ») a reçu le plus souvent une couleur rouge :

ce procédé modifie les proportions du toit et des rives, ce qui impacte l'aspect des bâtiments et altère leur caractère patrimonial. Il reçoit, dans bien des cas, une note rouge.

*Illustration 4: exemple d'isolation du toit par l'extérieur : les proportions d'une moitié de cette maison bi-famille sont modifiées, le toit surélevé, le plan de toiture raidi et les rives épaissies. Photo ODM*



### Actions sur les fenêtres

	<p>SI conservation des éléments existants (fenêtre d'origine) avec restauration, et amélioration de l'étanchéité à l'air avec éventuellement remplacement du vitrage existant par un simple vitrage épais.</p> <p>SI conservation du châssis existant et pose d'une double-fenêtre en tableau intérieur ou extérieur, dans le cas où ces doubles châssis extérieurs auraient pré-existés sur le type.</p>	<p>SI pose d'une double-fenêtre en tableau intérieur ou extérieur et conservation du châssis existant après amélioration de l'étanchéité à l'air (modification de la façade ou de l'ébrasement intérieur)</p> <p>Cette action peut être plus défavorable dans certains cas, les ébrasements n'étant pas forcément adaptés à cette solution (orange)</p>	<p>SI remplacement de la fenêtre existante, sans valeur patrimoniale, par un châssis bois muni d'un double vitrage. (modification de la perception de la façade, suppression des éléments d'origine, diminution de l'éclairage des pièces)</p>	<p>SI suppression de la fenêtre existante qui a une valeur patrimoniale, ou si remplacement par un châssis en matériau non traditionnel (modification de la perception de la façade, suppression des éléments d'origine, diminution de l'éclairage des pièces, matériau incompatible avec les typologies architecturales : matériau rapporté, couleur, impossibilité de reproduire les détails existants (rejingots, doucines, etc)</p>
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères qualitatifs				
Note servant à l'analyse multi-critère quantitative	3	2	1	0

### Les fenêtres

Elles représentent un élément à valeur patrimonial souvent sous estimé.

- En effet, les fenêtres anciennes sont des ouvrages de menuiseries remarquables par le détail des moulures et des assemblages, et par la qualité des bois. Ces ouvrages anciens sont devenus très rares dans certains secteurs, où jusqu'à 90 % des fenêtres anciennes ont été remplacées. Celles restantes représentent parfois les derniers jalons pouvant illustrer l'évolution de techniques et des styles, ce qui en fait un patrimoine à préserver absolument. Leur suppression correspond à la perte d'un élément à valeur patrimoniale et reçoit une couleur rouge.
- De plus les fenêtres appartiennent à la composition des façades autant que les éléments de modénatures, moulures ou sculptures de façade. Il en est de même pour les volets qui les accompagnent. Elles représentent donc un enjeu esthétique important.
- Il est à rappeler qu'il ne faut pas confondre les déperditions thermiques liées au défaut d'étanchéité à l'air et celles liées aux transferts de chaleur par les parois. La phase 1 de l'étude a mis en évidence que les fenêtres ne constituaient pas le premier poste de déperditions, alors que leur remplacement est souvent le premier geste d'intervention.

- Le remplacement des fenêtres ne permet généralement pas de maintenir les caractéristiques architecturales et qualités esthétiques des fenêtres anciennes
- Les matériaux plastique et métal ne permettent pas de reproduire l'aspect de surfaces ni les multiples moulures existantes, ce qui représente un appauvrissement des styles. De même, les fenêtres en bois de série ne reproduisent pas précisément les moulures et profils et petits bois d'origine, ce qui représente un appauvrissement de détail. Les rejingots sont souvent métalliques. L'épaississement des profils entraîne une perte de jour. De plus, les détails liés à la lame d'air (brillance des cadres métalliques, réflexion des cadres et petits bois sur les deux ou trois verres avec effet de parallaxe) rend très visible le caractère non traditionnel de cet élément. Le remplacement des fenêtres ne pourra s'envisager que si celles-ci sont déjà récentes et sont sans valeur patrimoniale. Les nouvelles fenêtres devront avoir des profils et petits bois adaptés, ainsi que le détail des entrées d'air nécessaire aux VMC, qu'il est possible de masquer (suppression d'un joint, insertion d'une réglette derrière une traverse ou dans un caisson de volet roulant, cf. illustration 6)

La conservation des fenêtres anciennes doit donc être privilégiée, en améliorant leur étanchéité à l'air. Il sera possible de rajouter des joints, qui permettent de réduire les entrées d'air incontrôlées.

Si le vitrage n'est pas ancien (s'il ne s'agit pas d'un verre soufflé) et si le cadre est suffisamment solide, il est possible de remplacer le vitrage par un vitrage épais et un mastic à capacité isolante.

Dans les cas où il existait une double fenêtre extérieure, il sera possible de la reposer. Il est aussi parfois possible de poser une double fenêtre intérieure

Dans le cas où le changement des fenêtres pour des châssis neufs en bois avec double-vitrage s'imposera néanmoins, il conviendra de prendre garde aux produits standardisés dont les épaisseurs et dessins pourraient altérer l'aspect de la façade. Il y a donc un travail de dessin à réaliser pour que les nouveaux châssis soient les plus fidèles possibles aux profils anciens. Le poids des vitrages oblige souvent à prendre des cadres plus résistants. Il faut cependant essayer de conserver le plus de clair de vitrage possible, la mise en œuvre de profils plus épais réduisant d'autant la surface vitrée et donc l'éclaircissement des pièces. Ce critère est d'autant plus défavorable sur des châssis munis de triple-vitrage pour les raisons



*Illustration 5: Remplacement de châssis bois : appauvrissement des moulures, modification des proportions (photos avant/après – source STAP 67)*

précitées, surtout sur des typologies dont les baies sont de tailles modestes.

Les volets, présents sur la plupart des bâtiments anciens, sont souvent négligés dans leur perception urbaine et leur valeur patrimoniale, alors même qu'au-delà de leur participation à la lecture de l'édifice et à l'animation de la façade, ils jouent un rôle de protection thermique important, contre le soleil en été et contre le froid en hiver. Ils sont donc à conserver.

### Actions sur les portes extérieures

	SI conservation des éléments existants (porte d'origine) avec restauration, amélioration de l'étanchéité à l'air, remplacement du vitrage existant par un simple vitrage épais.	Remplacement du dormant pour une meilleure étanchéité avec conservation de l'ouvrant originel et ajout de joints périphériques.	Si réfection à l'identique de la porte, mais avec remplacement complet de la matière d'origine.  Si pose d'une porte à âme isolante avec reproduction des détails et des modénatures	SI suppression de la porte existante par un châssis en matériau non traditionnel et/ou perte des détails architecturaux (modification de la perception de la façade, suppression des éléments d'origine, matériau non durable et incompatible avec les typologies architecturales : matériau rapporté, couleur, impossibilité de reproduire les détails existants (rejingots, doucines, etc)
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères qualitatifs				
Note servant à l'analyse multi-critère quantitative	3	2	1	0

#### Les portes :

Les portes représentent, comme les fenêtres, un élément à très forte valeur patrimoniale. En effet, la porte est un élément de la façade qui a le plus souvent été soigneusement travaillé car elle a une fonction symbolique d'accueil. Sa suppression représente une perte patrimoniale et sera une action rouge si la porte est d'origine ou ancienne.

De plus, les portes anciennes ont une qualité de détails moulures, sculptures et souvent des éléments de ferronnerie ou de serrurerie et vitraux, qu'un remplacement ne peut pas forcément reproduire, ou à des coûts très élevés. Le remplacement risque donc de se faire par des portes de série, ce qui conduit à une banalisation et un appauvrissement architectural. Le remplacement des portes devrait donc recevoir la couleur rouge dans beaucoup de cas, notamment les cas où la porte du logement est vue de l'extérieur.

Dans le cas où la porte est plus récente et peut être remplacée, il faudra être vigilant sur l'aspect : par son positionnement dans la composition de la façade et dans la cage d'escalier, l'impact visuel de cet élément est très important. Les détails devront être reproduits et les matériaux respectés. En effet, le remplacement des portes avec un matériau non traditionnel se révèle très impactant du fait de l'importance de la surface de cet élément.

La technique de conservation de l'ouvrant et de remplacement du dormant, assortie de la mise en place de joints périphériques, permet de conserver l'essentiel de la modénature et de l'authenticité de la porte et assure une meilleure étanchéité à l'air.

Les résultats de la phase 2 ont montré que la conservation de l'ouvrant de la porte d'entrée du logement est quasiment équivalente à son remplacement sur le plan énergétique lorsque les murs et les planchers sont également isolés



Illustration 6: remplacement de portes d'entrées, induisant une perte patrimoniale et une altération architecturale. Or des solutions efficaces permettant l'amélioration thermique des portes existantes sont possibles

### Actions sur la ventilation

	SI conservation des éléments existants et amélioration de l'étanchéité à l'air par entretien courant (par exemple pour les fenêtres : joints et réglette OU mise en place de joints sur 2 ou 3 côtés permettant une entrée d'air équivalente, respectant les besoins de ventilation sanitaire du logement et évitant l'impact visuel de la réglette)	SI nécessité de pose d'entrées d'air sur châssis existant ou neuf non vues de l'extérieur	SI VMC décentralisée, pas de besoin de gaines, mais nécessité d'installation de moteur dans les châssis de chaque pièce, impactant les façades ou les dispositions intérieures. Si nécessité d'installer des entrées d'air vues de l'extérieur	SI VMC double flux, nécessité d'un réseau de gaine et mise en œuvre de faux plafonds, souvent incompatibles avec les dispositions intérieures.  SI absence d'action sur la ventilation mais changement des menuiseries extérieures étanches à l'air (risques de désordres intérieurs)
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères qualitatifs				
Note servant à l'analyse multi-critère quantitative	3	2	1	0

La mise en place d'une VMC, simple ou double flux, est obligatoirement associée à une modification substantielle, soit des châssis extérieurs (entrées d'air pour la simple flux), soit à la mise en place d'un réseau de gaine alimentant les différentes pièces en air neuf et en

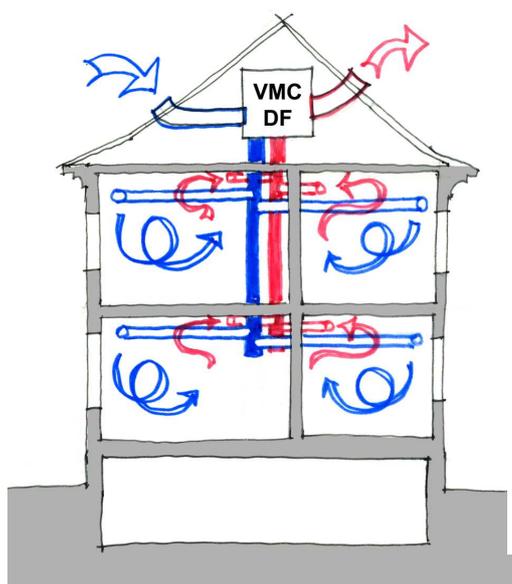
reprise d'air.

La VMC simple flux aura un impact sur l'aspect des fenêtres ou des portes, avec l'insertion de grille assurant l'entrée d'air suffisante dans les pièces (voir remarques sur les fenêtres).

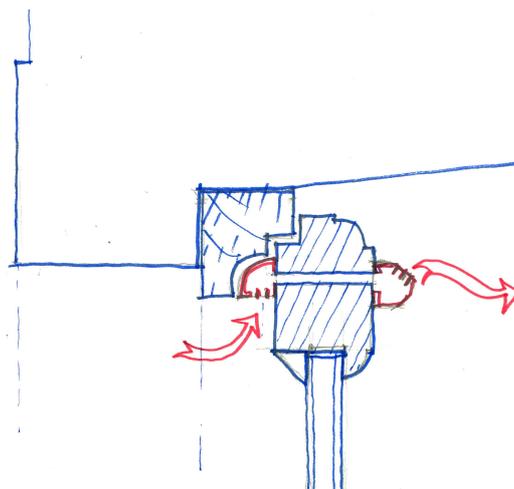
La VMC double flux a un impact sur les espaces intérieurs. Sa mise en place nécessite donc d'avoir des plafonds suffisamment haut pour permettre la réalisation de soffites dans lesquelles les gaines seront cachées.

Pour desservir des maisons à plusieurs niveaux, il faut aussi trouver des conduits verticaux assurant la distribution depuis la centrale double-flux (souvent dans les combles) jusqu'au rez-de-chaussée.

La présence de moulures ou d'éléments pa en place d'une VMC double-flux.



*Illustration 7: importance du volume occupé par le matériel et son impact sur l'habitabilité des espaces (dessin ODM)*



*Illustration 8: Coupe schématique de principe d'insertion d'une entrée d'air masquée derrière le dormant de la fenêtre, invisible à l'extérieur (dessin ODM)*

*Pour les fenêtres existantes, pour assurer la ventilation sanitaire nécessaire et équivalente à celle effectuée par une réglette, il peut parfois suffire de ne mettre des joints étanches que sur deux ou trois côtés des ouvrants*

### Actions sur les systèmes

	SI conservation des éléments existants (radiateurs, tuyauterie, etc) et remplacement de la chaudière sans modification extérieure (pas de ventouse) avec réutilisation de conduits de fumée existants, selon règle de l'art	SI conservation des éléments existants (radiateurs, tuyauterie, etc) et remplacement de la chaudière sans modification extérieure (pas de ventouse) avec création de nouveaux conduits d'aspect traditionnel	SI conservation des éléments existants (radiateurs, tuyauterie, etc) et remplacement de la chaudière sans modification extérieure (pas de ventouse) avec création de nouveaux conduits d'aspect non traditionnels	SI conservation des éléments existants (radiateurs, tuyauterie, etc) et remplacement de la chaudière avec modification extérieure (ventouse en façade)
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères qualitatifs				
Note servant à l'analyse multi-critère quantitative	3	2	1	0



Illustration 9: Chaudières murales à ventouse, avec sorties extérieures (source ODM)

### 3.4. Construction des bouquets d'actions adaptées suivant trois scénarios

Un bouquet d'actions est la traduction en actions d'un scénario illustrant une conception particulière de la rénovation énergétique.

Les trois scénarios sélectionnés ici illustrent donc trois conceptions différentes de la rénovation énergétique, qui peuvent être traduits au moyen d'un algorithme de la manière suivante :

- le scénario 1, qui privilégie la performance énergétique. Il regroupe dans un même bouquet d'actions les actions les plus performantes en termes de gain énergétique. L'ensemble du logement (enveloppe et système) est concerné par ces actions.
- le scénario 2, qui agit sur les pertes de chaleur les plus importantes. Il met en avant une approche équilibrée entre les 5 critères : il regroupe les actions les plus respectueuses du patrimoine et de l'architecture, puis, les plus pérennes en termes d'humidité, puis, les plus performantes en termes de confort thermique (hiver et été). Le choix a été fait de ne rénover que les éléments de l'enveloppe les plus déperditifs (> 20%) et les systèmes les moins performants.
- le scénario 3, qui privilégie la conservation patrimoniale. Il s'attaque aux éléments dont l'amélioration thermique ou le changement n'impacte que peu la valeur patrimoniale du logement, à savoir l'amélioration de l'étanchéité à l'air, l'isolation du plancher haut et du plancher bas. Puis, quand un choix entre deux actions s'impose, le choix se porte sur les plus pérennes en termes d'humidité.

Pour obtenir le bouquet d'actions correspondant à un scénario pour un type défini, il suffit d'appliquer au tableau de synthèse de l'analyse multi-critères obtenu pour ce type, l'algorithme du scénario. Il s'agit donc de sélectionner les actions les plus favorables. Voici une explication plus détaillée du fonctionnement de l'algorithme :

- les actions ont été évaluées en fonction des enjeux propres à chaque type ;
- si c'est le scénario 1 qui est choisi, toutes les actions vertes dans la colonne « gain énergétique » sont sélectionnées et les autres sont éliminées.
- en fonction des orientations à donner au scénario, on ne garde qu'une action par élément parmi toutes les actions qui ne sont pas rouges.

Le choix des actions a aussi été déterminé par le fait que l'étude a pour but de comparer les matériaux et actions disponibles. Comme il n'était pas possible de multiplier les tests de différents matériaux pour un même type, ces matériaux ont été testés sur différents types. Les principes des 3 scénarios prédéterminés étant les mêmes pour chaque type, il est possible d'effectuer ces comparaisons de matériaux de manière précise.

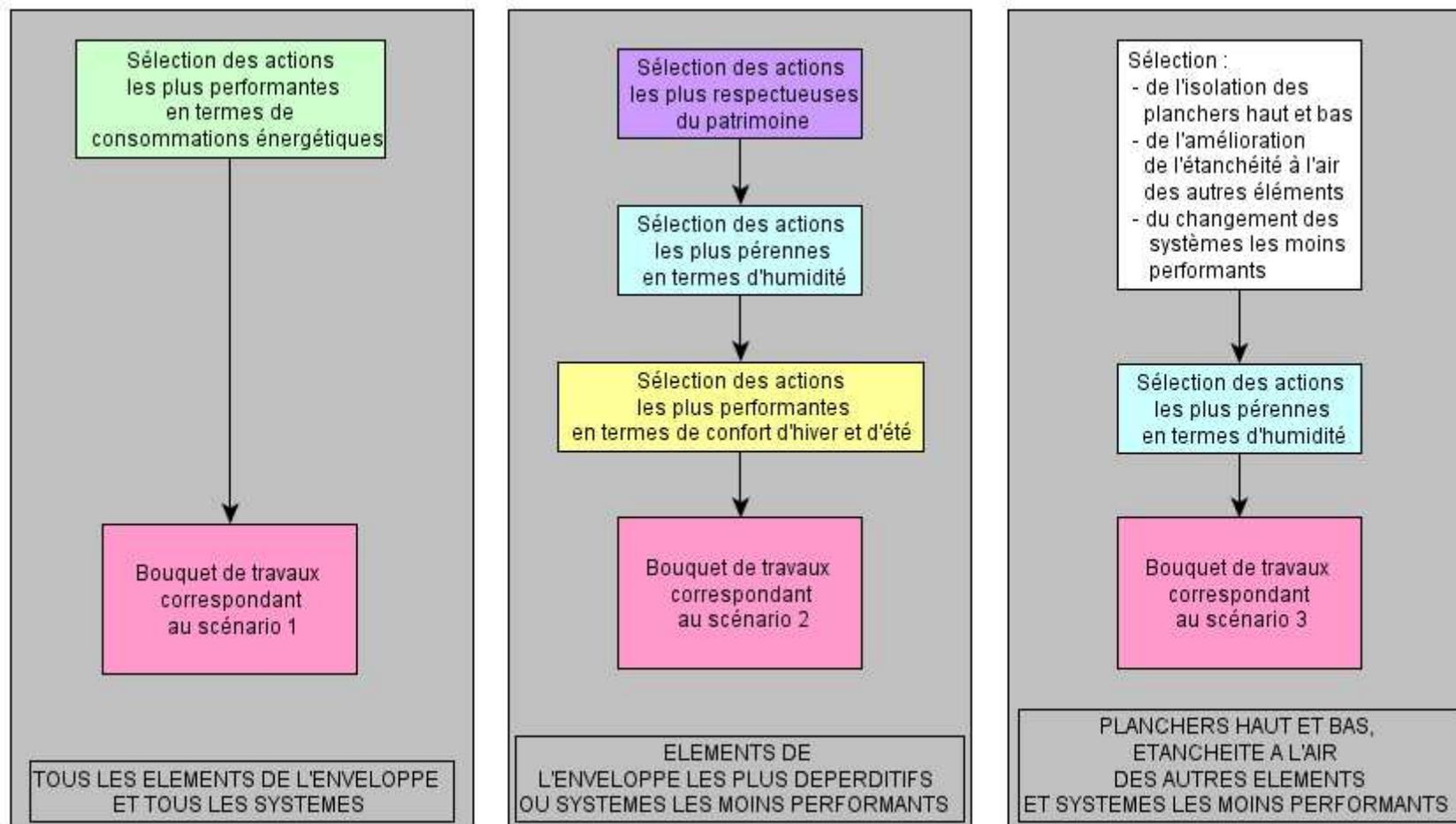


Illustration 10: Algorithme des trois scénarios (source : Cerema)

SCENARIO 1 : « donner priorité au gain énergétique »

SCENARIO 2 : « cibler les principales déperditions thermiques »

SCENARIO 3 : « privilégier architecture et patrimoine »

### 3.5. Analyse multi-critères quantitative des bouquets d'actions adaptées

Une fois établis, ces bouquets d'actions subissent également une analyse multi-critères. Les critères sont les mêmes que pour l'analyse multi-critères des actions, mais le tri s'effectue cette fois-ci quantitativement, c'est-à-dire au travers des simulations ou du calcul, pour :

#### **Le critère « gain énergétique » ;**

Les besoins de chauffage sont évalués à partir d'une simulation thermique dynamique réalisée par le logiciel Pléiades+COMFIE. Ils sont ensuite traduits<sup>7</sup> :

- en étiquette-énergie et il est vérifié s'ils atteignent le facteur 4 et l'objectif « Grenelle » -38 % (qui correspond à l'une des 20 mesures prioritaires énoncées par la loi Grenelle 1 en 2008) par rapport à l'étiquette-énergie avant rénovation.
- de manière à pouvoir être comparés au niveau BBC Rénovation.

#### **Le critère « confort d'été » ;**

Le confort d'été est évalué à partir d'une simulation thermique dynamique réalisée par le logiciel Pléiades+COMFIE et comparé au confort d'été obtenu avant rénovation, c'est-à-dire lors de la phase 1 de l'étude.

#### **Le critère « diminution de l'effet de paroi froide en hiver » ;**

Ce critère, relatif au confort d'hiver, est évalué à partir de la température de surface des murs donnant sur l'extérieur, qui se calcule en fonction des résistances thermiques des éléments constitutifs de ces derniers. Il s'agit d'évaluer la diminution de l'effet de paroi froide, qui est proportionnel à l'augmentation de la température de surface intérieure des murs donnant sur l'extérieur.

#### **Le critère « absence de risques liés à l'humidité » ;**

La quantité d'humidité est évaluée dans les matériaux anciens à partir d'une simulation hygrothermique dynamique réalisée par le logiciel WUFI 2D et comparée à la quantité d'humidité obtenue avant rénovation.

#### **Le critère « patrimoine et architecture » ;**

Des notes ont été données à dire d'expert aux actions. La note du bouquet d'actions ainsi que la couleur associée à cette note est calculée selon des règles explicitement définies (voir paragraphe 4).

De la même manière que pour l'analyse qualitative, une échelle de quatre couleurs, allant du vert au rouge, est appliquée à chaque action, selon le critère étudié. Ces couleurs sont doublées, dans le cas de l'analyse quantitative, de notes permettant d'élaborer des diagrammes-radars rassemblant les 5 critères. Ces diagrammes-radars ont pour objectif de permettre la comparaison visuelle entre les scénarios, dans le cadre de la fiche de synthèse grand public.

L'élaboration de l'échelle de notation pour chaque critère est l'objet du chapitre suivant.

### 3.6. Analyse économique

Enfin, les bouquets d'actions sont analysés du point de vue économique selon deux approches :

- la rentabilité : il s'agit de déterminer
  - le coût des travaux (en euros TTC/m<sup>2</sup>) ;
  - la comparaison des charges sur 20 ans (coût de l'inaction) ;
  - le temps de retour sur investissement du bouquet d'actions, c'est-à-dire le temps au bout duquel les économies d'énergie réalisées auront remboursé l'investissement initial. Ce calcul du temps de retour se fait avec une actualisation qui permet de ramener les coûts différés dans le temps à leur équivalent à une date de référence qui

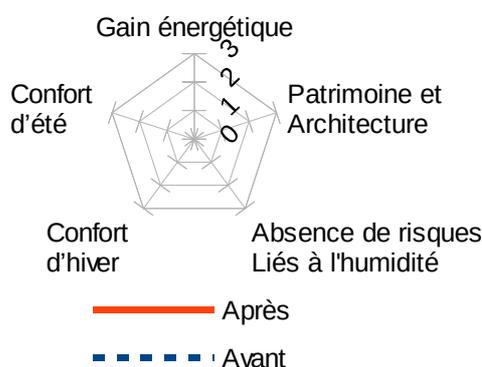
<sup>7</sup> cf. annexe 7.4 pour plus de précisions sur la traduction des besoins de chauffage en consommations énergétiques conventionnelles en énergie primaire.

est en général la date où l'investissement est effectué. Les différents mécanismes qui interviennent sont explicités au paragraphe 5.1.

- En parallèle de ce calcul de rentabilité est aussi calculé pour chaque bouquet d'actions la quantité et le coût des émissions de CO2 évitées grâce aux travaux. Le coût est calculé en utilisant les valeurs présentes dans le règlement délégué de la commission européenne du 16/01/2012 complétant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments (cf paragraphe 5.1).
- la soutenabilité : il s'agit de déterminer le coût mensuel du prêt nécessaire au financement du bouquet d'actions, afin d'apprécier la faisabilité du bouquet d'actions au regard du niveau de vie des ménages.

## 4. Élaboration de l'échelle de notation pour chaque critère

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer l'échelle de notation pour chaque critère, de manière à pouvoir réaliser l'analyse multi-critères quantitative et sa traduction sous la forme d'un diagramme-radar.



À noter que pour le critère « patrimoine et architecture », il est apparu nécessaire de clarifier avant tout l'échelle de notation de l'analyse multi-critères qualitative.

### 4.1. Critère « gain énergétique »

Le critère « gain énergétique » est évalué par rapport à différents niveaux, qu'il convient ici de détailler :

- le niveau BBC Rénovation, ou plus précisément « bâtiment basse consommation énergétique rénovation, BBC rénovation 2009 » est le niveau en dessous duquel une rénovation peut être labellisée « HPE rénovation ». En Alsace, ce niveau est de 104 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an pour des consommations conventionnelles relevant des 5 usages réglementaires (chauffage, production d'eau chaude sanitaire, refroidissement, éclairage, auxiliaires de ventilation).
- l'étiquette-énergie. Les classes énergétiques permettent de comparer les bâtiments entre eux. Les consommations énergétiques sont données en kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an pour des consommations conventionnelles relevant de seulement 3 des 5 usages réglementaires (chauffage, production d'eau chaude sanitaire, refroidissement).
- l'objectif « Grenelle » -38 % correspond à l'une des 20 mesures prioritaires énoncées par la loi Grenelle 1 en 2008, à savoir réduire les consommations d'énergie du parc de bâtiments existants d'au moins 38 % d'ici à 2020. Ces -38 % ont été évalués à partir des consommations énergétiques nécessaires à l'élaboration de l'étiquette-énergie, de même que le niveau facteur 4. Ce dernier correspond à une division par quatre des consommations énergétiques initiales.

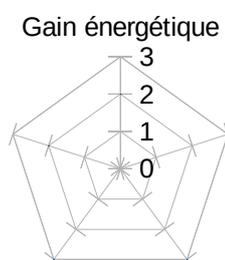
Il est à noter que le niveau BBC et l'étiquette-énergie ne sont pas directement comparables, puisqu'ils ne relèvent pas des mêmes usages<sup>8</sup>. C'est pour cela que deux consommations énergétiques différentes ont été calculées pour chaque bouquet d'actions, selon la méthode explicitée au paragraphe 7.4.

Le tableau suivant donne l'échelle de notation sur laquelle le critère « gain énergétique » a

8 Ni du même moteur de calcul réglementaire.

été évalué. A noter que l'atteinte du niveau BBC, celle de l'objectif « Grenelle » -38 % et celle du facteur 4 seront indiqués dans le détail du critère.

	SI étiquette < B	SI étiquette C OU SI étiquette D et objectif -38 % « Grenelle » atteint	SI étiquette D	Si étiquette > D
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères quantitatifs				
Note sur le diagramme-radar	3	2	1	0



*Illustration 11: Diagramme-radar pour le critère "gain énergétique"*

## 4.2. Critère « confort d'été »

Le tableau suivant donne l'échelle de notation sur laquelle le critère « confort d'été » a été évalué. Les nombres d'heures permettant de passer d'une couleur à une autre ont été choisis de manière arbitraire.

Soit  $n$  le nombre d'heures d'inconfort estival, c'est-à-dire le nombre d'heures pour lequel la température est supérieure à 27 °C dans l'ensemble du logement.

	SI $n < 50$	SI $50 < n < 100$	SI $100 < n < 150$	SI $n > 150$
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères quantitatifs				
Note sur le diagramme radar	3	2	1	0

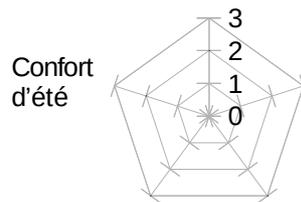


Illustration 12: Diagramme-radar pour le critère "confort d'été"

### 4.3. Critère « diminution de l'effet de paroi froide en hiver »

Étant donné que ce critère s'évalue paroi par paroi, il a été décidé de ne s'intéresser qu'aux murs donnant sur l'extérieur.

L'évaluation de la diminution de l'effet de paroi froide en hiver se fait donc à partir du calcul des températures de surface intérieure du mur : plus le mur est isolé, plus sa température de surface intérieure est élevée<sup>9</sup>.

L'échelle suivante a été considérée :

	Si la température de surface intérieure du mur vaut au moins 18 °C	Si la température de surface intérieure du mur vaut au moins 16 °C	Si la température de surface intérieure du mur vaut au moins 12 °C ET amélioration de leur étanchéité à l'air	Si la température de surface intérieure du mur vaut au moins 12 °C ET pas d'amélioration de leur étanchéité à l'air
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères quantitatifs				
Note sur le diagramme radar	3	2	1	0



Diminution de l'effet de paroi froide en hiver

Illustration 13: Diagramme-radar pour le critère "diminution de l'effet de paroi froide en hiver"

<sup>9</sup> cf. annexe pour plus de précisions sur le calcul de ce critère

#### 4.4. Critère « absence de risques liés à l'humidité »

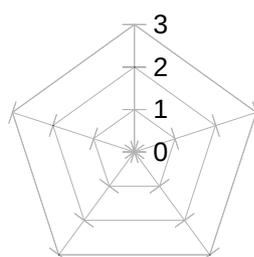
Le tableau suivant donne l'échelle de notation sur laquelle le critère « absence de risques liés à l'humidité » a été évalué.

Rappelons que le nombre de points d'observation varie entre 3 et 4 :

- l'humidité relative dans la brique, le grès ou le torchis ;
- l'humidité relative dans le mortier ;
- la teneur en eau dans la poutre ;
- la teneur en eau dans le pan de bois.

	SI l'humidité relative est inférieure à 85 % ou la teneur en eau inférieure à 20 % de masse pour tous les points d'observation	SI l'humidité relative est supérieure à 85 % ou la teneur en eau supérieure à 20 % de masse pour au plus un point d'observation	SI l'humidité relative est supérieure à 85 % ou la teneur en eau supérieure à 20 % de masse au plus 2 points d'observation	SI l'humidité relative est supérieure à 85 % ou la teneur en eau supérieure à 20 % de masse pour au moins 3 points d'observation
Couleur attribuée dans les tableaux multi-critères quantitatifs				
Note sur le diagramme radar	3	2	1	0

Illustration 2: Diagramme-radar pour le critère "absence de risques liés à l'humidité"



Absence de risques  
Liés à l'humidité

## 4.5. Critère « patrimoine et architecture »

Pour l'évaluation du bouquet d'actions selon le critère « patrimoine et architecture », il a été choisi d'effectuer la moyenne des notes-colorations obtenues par les actions sur les éléments constituant le bouquet lors de l'évaluation qualitative du premier tri (étape 3.3). Les éléments sont pondérés notamment en fonction des enjeux patrimoniaux et architecturaux. Ainsi les actions sur les éléments ayant un fort enjeu architectural (murs donnant sur l'extérieur, toiture, fenêtres, portes extérieures du logement) sont plus fortement pondérées que les autres.

### Échelle de notation quantitative sur le bouquet d'actions

Cette évaluation des bouquets d'actions sur les éléments architecturaux se traduit dans le diagramme-radar par une note allant de 0 à 3.

Cette note est le fruit d'une moyenne qui se décline de la manière suivante

A chaque action du bouquet est appliquée une note comme suit :

- Vert = 3 / Jaune = 2 / Orange = 1 / Rouge = 0

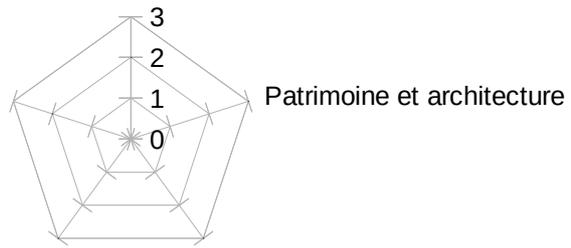
L'évaluation des bouquets d'actions se fait par l'évaluation de chaque élément pondéré en fonction de l'enjeu patrimonial de la façon suivante :

Il y a 7 à 8 actions possibles dans un bouquet, soit une moyenne sur 30 ou 33 (3 ou 4 postes pondérés à 2 et 4 postes pondérés à 1 et sur chacun de ces postes, une note maximale de 3) (La note obtenue après pondération n'est pas colorée car elle participe au calcul de la note moyenne et ne saurait être considérée comme une valeur d'appréciation brute)

Cette moyenne est ensuite arrondie de la manière suivante ( $0 < 0,6 < 1$ )

#### Exemple

Élément ou système	Action	Notation		
		Valeur	Pond	Note
Murs donnant sur l'extérieur	B – 3 – Isolation par l'intérieur, mousse minérale en bloc, épaisseur 15 cm	1	2	2
Plancher bas	B – 2 – Isolation en sous face, ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur, épaisseur 12 cm	2	1	2
Plancher haut	C – 3 – Isolation de la toiture, fibre de bois et frein-vapeur, épaisseur 24 cm	1	1	1
Fenêtres	B – 1 – a – Remplacement des fenêtres, maintien des volets existant, châssis en bois, double vitrage $U_w = 1,3 \text{ W/m}^2\text{.K}$ , avec petits-bois	1	2	2
Porte extérieure du logement	C – 1 – Remplacement de la porte, châssis en bois, âme isolante, double vitrage $U_d = 1,3 \text{ W/m}^2\text{.K}$	1	2	2
Ventilation	B – 1 – VMC – Simple-flux	2	1	2
Chauffage et ECS	B – 1 – Chaudière à condensation, réutilisation des émetteurs existants	3	1	3
<b>Total/30</b>				<b>14</b>
<b>Note moyenne/3</b>		<b>1</b>		<b>1,4</b>



*Illustration 15: Diagramme-radar pour le critère "patrimoine et architecture"*

# 5. Analyse économique des bouquets

Les critères de l'analyse économique réalisée pour cette étude sont au nombre de 5 et sont répartis en deux catégories :

- les critères relevant de la rentabilité du bouquet d'actions :
  - le coût du bouquet d'actions ;
  - le temps de retour actualisé sur investissement ;
  - l'évolution des charges énergétiques sur 20 ans avec ou sans travaux ;
  - la monétarisation des tonnes de CO<sub>2</sub> non émises grâce aux travaux ;
- le critère relevant de la soutenabilité du ménage qui entreprend ce bouquet d'actions :
  - le coût mensuel du bouquet d'action pour le ménage.

## 5.1. Rentabilité

### Coût du bouquet d'actions

Les coûts estimés des bouquets d'actions, c'est-à-dire des travaux sont issus des bases de prix et ouvrages en possession du pôle économie de la construction du Cerema à savoir Batichiffrage (outil de chiffrage élaboré par Bâtiactu et l'annuel des prix du BTP), Batitel (outil de chiffrage élaboré par l'Office des prix du bâtiment) et Batiprix (éditions du Moniteur). Toutefois, vu le caractère particulier de certains matériaux préconisés dans les bouquets d'actions, plusieurs prix ont dû faire l'objet de recherches complémentaires.

L'application de la TVA s'est faite en tenant compte :

- du niveau de performance atteint : seuls les travaux d'amélioration énergétique de niveau CITE ou plus peuvent faire l'objet d'un taux de 5,5%. Les autres se verront appliquer un taux de 10 %<sup>10</sup> ;
- de l'augmentation de la surface de plancher. Si celle-ci est supérieure à 10%, un taux de TVA de 20% s'appliquera alors<sup>11</sup> ;
- du taux de rendu à neuf pour certains éléments de second œuvre (dont les huisseries extérieures, installations sanitaires et de plomberie, installations électriques et système de chauffage). Si celui-ci est supérieur à 2/3, un taux de TVA de 20% s'applique<sup>12</sup>.

### Temps de retour actualisé (TRA) sur investissement

Le calcul de rentabilité se fait avec une actualisation des coûts en accord avec la norme ISO-15686-5<sup>13</sup>.

Sommer des flux financiers dans le temps n'a de sens que si on les ramène sur une même base de référence. C'est ce que permet l'actualisation.

Expliqué brièvement, ce taux d'actualisation traduit en fait la « valeur du temps », c'est-à-dire la différence entre la valeur d'un coût (recette ou dépense) aujourd'hui et celle de ce même coût dans le futur. Ainsi, avec un taux d'actualisation de 4 %, un euro dans 10 ans aura une valeur actualisée de  $1 / (1+0,04)^{10}$  soit 0,68 euro. **Pour plus de détails, on se référera à l'explicitation des principes de calcul en coût global en annexe 4.**

La base de référence est ici la date de réalisation des travaux et donc de l'investissement. Le

<sup>10</sup> Article 278-0 ter et 279-0 bis du code général des impôts

<sup>11</sup> Article 278-0 ter du code général des impôts

<sup>12</sup> Article 278-0 ter du code général des impôts

<sup>13</sup> On pourra utilement se référer au document du CGDD « Objectifs, méthodologie et principes d'application selon la Norme ISO/DIS 15 686-5 » téléchargeable à l'adresse ci-dessous :

[http://www.coutglobal.developpement-durable.gouv.fr/aide/download/filename/resume\\_norme.pdf](http://www.coutglobal.developpement-durable.gouv.fr/aide/download/filename/resume_norme.pdf).

taux d'actualisation est lui pris à 4 %. Un taux d'actualisation spécifique est calculé pour chaque fluide en accord avec la norme (**cf annexe**). Il est calculé à partir des taux d'inflation prévisionnel pour l'électricité et le fuel (respectivement 5,1 % et 8,36%) qui ont été déterminés de la façon suivante.

Le taux d'inflation annuel prévisionnel pour l'électricité est calculé à partir de la moyenne de l'évolution sur les 4 dernières années (2009-2013) des prix TTC du kWh de l'électricité relevés sur la base de données Eurostat<sup>14</sup>. On commence volontairement à 2009, car le prix de l'électricité est resté relativement stable sur la période 2003-2009 avant d'augmenter nettement par la suite. Un calcul sur une plus longue période aurait donc abouti à un taux d'inflation nettement plus faible (par exemple de l'ordre de 1,3% en moyenne annuelle sur la période 2003-2013) et non représentatif des scénarios les plus probables d'augmentation du coût de cette énergie pour les prochaines années. Concernant le fuel, le taux d'inflation prévisionnel est calculé à partir des données en ligne sur le site du Ministère de l'écologie de 2004 à 2013<sup>15</sup>.

Ce taux d'inflation est ensuite appliqué pour chaque année à compter de la réalisation des travaux au produit de l'économie d'énergie réalisée (par rapport à la situation avant travaux) par le coût du kWh correspondant. **Le temps de retour actualisé est obtenu à partir du moment où la somme des montants actualisés des économies d'énergie réalisées dépasse le montant des coûts des travaux.**

### **Evolution des charges énergétiques sur 20 ans avec et sans travaux**

De même, on compare pour chaque bouquet d'actions et sous forme de graphique la valeur des charges énergétiques aujourd'hui et dans 20 ans (en montants actualisés avec les taux spécifiques pour les énergies décrites plus haut) à ce qu'elles seraient si on ne faisait pas de travaux. Cela permet ainsi de se rendre compte du coût de l'inaction.

### **Monétarisation des tonnes de CO<sub>2</sub> non émises grâce aux travaux**

Enfin, l'aspect des émissions de CO<sub>2</sub> évitées est aussi abordé. Celles-ci sont calculées en tonnes de CO<sub>2</sub> non émises grâce aux travaux qu'on monétisera avec les valeurs mentionnées dans le règlement délégué de la commission européenne du 16/01/2012 complétant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments. Ces valeurs ne sont en aucun cas celles du marché relatif au système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre (GES) dans la Communauté européenne dont les cours sont par définition fluctuants. Il s'agit bien ici de valeurs définies comme étant suffisantes pour que la monétarisation de ce paramètre (ou externalité) soit représentative dans les calculs de coût global. Ces valeurs sont les suivantes :

- 20 € la tonne jusqu'en 2025,
- 35 € la tonne jusqu'en 2030,
- 50 € la tonne après 2030.

## **5.2. Soutenabilité**

### **Introduction**

La soutenabilité caractérise la capacité du ménage à mener à bien son investissement jusqu'au bout, soit à en supporter la charge financière. Il s'agit ainsi de comparer les flux de trésorerie qui lui sont demandés (pour un ménage remboursant un emprunt : les mensualités) à sa capacité financière (pour un ménage : la capacité maximum des revenus qu'il peut y consacrer).

Le calcul de la soutenabilité n'a aucun lien avec le calcul de la rentabilité qui vise à déterminer si le ménage dégage ou non un gain financier à l'issue de son investissement. Un investissement peut dégager une excellente rentabilité mais ne pas pouvoir être réalisé en raison des capacités de financement insuffisantes d'un ménage, et inversement.

**NB : Le critère qui sera retenu pour la suite de l'étude est le coût mensuel, c'est-à-dire**

<sup>14</sup> [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search\\_database](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database)

<sup>15</sup> <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Prix-de-vente-moyens-des.10724.html>

les mensualités. Cependant, le lien avec le revenu du ménage est détaillé en annexe. N'est repris ici que le calcul du coût mensuel.

### Calcul du coût mensuel du plan de financement du bouquet d'actions

Un tableau construit le plan de financement de ce bouquet afin d'en déterminer le coût mensuel initial, en effectuant les hypothèses suivantes :

- le plan de financement est composé d'un prêt de marché à 4 % sur 20 ans dans tous les cas.
- NB : ces valeurs peuvent être mises à jour en fonction d'éventuelles données « locales » du secteur bancaire qui améliorerait la précision des estimations. **Il est à noter que la durée de 20 ans est une durée considérée comme « longue » pour le secteur bancaire pour ce type de prêt.**
- Deux sous-scénarios sont constitués, un avec l'éco-prêt à taux zéro de 30 000€ sur 15 ans, et l'autre sans. En présence de l'éco-prêt, le montant du prêt de marché s'ajuste pour arriver au total à financer.
- lorsque le plan de financement intègre l'éco-prêt au prêt de marché, deux cas de figure se présentent :

- soit la durée du prêt de marché est inférieure à la durée de l'éco-prêt et le coût mensuel initial se calcule par addition des mensualités des 2 prêts :

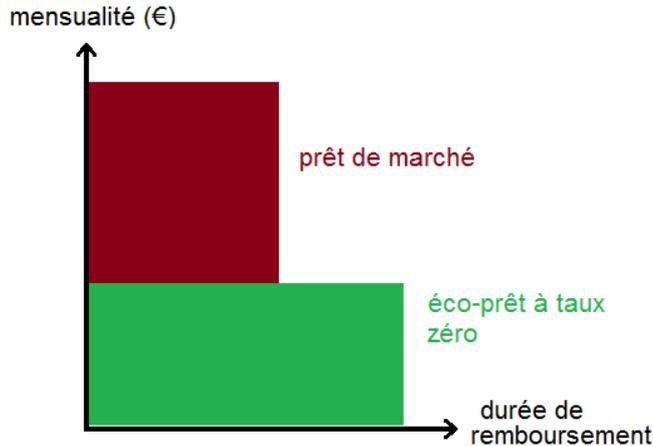


Illustration 16: Durée de l'éco-prêt supérieure à la durée du prêt de marché (source : Cerema)

- soit la durée du prêt de marché est supérieure à celle de l'éco-prêt. Dans ce cas, le modèle détermine un coût mensuel « lissé », c'est-à-dire calculé de manière à être constant sur l'ensemble du plan de financement, tout en permettant d'emprunter le capital requis :

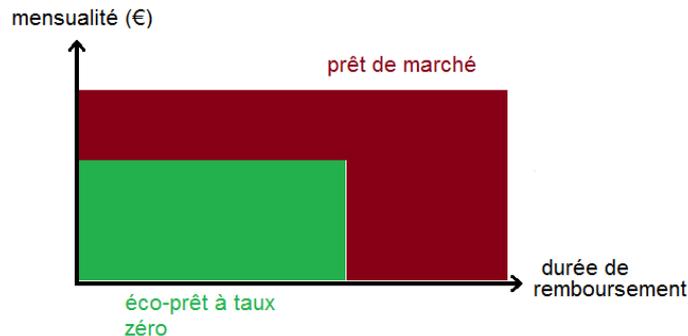


Illustration 17: Durée de l'éco-prêt inférieure à la durée du prêt de marché (source : Cerema)

### **Prise en compte de l'éco-prêt à taux zéro**

#### **Qu'est ce que l'éco-prêt à taux zéro ?**

L'éco-prêt à taux zéro est un prêt délivré sans conditions de ressources pour financer la rénovation énergétique des logements (ou l'assainissement non collectif). Il est sans intérêts pour l'emprunteur car c'est l'État qui paye à l'établissement de crédit le montant des intérêts sous la forme d'un crédit d'impôt sur les sociétés.

L'éco-prêt à taux zéro peut atteindre 30 000€ sur 15 ans lorsque la rénovation est « lourde ». Deux modes d'attribution sont à distinguer, selon qu'un niveau de performance globale est atteint par les travaux, ou que le prêt finance un bouquet d'actions comprenant deux ou trois interventions dans une liste fixée avec des performances minimales définies.

#### **Quelles sont les conséquences de l'éco-prêt sur le plan de financement ?**

Bien qu'étant « sans intérêts », un éco-prêt de 30 000€ n'équivaut pas directement à une subvention de 30 000 €, car il faut rembourser le capital. Cependant, on peut calculer la subvention équivalente à l'absence d'intérêts, en actualisant le différentiel de mensualité entre un prêt de marché et l'éco-prêt. Ce montant équivaut à l'aide financière supportée par l'État.

Ex. Emprunter 30 000€ à 0 % sur 15 ans (167€ de mensualité), par rapport à un emprunt à 3 % sur la même durée (207€ de mensualité), correspond au bénéfice d'une subvention d'environ 5 800€ supportée par l'État (soit 19 % du montant du prêt).

Cet équivalent subvention permet à la banque d'augmenter, à mensualité constante, la capacité d'emprunt du ménage.

Dans notre démarche de calculer les revenus cible du ménage au taux d'effort fixé, bénéficiaire de l'éco-prêt fera baisser les revenus minimums exigibles.

#### **Pourquoi ne pas considérer d'autres aides publiques ?**

Le Crédit d'impôt Transition Énergétique n'est pas un dispositif de solvabilisation, à l'inverse de l'éco-prêt mais davantage d'un dispositif d'incitation à la réalisation de travaux, en versant, en année N+1 une subvention du montant correspondant.

A moins d'imputer directement ce versement en année N+1 au remboursement anticipé de l'emprunt – ce à quoi la majorité des banques ne se risquent pas – le dispositif n'augmente pas la capacité d'emprunt des ménages.

La prime de 1350€ aurait pu être intégrée au plan de financement (en déduction directe du montant initial à financer). Il a été choisi de ne pas le faire pour des raisons de lisibilité et le caractère temporaire de l'aide accordée, sur 2013-2014.

Les aides de l'ANAH ne sont pas analysées ici car elles concernent des ménages très modestes dont le plan de financement s'aborde de manière totalement spécifique (avec un reste à financer souvent minime).

Les aides locales des collectivités territoriales ou d'autres aides comme les Certificats d'Économie d'Énergie (CEE) ou des aides de l'ADEME n'ont pas été retenues ici.

### **Modification du temps de retour sur investissement suivant le plan de financement**

Les intérêts d'emprunt sont une dépense nette pour le ménage à ajouter au montant des travaux qui doit être compensé par les économies de charges. Le temps de retour au bout duquel les économies compensent l'investissement total (coût travaux + intérêts) varie ainsi en fonction du montant des intérêts du plan de financement, différent selon la présence de l'éco-prêt.

Méthodologie : le calcul du temps de retour ajoute au montant de travaux TTC le montant actualisé des intérêts d'emprunt. Les temps de retour sont donc différents selon les options de financement retenues.

# 6. Prolongements potentiels de l'étude

Les réflexions menées au cours de cette étude nous ont parfois amenés à considérer des pistes qui n'ont pas pu être explorées afin de respecter les principaux objectifs de l'étude et son calendrier.

Les prolongements potentiels de cette étude concernent plusieurs directions

- l'étude de plus de types
- la prise en compte de critères supplémentaires dans les analyses multi-critères
- l'étude d'autres actions
- l'intégration d'un volet sociologique
- l'approfondissement de l'analyse économique
- la validation des résultats obtenus dans l'étude par des retours d'expériences

## 6.1. Des types supplémentaires

La typologie établie au cours de la phase 1 compte environ 25 types. D'autres types auraient pu être étudiés, comme la maison vosgienne, la méthodologie étant applicable à tous les types.

## 6.2. Des critères supplémentaires

Les critères actuellement pris en compte dans l'étude sont au nombre de 5 : le gain énergétique, le confort d'été, la diminution de l'effet de paroi froide en hiver, les risques liés à l'humidité et le patrimoine et l'architecture.

D'autres critères auraient pu être intégrés à l'analyse :

- l'énergie grise, c'est-à-dire la quantité d'énergie consommée par un matériau ou un équipement, du transport des matières premières qui le constituent jusqu'à son recyclage ou sa mise en déchetterie ;
- les impacts sur la santé et le degré d'exposition aux polluants que la rénovation d'un bâtiment génère, notamment en phase chantier pour les ouvriers et en phase exploitation pour les occupants ;
- la facilité de la mise en œuvre et la possibilité de faire une partie de travaux soi-même ;
- la durabilité des matériaux dans le temps, c'est-à-dire leur sensibilité à une mauvaise mise en œuvre et les conséquences sur leur durée de vie.

## 6.3. Des actions supplémentaires

De nombreuses actions, pourtant validées par l'un ou l'autre des algorithmes, n'ont pas pu être étudiées faute de temps ou parce qu'elles n'étaient pas envisageables sur les types étudiés. En voici une liste :

- le liège en panneau en isolation par l'intérieur et par l'extérieur ;
- le béton de chanvre en remplacement du remplissage du pan de bois ;

En effet, une des hypothèses de la phase 1 de cette étude postule que l'on ne s'intéresse qu'à des bâtiments bien entretenus. Remplacer un remplissage en pan de bois qui ne présente aucun problème est une action destructive du patrimoine, c'est pourquoi elle a été écartée de cette étude.

- la mise en œuvre d'un enduit (chaux-chanvre ou isolant « respirant ») en correction

thermique extérieure sur l'un des types à pan de bois, de manière à restituer le bâtiment dans son état d'origine, si toutefois il était enduit à l'origine.

- l'enduit isolant « perspirant » en correction thermique extérieure ;
- la fibre de bois en panneau et frein-vapeur en isolation du plancher du grenier par le dessus ;
- la ouate de cellulose en vrac et frein-vapeur hygrovariable en isolation par l'intérieur de la toiture ;
- le double vitrage en remplacement des vitrages ;
- les doubles fenêtres intérieures en bois simple vitrage et extérieures en bois double vitrage ;
- les doubles fenêtres en aluminium ;
- le remplacement du vitrage de la porte.

## 6.4. Des systèmes supplémentaires

Cette étude s'est volontairement limitée à l'enveloppe des bâtiments. L'accent est en effet mis sur les actions de rénovation thermique des éléments de l'enveloppe, puisque c'est sur ces éléments que les interactions avec le patrimoine sont les plus sensibles.

Cependant, il aurait pu être envisagés d'étudier d'autres systèmes, prenant notamment en compte les énergies renouvelables.

## 6.5. L'intégration d'un volet sociologique

Il serait intéressant d'introduire un volet sociologique dans cette étude, permettant d'appréhender les motivations des personnes pour acheter et pour rénover un bâtiment ancien, d'analyser quelles sont leurs attentes sur le confort et la consommation énergétique et en quoi un bâtiment ancien peut répondre à ces attentes. L'étude de la manière d'habiter dans ces constructions serait également riche en enseignements.

## 6.6. L'approfondissement de l'analyse économique

Deux aspects de l'analyse économique mériteraient d'être approfondis :

- Analyse de la soutenabilité à approfondir avec le secteur bancaire. L'analyse de la soutenabilité des bouquets d'actions repose sur un calcul supposé correspondre aux critères d'attribution en cours dans les établissements bancaires pour ce type de prêt (taux d'effort de 30 % hors charges, prise en compte de l'éco-prêt à taux zéro, absence d'apport personnel, prise en compte de seulement 50 % de l'économie de charge). Ce calcul gagnerait donc à être confronté aux pratiques du secteur bancaire afin qu'il valide les hypothèses prises.
- Effectuer des zooms territoriaux pour vérifier la soutenabilité à l'échelle des territoires. Une première étude a été menée pour déterminer le niveau de revenus des ménages occupant les différentes typologies de bâtiments étudiés. Les différentes typologies ont été différenciées par leur surface habitable et par leur année de construction et l'étude du niveau de revenus des ménages s'est faite à l'échelle de l'Alsace toute entière. Certaines typologies étant très spécifiques à certains territoires alsaciens, il serait intéressant de mener cette étude économique à une échelle plus petite et par des organismes ayant des données plus précises à la fois sur leur patrimoine bâti et sur le revenu de leurs habitants (communauté de commune par exemple).

## 6.7. Retours d'expériences

Des retours d'expériences et des suivis de chantier pourraient compléter cette étude en analysant les préconisations faites pour chacun des types étudiés.

# 7. Annexe 1 : hypothèses et définitions énergétiques et hygrothermiques

## 7.1. Définition d'un enduit isolant « perspirant »

Un enduit isolant est un enduit dont la conductivité thermique est plus élevée qu'un isolant tout en restant relativement faible ( $\lambda = 0,045$  à  $0,066$  W/m.K contre  $0,04$  W/m.K pour un isolant et  $1$  W/m.K pour la brique).

Son inertie est généralement très élevée (encore plus que celle de la fibre de bois), mais il se pose en épaisseur limitée, rarement plus de  $6$  cm.

Il est qualifié de « perspirant » s'il se laisse traverser par la vapeur d'eau ( $\mu < 12$ ,  $\mu$  étant le facteur de résistance à la diffusion de vapeur contre  $30$  à  $100$  pour du polystyrène extrudé).

En tant qu'enduit, il est par ailleurs réputé étanche à l'air.

Ces enduits sont généralement composés de chaux hydraulique et, selon les marques, de liège, d'argile, d'algues ou de silices expansées (pour l'enduit isolant Unilit 20 par exemple ou équivalent) aux propriétés isolantes.

Il en est fait mention par J-P. Oliva et S. Courgey dans L'isolation thermique écologique (2010, éditions terre vivante, p.159).

Dans tous les cas, il est nécessaire de s'assurer des compatibilités chimiques et hygriques des enduits et des supports.

## 7.2. Définition de la mousse minérale

La mousse minérale est composée d'un mélange de sable siliceux, de chaux, de ciment, d'eau et d'un agent moussant. Le mélange s'expande à l'air libre, permettant son découpage en panneaux. Les panneaux sont ensuite chauffés à  $180$  °C pendant plusieurs heures.

La mousse minérale est, de par sa nature, relativement dense, très perméable à la vapeur d'eau ( $\mu < 3$ ) et isolante ( $\lambda = 0,04$  W/m.K).

Elle est, de plus, incombustible, non attaquée par les rongeurs et résistante à la compression.

Il en est fait mention par J-P. Oliva et S. Courgey dans L'isolation thermique écologique (2010, éditions terre vivante, p.104).

## 7.3. Propriétés thermiques et hygriques des matériaux isolants

	Conductivité thermique (W/(m.K))	Effusivité (J/(K.m <sup>2</sup> .√s))	Diffusivité (m <sup>2</sup> /s) * 10 <sup>7</sup>	Hygroscopicité	Capillarité	Perméabilité à la vapeur d'eau	Source
Polystyrène	0,039	36	0,11	Non	Non	Non	Bibliothèque de matériaux Pléiades+COMFIE

<b>Laine minérale</b>	0,04	45	7,84	Non	Non	Oui	Site des produits Isover, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Ouate de cellulose</b>	0,042	56	5,45	Oui	Oui	Oui	Site des produits Univercell, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Mousse minérale</b>	0,043	64	4,4	Oui	Oui	Oui	Site des produits Multipor, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Liège</b>	0,04	81	2,4	Non	Non	Non	Bibliothèque de matériaux Pléiades+COMFIE, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Panneau de fibre de bois</b>	0,038	93	1,65	Oui	Non	Oui	Site des produits Pavatex, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Enduit isolant « perspirant » (moyenne)</b>	0,055	157	1,22	Oui	Oui	Oui	Sites des produits Diathonite, Unilit 20, Isolteco, Haga, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Béton de chanvre en remplissage des murs à ossature bois</b>	0,085	205	1,56	Oui	Oui	Oui	Site des produits Tradical, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Béton de chanvre en isolation par l'intérieur</b>	0,107	265	1,72	Oui	Oui	Oui	Site des produits Tradical, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Béton de chanvre en plancher bas</b>	0,096	235	1,66	Oui	Oui	Oui	Site des produits Tradical, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Béton de chanvre en plancher haut</b>	0,06	140	1,81	Oui	Oui	Oui	Site des produits Tradical, bibliothèque de matériaux WUFI
<b>Enduit chaux-chanvre</b>	0,19	516	1,35	Oui	Oui	Oui	Site des produits Tradical, bibliothèque de matériaux WUFI

Rappelons qu'un matériau possédant une forte inertie dispose d'une effusivité élevée et d'une diffusivité faible. L'enduit chaux-chanvre est ici le matériau isolant disposant de l'inertie la plus forte.

Pour une définition des propriétés hygriques, voir la méthodologie de la phase 1.

## 7.4. Étiquette-énergie et niveau BBC rénovation

Dans cette étude, plusieurs estimations ont été faites afin de pouvoir traduire les besoins de chauffage obtenus par le biais du logiciel Pléiades + COMFIE en des consommations énergétiques permettant de calculer l'étiquette-énergie ou de se situer par rapport au niveau BBC rénovation.

### Hypothèses de départ

- En 2005, la répartition des consommations d'énergie finale des résidences principales de France métropolitaine<sup>16</sup> était la suivante :
- L'étiquette-énergie regroupe les consommations conventionnelles de chauffage, d'ECS et

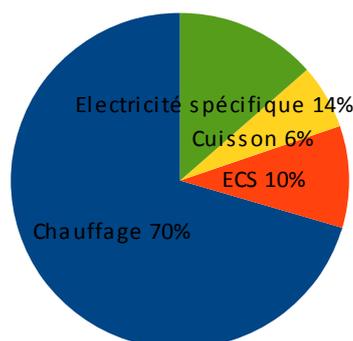


Illustration 18: Répartition des consommations d'énergie finale des résidences principales de France métropolitaine (source : Cerema, d'après 12)

de refroidissement (3 usages) en énergie primaire.

- Le calcul réglementaire regroupe les consommations conventionnelles de chauffage, d'ECS, de refroidissement, d'éclairage et des auxiliaires de ventilation (5 usages) en énergie primaire. C'est notamment grâce à un tel calcul que l'on peut comparer les consommations énergétiques d'un bâtiment avec le niveau BBC rénovation, qui est de 104 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an en Alsace.
- Pléiades+COMFIE donne des besoins de chauffage, calculés à partir de scénarios non conventionnels. Ces besoins de chauffage sont donnés en énergie finale.
- Dans l'état initial, le chauffage et l'ECS sont fournis par une installation au fioul d'un rendement de 70 %, et ce, pour chaque type étudié.

### Passage du non conventionnel au conventionnel

Il s'agit tout d'abord de se ramener à un calcul conventionnel. En effet, Pléiades+COMFIE n'est pas un logiciel de calcul réglementaire et ne permet pas d'effectuer de calcul conventionnel. Un calcul est qualifié de conventionnel notamment lorsqu'il fait appel à des scénarios conventionnels, qui regroupent des hypothèses identiques pour chaque type de bâtiment identifiés par la réglementation thermique (maison individuelle, bureau, etc.).

Pour s'y ramener, nous avons donc établi, dès la phase 1, un certain nombre de scénarios qui se rapprochent des scénarios conventionnels définis par la réglementation thermique, et qui sont identiques pour chaque type étudié. Ces scénarios sont présentés en annexe du rapport méthodologique de la phase 1 de l'étude.

Il est à noter que le scénario de consigne de température, qui est celui ayant le plus grand impact sur le besoin de chauffage, est identique au scénario conventionnel (19 °C en cas d'occupation du logement, 16 °C sinon).

### Passage de l'énergie finale à l'énergie primaire

La répartition des consommations des résidences principales de France métropolitaine est donnée en énergie finale. Nous avons fait l'hypothèse, lors de la phase 1, que le chauffage et

<sup>16</sup> Les Cahiers du Clip n°20, IDDRI (Institut du Développement Durable et des Relations Internationales), novembre 2010

l'ECS étaient produits à partir de fioul, dont le coefficient d'énergie primaire est 1. Or pour l'électricité et en France, ce coefficient vaut 2,58, ce qui signifie qu'en énergie primaire et dans notre étude, la répartition se fait de la manière suivante :

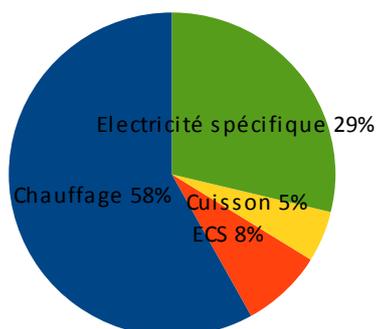


Illustration 19: Répartition des consommations d'énergie primaire des résidences principales de France métropolitaine (source : Cerema, d'après 12)

## Passage d'un usage (le chauffage) à trois usages et cinq usages

### Étiquette-énergie

Sur la base de la répartition des consommations d'énergie primaire des résidences principales de France métropolitaine, il a été considéré que les consommations énergétiques pour le chauffage en énergie primaire représentaient 58 % des consommations énergétiques totales et que les consommations énergétiques pour la production d'ECS en représentaient 8 %. Pour l'Alsace, ces consommations énergétiques pour la climatisation n'ont pas été prises en compte, car elles sont négligeables.

#### Exemple :

Pour des besoins de chauffage calculés par Pléiades+COMFIE de 100 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an, les consommations énergétiques pour le chauffage valent 143 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an, c'est-à-dire les besoins divisés par le rendement de l'installation. Ces derniers représentent 58 % des consommations énergétiques totales et les consommations énergétiques pour la production d'ECS, 8 %, soit 20 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an. Au total, pour le chauffage et l'ECS, on obtient 163 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an, soit une étiquette-énergie de classe D en termes de DPE.

### Niveau BBC rénovation

Sur la base de la répartition des consommations d'énergie primaire des résidences principales de France métropolitaine, il a été considéré que les besoins énergétiques pour l'éclairage et les auxiliaires de ventilation représentaient 29 % des besoins énergétiques totaux.

Cela revient à considérer que l'électricité spécifique alimente uniquement l'éclairage et les auxiliaires de ventilation, ce qui est une hypothèse plutôt défavorable, puisque elle alimente en réalité également les appareils domestiques (électro-ménager, informatique), qui ne sont pas pris en compte dans le calcul réglementaire en France. Cette hypothèse sur-estime donc la part de l'éclairage et des auxiliaires de ventilations dans le calcul des consommations énergétiques.

Rappelons qu'en Alsace, le niveau BBC Rénovation est atteint pour une consommation énergétique de 104kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an pour les 5 usages.

#### Exemple :

Pour des besoins de chauffage calculés par Pléiades+COMFIE de 100 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an, les consommations énergétiques pour le chauffage valent 143 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an, celles pour la production d'ECS, 20 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an et celles pour la ventilation et l'éclairage 71 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an. Au total, les 5 usages réglementaires, les consommations énergétiques s'élèvent à 234 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.an.

## **Facteur 4 et objectif « Grenelle » -38 %**

Le calcul du facteur 4 et de l'objectif « Grenelle » -38 % est basé sur les consommations énergétiques permettant d'établir l'étiquette-énergie.

## 8. Annexe 2 : calcul du critère « diminution de l'effet de paroi froide en hiver »

Les schémas ont été réalisés grâce au site [www.u-wert.net](http://www.u-wert.net). Ils représentent un mur en brique de 40 cm d'épaisseur, recouvert à l'extérieur d'un enduit à la chaux et à l'intérieur d'un enduit au plâtre de 2 cm d'épaisseur chacun. Les calculs sont réalisés selon le principe de conservation du flux de chaleur et l'hypothèse d'homogénéité des matériaux mis en œuvre (ce qui n'est pas strictement le cas pour les matériaux anciens, souvent hétérogènes).

Trois situations sont illustrées, pour lesquelles la température intérieure est fixée à 20 °C :

- avant rénovation ;
- après correction thermique avec 6 cm d'enduit isolant ;
- après isolation avec 15 cm d'isolant (le type d'isolant importe peu, puisqu'on ne s'intéresse qu'aux propriétés thermiques de l'isolant et non de ses propriétés hygriques).

Dans chaque situation, la température de surface intérieure du mur est entourée en rouge. On constate qu'elle passe de 12 °C avant rénovation, à 16,6 °C après correction thermique et à 18,6 °C après isolation.

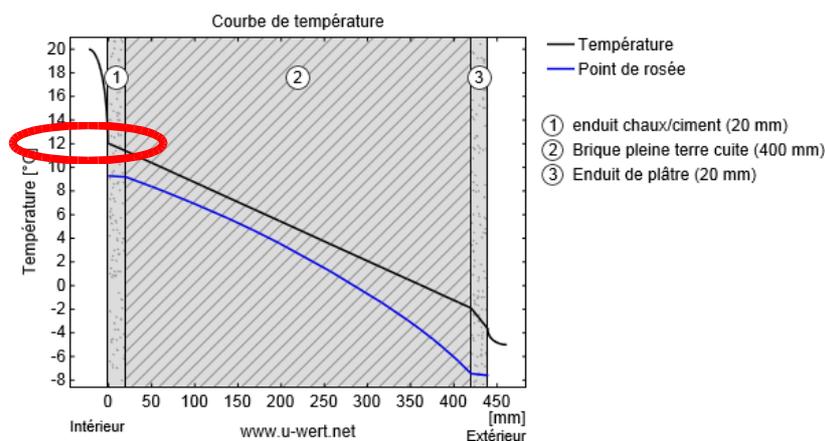


Illustration 20: Température de surface intérieure avant rénovation

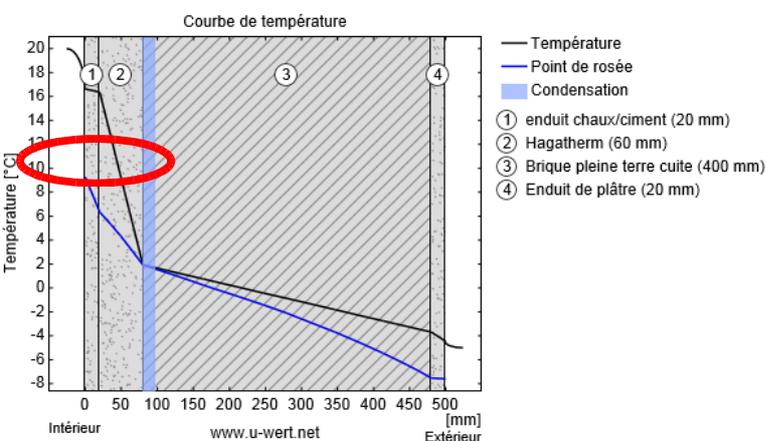


Illustration 21: Température de surface intérieure après correction thermique

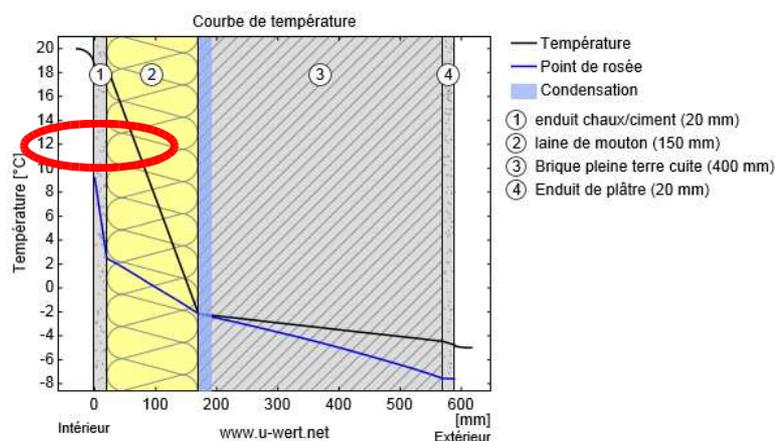


Illustration 22: Température de surface intérieure après isolation thermique

## 9. Annexe 3 : calcul du revenu minimum requis pour financer les bouquets d'actions

Définition : le « taux d'effort » est ici défini comme le rapport entre le coût mensuel du bouquet d'action et les revenus du ménage. Le taux est ici considéré « hors charges », c'est-à-dire qu'il effectue le ratio du seul coût mensuel sur le revenu, sans y ajouter les autres charges régulières du ménage. Par exemple : un ménage gagne 2000€ et rembourse un emprunt 500€ par mois. Ses autres charges sont de 100€ par mois. Son taux d'effort hors charges est de  $500 / 2000 = 25 \%$ .

### Méthodologie du calcul de la soutenabilité

L'objectif est de déterminer quel niveau de revenu minimum du ménage est requis pour financer les travaux escomptés dans les différents bouquets d'actions.

À montant de travaux fixé (« imposé » par le bouquet d'actions), ce revenu minimum dépend :

- de la composition du ménage qui agit sur le taux d'effort maximum « acceptable » : selon sa composition familiale, un ménage pourra consacrer une part plus ou moins importante de ses revenus totaux au remboursement (présence de personnes à charge) ;
- des conditions du plan de financement : taux d'intérêt et présence, ou non, d'aides publiques.

**Démarche : pour chaque bouquet d'actions, un tableur de calcul part du coût du bouquet d'actions à financer en (€ TTC) pour arriver au niveau minimum des revenus du ménage. Ce revenu est ensuite comparé à ceux des ménages-types de propriétaires alsaciens.**

#### 1/3 : Calcul du coût mensuel du plan de financement du bouquet d'actions

Un tableur construit le plan de financement de ce bouquet afin d'en déterminer le coût mensuel initial, en effectuant les hypothèses suivantes :

- le plan de financement est composé d'un prêt de marché à 4 % sur 20 ans dans tous les cas.
- NB : ces valeurs peuvent être mises à jour en fonction d'éventuelles données « locales » du secteur bancaire qui améliorerait la précision des estimations. **Il est à noter que la durée de 20 ans est une durée considérée comme « longue » pour le secteur bancaire pour ce type de prêt.**
- Deux sous-scénarios sont constitués, un avec l'éco-prêt à taux zéro de 30 000€ sur 15 ans, et l'autre sans. En présence de l'éco-prêt, le montant du prêt de marché s'ajuste pour arriver au total à financer.
  - lorsque le plan de financement intègre l'éco-prêt au prêt de marché, deux cas de figure se présentent :
  - soit la durée du prêt de marché est inférieure à la durée de l'éco-prêt et le coût mensuel initial se calcule par addition des mensualités des 2 prêts :

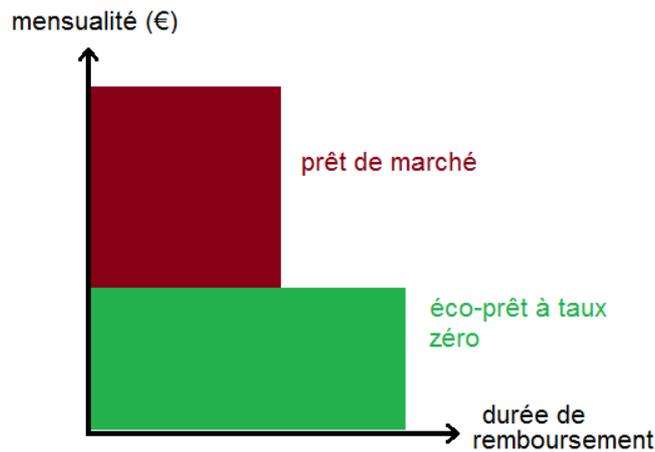


Illustration 23: Durée de l'éco-prêt supérieure à la durée du prêt de marché (source : Cerema)

- soit la durée du prêt de marché est supérieure à celle de l'éco-prêt. Dans ce cas, le modèle détermine un coût mensuel « lissé », c'est-à-dire calculé de manière à être constant sur l'ensemble du plan de financement, tout en permettant d'emprunter le capital requis :

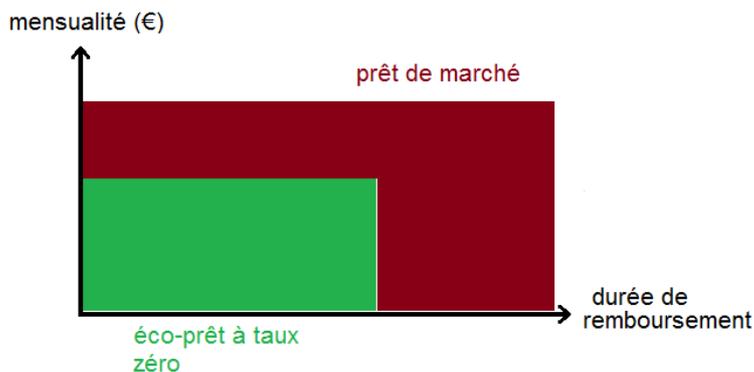


Illustration 24: Durée de l'éco-prêt inférieure à la durée du prêt de marché (source : Cerema)

### 2/3 : Calcul du revenu cible des ménages

Le calcul du coût mensuel initial à rembourser permet de déduire les revenus minimums du ménage, par application du taux d'effort brut de charges.

Le revenu-cible obtenu est alors diminué de l'économie de charges réalisée. En effet, cette économie, qui solvabilise l'emprunteur, fait baisser d'autant le revenu final exigé.

Enfin, le revenu devrait être augmenté des charges régulières qui sont supposées être acquittées par le ménage (ex. Remboursement d'emprunt immobilier).

Ex. Le taux d'effort hors charges est fixé à 30 %.

Le coût mensuel initial du plan de financement est de 500€ par mois. Ses travaux lui permettent d'économiser 50€ sur ses charges d'énergie. Enfin, le ménage acquitte, par ailleurs, 100€ d'autres charges par mois.

Le revenu minimum retenu sera =  $500\text{€}/30\% - 50\text{€} + 100\text{€} = 1717\text{€}$ .

**NB : Dans la présente étude, on n'a retenu que 50 % de l'économie de charges réalisées, par mesure de prudence, considérant que les acteurs bancaires n'iraient pas nécessairement au-delà.**

### 3/3 : Vérification de cohérence économique

Enfin, le résultat est comparé à la distribution des profils de ménages obtenue par la requête effectuée sur les ménages d'Alsace propriétaires occupants (base FILOCOM). Une appréciation générale de la soutenabilité du bouquet d'actions est alors apportée.

Détail :

Une analyse économique territoriale succincte est réalisée sur la base de l'exploitation des données de la base FILOCOM, recensant l'intégralité des logements sur la Région Alsace et

comprenant les revenus et la composition des ménages occupants.

Cette analyse n'a pas pour objectif de décrire précisément les ménages à qui s'adresse le programme de travaux mais d'analyser, sur le parc de propriétaires occupants, si les revenus minimums déduits sont cohérents avec ceux attendus sur le public visé.

Au regard des typologies de l'étude, 3 typologies ont été définies par rapport aux données disponibles dans Filocom :

- Typologie 1 : les logements individuels d'avant 1965<sup>17</sup> entre 80 et 100 m<sup>2</sup> ;
- Typologie 2 : les logements individuels d'avant 1965 > 160m<sup>2</sup> ;
- Typologie 3 : les logements collectifs entre 80 et 110 m<sup>2</sup>.

Par exemple, la maison à colombage avec schlupf se situe ainsi dans la typologie 1. Puis, les types de ménages élémentaires suivantes ont été définis :

- T1 = 1 personne
- T2 = 2 personnes
- T3 = 2 personnes + 1 "enfant" (<=18 ans)
- T4 = 2 personnes + 2 enfants
- T5 = 2 personnes + 3 enfants
- T6 = 2 personnes + 4 enfants et plus
- T7 = 1 personne +1 enfant
- T8 = 1 personne + 2 enfants et plus
- T0 = le reste

*Illustration 3: Types de ménages élémentaires (source : Cerema)*

Les répartitions des propriétaires occupants par typologie de logement et type de ménages se répartit ainsi exhaustivement de la manière suivante :

---

17 La date de 1965 correspond à une catégorie imposée par le logiciel.

## Répartition des revenus par catégorie de ménages

Individuel d'avant 1955 80-100m<sup>2</sup>

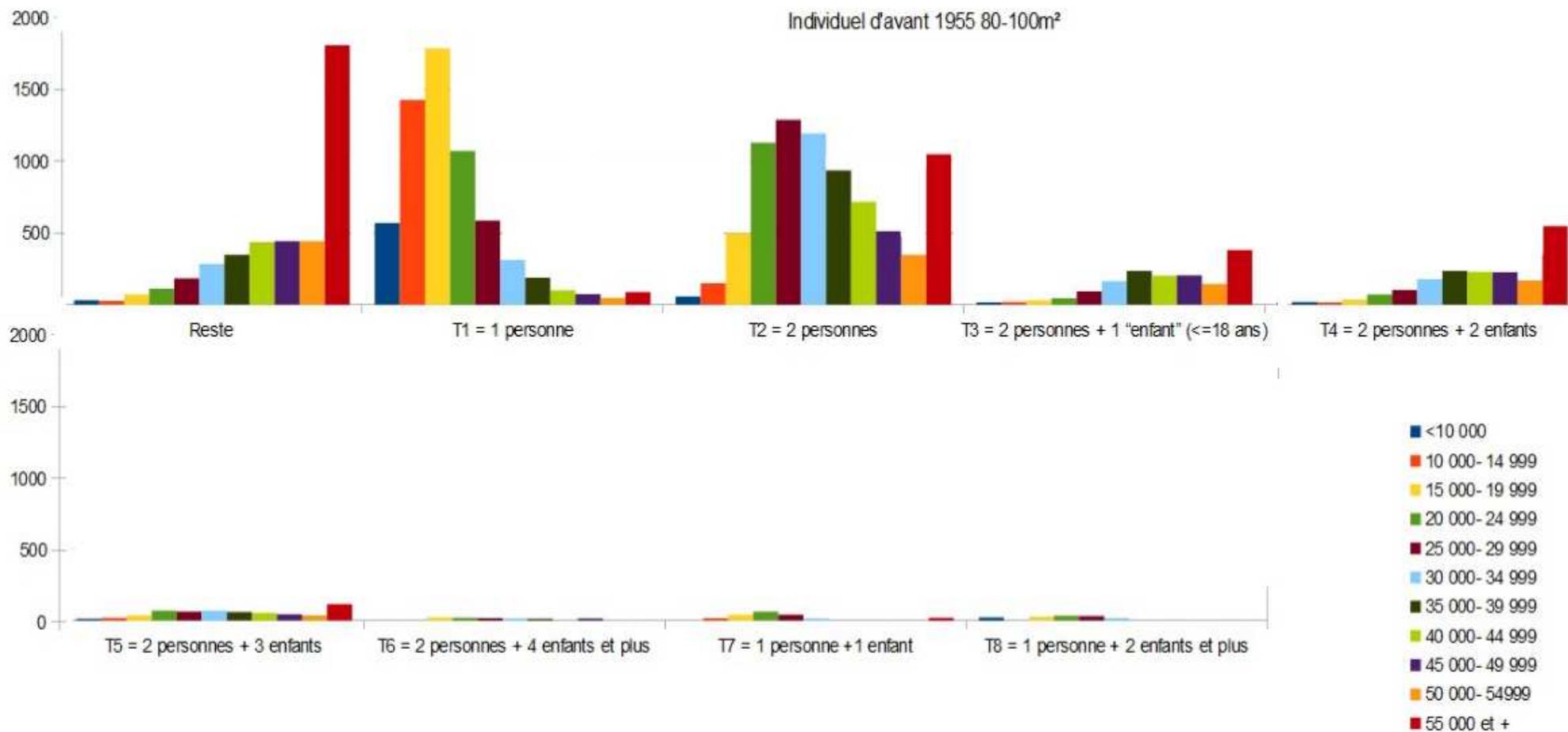


Illustration 25: Distribution des catégories de ménages par tranches de revenu annuel imposable, individuel d'avant 1955, 80-100 m<sup>2</sup>, en Alsace (source : Filocom)

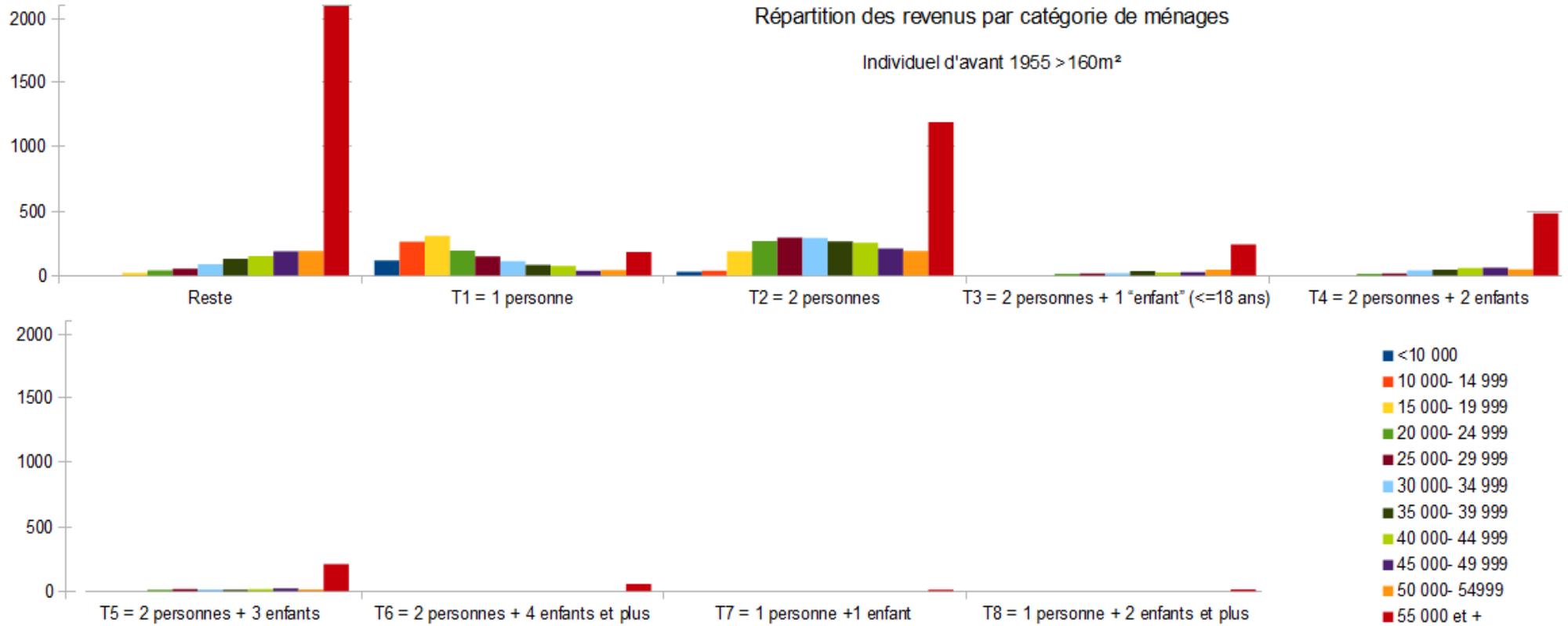


Illustration 26: Distribution des catégories de ménages par tranches de revenu annuel imposable , individuel d'avant 1955, > 160 m<sup>2</sup>, en Alsace (source : Filocom)

10.

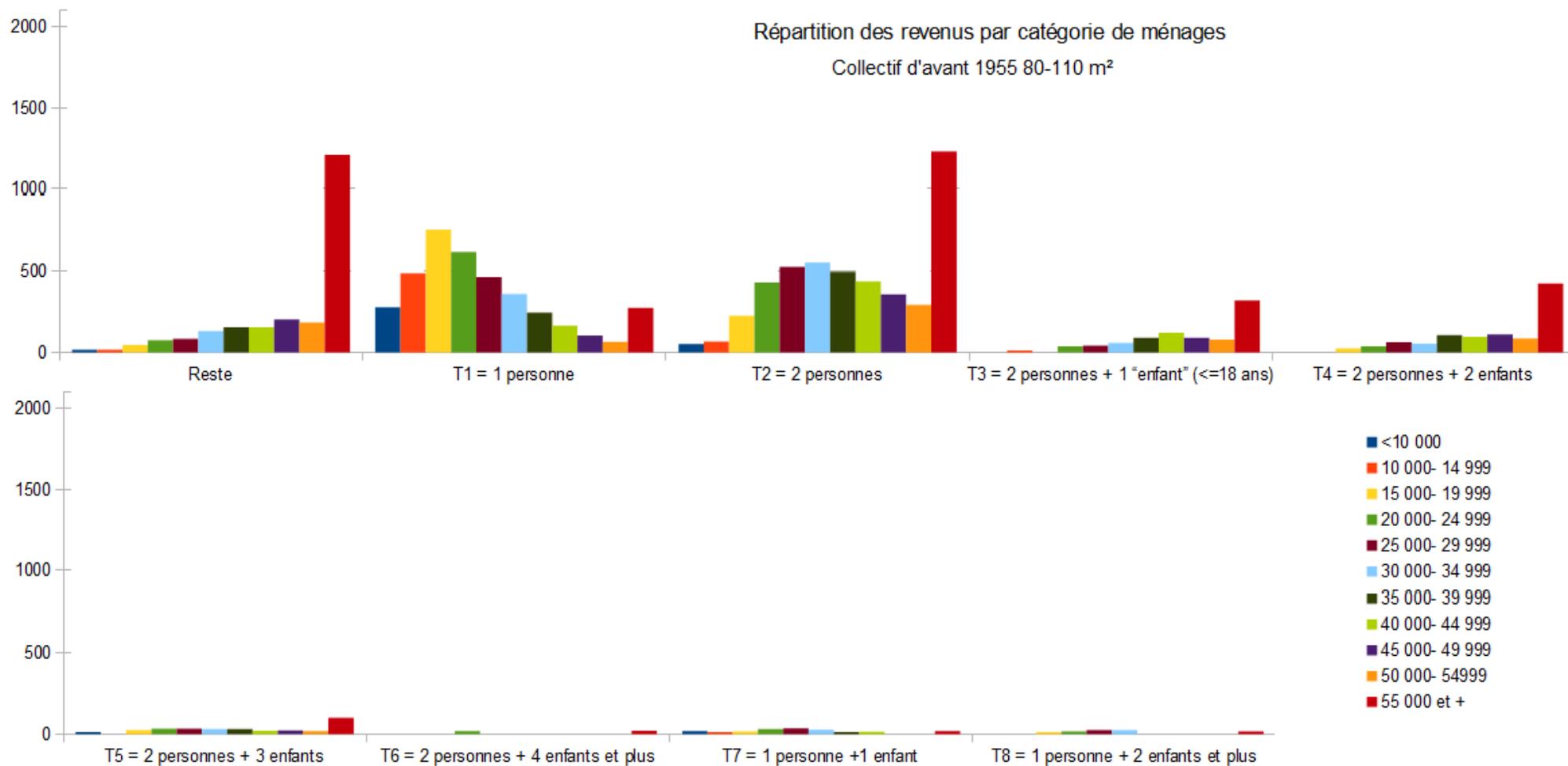


Illustration 27: Distribution des catégories de ménages par tranches de revenu annuel imposable , collectif d'avant 1965, 80-110 m<sup>2</sup>, en Alsace (source : Filocom)

### Analyse des graphes précédents :

Il est délicat d'interpréter de telles statistiques. En fonction de l'âge des personnes, à revenus identiques, les perspectives d'investissement peuvent être radicalement modifiées. En outre, les futurs ménages qui réaliseront les travaux ne compteront pas nécessairement parmi les catégories les plus représentées.

Typologie 1 : « individuel avant 1965, 80-100 m<sup>2</sup> » : cas de la maison à colombage avec schlupf (et autres à compléter)

On constate que la majorité des types de ménages sont les catégorie T1 et T2. Le ménage-type de cette typologie ne comprend ainsi pas d'enfant mais est constituée d'un ou deux adultes avec des revenus relativement modestes : dans les 15 000€-20 000€ (de l'ordre de 1 500€ mensuels) pour la personne seule et 25 000€-30 000€ (2300€ mensuels) pour le ménage de deux personnes (par exemple un couple de personnes âgées).

Sur cette typologie des logements, les « autres catégories » de ménages que celles observées représentent 18,37 % des ménages, ce qui permet de considérer les typologies restantes comme bien représentatives.

Typologie 2 : « individuel avant 1965, >160 m<sup>2</sup> »

Les ménages de 2 personnes sont prépondérants pour cette typologie avec des revenus >4500€ mensuels.

Sur cette typologie des logements, les « autres catégories » de ménages que celles observées représentent 31,44 % des ménages, ce qui nécessiterait des exploitations supplémentaires pour se représenter correctement les types analysés.

Typologie 3 : « collectif avant 1965, 80-100 m<sup>2</sup> »

Les mêmes remarques s'appliquent sur la distribution des revenus que pour la typologie 2.

Sur cette typologie des logements, les « autres catégories » de ménages que celles observées représentent 16,96 % des ménages, ce qui permet de considérer les typologies restantes comme bien représentatives.

En conclusion, sur les typologies analysées du parc bâti avant 1965, les ménages à revenus élevés (>4500€ mensuels pour 2 adultes) sont donc principalement représentés dans l'individuel >160m<sup>2</sup> et le collectif entre 80 et 110 m<sup>2</sup>. L'individuel entre 80 et 110 m<sup>2</sup> comprend des ménages à revenus plus modestes (de 1500€ à 2300€ mensuels pour 1 ou 2 adultes).

## 11. Annexe 4 : calcul du coût global

### 11.1. Un outil d'intégration des coûts d'un investissement sur toute sa durée

**Un décideur confronté à plusieurs possibilités d'interventions considère le plus souvent leur coût respectif comme un critère de choix déterminant.**

Or, les coûts de chaque possibilité sont généralement étalés dans le temps. Si l'investissement à réaliser pour lancer l'intervention constitue un coût immédiat, des coûts différés seront généralement supportés ultérieurement, avec différentes temporalités, selon leur nature.

Si les coûts initiaux constituent une information immédiatement accessible, ce n'est pas systématiquement le cas des coûts différés qui peuvent ne pas être connus avec précision lors de l'investissement initial et nécessitent d'être simulés. Ils peuvent, dès lors, être inopportunément écartés par le décideur dans son arbitrage entre les possibilités

d'intervention.

### **La démarche: qu'est-ce qu'un calcul en coût global et quelle est son utilité ?**

La détermination du « coût global » est un outil d'aide à la décision qui résout cette difficulté en rendant compte d'une valeur intégrant au coût initial les coûts différés de l'intervention.

La différence entre le coût global d'une intervention et le coût global du scénario de l'« inaction » permet dès lors de dégager la rentabilité de l'intervention sur l'ensemble d'une période de référence considérée. L'intervention est « rentable » si cette différence est négative sur cette période ou « coûte » si la différence est positive. La rentabilité d'une intervention dépend ainsi de la période de référence considérée : une opération de réhabilitation peut ainsi ne devenir rentable qu'au bout de nombreuses années.

### **Le calcul : comment détermine-t-on le coût global d'une intervention ?**

Une difficulté tient au fait que la comparaison de flux d'argent dans le temps n'est pas immédiate. On ne peut en effet sommer les coûts initiaux et futurs directement.

Ex. Recevoir un chèque de 100 € dans un an n'est pas équivalent à le recevoir aujourd'hui. En effet, les 100 € reçus aujourd'hui peuvent être placés à un taux d'intérêt  $\tau$  pendant un an et rapportent  $100 \times \tau$  d'intérêts à la fin de l'année, où la valeur du capital atteint alors  $100 \times (1+\tau)$ . On en déduit que les 100€ reçus dans un an correspondent à une valeur d'aujourd'hui de  $100/(1+\tau)$ , où  $\tau$  est appelé « taux d'actualisation »<sup>18</sup>. Le taux d'actualisation représente donc (mais pas seulement) la valeur du taux de placement de ses capitaux propres de la personne qui réalise l'investissement. En fait, le taux d'actualisation reflète de manière plus large la préférence pour le présent par rapport au futur. Cette préférence intègre le taux de placement mais aussi le fait de disposer maintenant ou non d'un bien en fonction des besoins ressentis. Il varie donc selon l'acteur considéré (professionnel ou particulier, public ou privé). La généralisation du raisonnement précédent permet de déduire qu'un coût  $C$  supporté dans

$N$  années correspondant à un coût d'aujourd'hui égal à  $C/(1+\tau)^N$ . Ce qui est vrai pour un gain étant vrai pour un coût (qui est un gain négatif), chaque coût futur doit ainsi être actualisé pour pouvoir être comparé directement à la valeur initiale de l'investissement.

Le coût global, sur une période d'observation donnée, correspond donc à la somme de l'investissement initial et des coûts actualisés sur la totalité de la période d'observation :

$$\text{Coût global} = I_0 + \sum_{t=1}^N \frac{D_t - R_t}{(1+a)^t}$$

*$I_0$  :* montant (ou écart entre 2 options) de l'investissement à l'année 0

*$D_t$  :* dépenses (ou écart de dépenses entre 2 options) de l'année  $t$

*$R_t$  :* revenus (ou écart de revenus entre 2 options) de l'année  $t$

*$a$  :* taux réel d'actualisation

*$N$  :* horizon économique (en années)

*Illustration 28: Formule de calcul du coût global (source : Cerema)*

<sup>18</sup> En effet, le capital  $100/(1+\tau)$  placé pendant un an au taux  $\tau$  aboutit à l'obtention d'un capital de 100 au bout d'un an.

## Le calcul en coût global d'un bâtiment dégage la rentabilité d'une opération de réhabilitation

L'approche en coût global est particulièrement pertinente pour un bâtiment

Comme le révèle le graphe du CGDD ci-dessous, en moyenne, la conception et la construction d'un bâtiment ne représentent que 29 % de l'ensemble des coûts qui seront supportés sur sa vie entière.

Il est ainsi indispensable de calculer un coût global pour apprécier la réalité d'un investissement au vu de ses conséquences dans le temps.

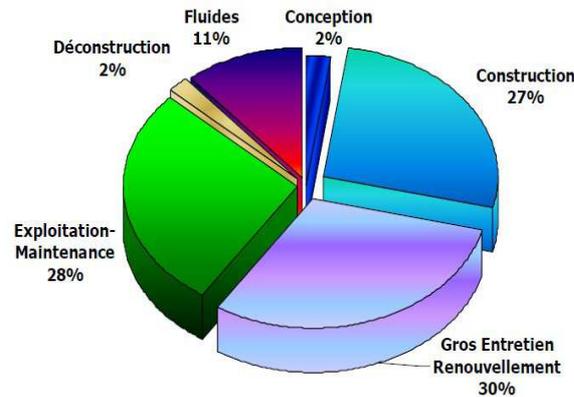


Illustration 29: Coûts d'un bâtiment sur son cycle de vie (source : CGDD)

Les différents postes de coûts sont généralement regroupés en 4 catégories :

- l'investissement initial (qui correspondra ici au montant des travaux entrepris) ;
- l'exploitation (dépenses de fluides et d'électricité) ;
- la maintenance (dépenses d'entretien des équipements chauffage – chaudière ou PC – ventilation) ;
- le remplacement des équipements (chauffage, VMC, fenêtres, etc.).

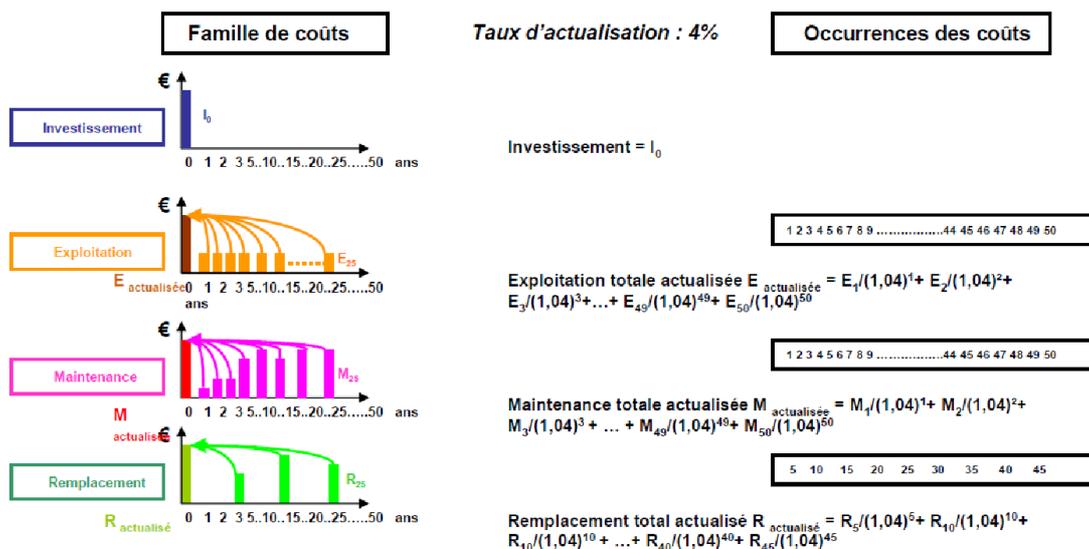


Illustration 30: Familles et occurrences des coûts retenus pour la présente étude (source : CGDD)

Dans le cadre de l'étude, seuls les 2 premiers postes sont pris en compte.

## 11.2. Les hypothèses économiques à définir

### Taux d'actualisation

Le choix de la valeur du taux d'actualisation a une influence importante sur les résultats. A titre d'illustration, avec un taux d'actualisation de 2%, un euro dans 20 ans a une valeur actualisée à aujourd'hui de 0,67 € ( $1/(1,02)^{20}$ ). Si on prend 4%, sa valeur actualisée n'est plus que de 0,46 € ( $1/(1,04)^{20}$ ). C'est cette valeur de 4% qui est préconisée par le centre d'analyse stratégique (CAS) pour les 30 prochaines années ainsi que par la commission européenne<sup>19</sup>. On la retiendra donc dans le cadre de cette étude.

### Taux d'inflation du prix de l'énergie

Le taux d'actualisation est un taux réel qui prend déjà en compte l'inflation. Les calculs se font donc en euros constants. Toutefois, la norme prévoit que si certains coûts évoluent à un rythme différent du niveau général des prix, le calcul en coût global doit intégrer ce différentiel. C'est pourquoi, elle admet un taux d'actualisation spécifique pour les fluides énergétiques dont le coût a fortement augmenté ces dernières années. Si on nomme T le taux d'actualisation (ici 4%) et Te le taux d'inflation annuel moyen du fluide concerné, le taux d'actualisation spécifique de ce fluide sera alors :

$$(1+T)/(1+Te) - 1$$

### Calcul de rentabilité

Une fois les taux précédents définis, on peut dégager le temps de retour actualisé (TRA), durée au bout de laquelle le coût global s'annule c'est-à-dire que l'économie de charges compense le montant initial de l'investissement.

---

<sup>19</sup> Orientations accompagnant le règlement délégué (UE) n°244/2012 de la Commission du 16 janvier 2012 complétant la directive 2010/31/UE du Parlement européen sur la performance énergétique des bâtiments.