

La rénovation performante par étapes

Étude des conditions nécessaires pour
atteindre la performance
BBC rénovation ou équivalent
A terme en logement individuel

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

Janvier
2021

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes qui ont contribué à cette étude à divers titres.

En premier lieu Camille JULIEN, Thierry RIESER, Vincent LEGRAND, Jeremy CELSAN, Fabien VIGIER, Stéphane MOTEAU pour la réalisation et la coordination de cette étude

Également le « comité de relecture expert » composé d'Angélique SAGE (Effinergie), de Martin GUER (AQC), de Charles ARQUIN et Julien PARC (Pouget Consultants).

Ainsi que l'ensemble des participants au groupe de travail « rénovation BBC par étapes » du CeDRe coanimé par John GIRARDOT (Région Auvergne-Rhône-Alpes), avec la participation de :

- La DREAL, la DDT42, AURA-EE, Dorémi, Effinergie, l'Institut négaWatt, Batitrend, Oïkos, l'AQC, Enertech, Pouget Consultants, l'association P2E,
- Les Plateformes Territoriales de Rénovation Énergétique suivantes : Ma Réno (Nord-Isère Durable), CC Sud Grésivaudan, Parc éco-habitat (CC Monts du Lyonnais), Rénov'Habitat Durable (Valence-Romans Agglo), Biovallée énergie (CCCPS/CCVD), Rénofuté (Ardèche), Régénéro (Genevois Français)
- Les Espaces Info-Énergies du réseau IERA : HESPUL, ALEC Lyon, AGEDEN, ALEC07
- Les autres partenaires PTRE : ADIL26, CAUE26, SOLIHA07

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Dorémi, Enertech, 2020. La rénovation performante par étapes - Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance BBC rénovation ou équivalent à terme en logement individuel. 196 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 18MAR001124

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par :

Dorémi : Vincent, LEGRAND, Jeremy CELSAN, Camille JULIEN, Fabien VIGIER
Enertech : Thierry RIESER, Stéphane MOTEAU

Coordination technique - ADEME : Jonathan LOUIS
Service : Service Bâtiment, Direction Villes et Territoires Durables

SOMMAIRE

Résumé.....	7
SYNTHÈSE GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE.....	9
INTRODUCTION CADRAGE DE L'ÉTUDE	21
GLOSSAIRE DE LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE	29
RAPPORT D'ÉTUDE DÉTAILLÉ	33
1. Une rénovation performante doit préserver le bâti, la santé et le confort des occupants ...	37
1.1. Des bâtiments « sains », exempts de pathologies	37
1.2. Le confort et la santé des occupants.....	41
2. Les interfaces : le cœur de la rénovation performante de l'enveloppe du bâtiment	47
2.1. Cas 1 : remplacement des menuiseries avant l'isolation des murs	50
2.2. Cas 2 : isolation des combles perdus avant l'isolation des murs	59
2.3. Cas 3 : isolation de la toiture en rampants avant l'isolation des murs	68
3. Quels parcours de rénovation pour atteindre la performance à terme ?	75
3.1. Les principales hypothèses de modélisation	76
3.2. Les principaux résultats	84
3.3. Quels sont les regroupements de travaux pertinents ?	99
4. Le choix de systèmes adaptés à la rénovation performante par étapes.....	103
4.1. Benchmark des systèmes de chauffage.....	103
4.2. Impact d'une surpuissance sur le rendement.....	109
4.3. L'intégration d'énergies renouvelables dans les projets de rénovation BBC	112
5. L'accompagnement des ménages dans la durée, jusqu'à la performance.....	117
5.1. Communication nationale et « bruit de fond »	118
5.2. Incitation financière	121
5.3. Sensibilisation, conseil, aide à la décision.....	123
5.4. Suivi et accompagnement dans la durée	124
Principales conclusions	126
Références bibliographiques	129
Index des tableaux et figures	131
Sigles et acronymes.....	135
ANNEXES	137
Annexe 1 - Choix de la méthode de calcul.....	138
Annexe 2 - Hypothèses de calcul	151
Annexe 3 - Parcours de rénovation et résultats de calculs des 10 typologies.....	157
Annexe 4 - Hypothèses économiques.....	178

Résumé

L'étude analyse les conditions de réussite nécessaires à la réalisation de rénovations performantes permettant au parc français de maisons individuelles d'atteindre, par étapes, le niveau de performance BBC rénovation ou équivalent à l'horizon 2050. Cette analyse intègre également les notions qui complètent la définition d'une rénovation performante, à savoir la **santé et le confort pour les occupants, ainsi que la qualité du bâti**, tout au long du parcours de rénovation.

Elle montre que les pratiques usuelles, nommées « **rénovations partielles** », qui consistent à juxtaposer des « gestes de travaux », ne permettent pas d'atteindre cet objectif. De plus, elles peuvent conduire à créer ou renforcer des désordres sur le bâti, avec impact possible sur le confort, voire la santé des habitants. L'étude montre aussi que renforcer la performance de chaque élément ne conduit pas non plus au bon niveau de performance dans cette approche « élément par élément ». **Ainsi, l'addition simple de travaux qualifiés de « travaux BBC-compatibles » n'est pas suffisante pour l'atteinte du niveau de performance BBC rénovation ou équivalent à terme**, en moyenne sur le parc.

L'étude montre la nécessité de disposer d'une **vision globale** de ce que sera le parcours de rénovation performante par étapes. Elle pointe l'importance majeure du traitement des **interfaces entre postes de travaux** afin de disposer d'une continuité de l'isolation, de la barrière freine-vapeur et de l'étanchéité à l'air, pour éviter les pathologies et atteindre un niveau BBC rénovation ou équivalent à terme à l'échelle du parc.

Après avoir posé plusieurs définitions structurantes, l'étude démontre par des études de cas et des calculs que l'atteinte du niveau BBC rénovation ou équivalent à terme par des parcours de 4 étapes de travaux ou plus à un coût acceptable et d'ici 2050 semble peu réaliste. Cette performance peut être atteinte en 1 à 3 étapes sous des conditions strictes décrites dans le rapport. La probabilité d'atteindre la performance décroît avec l'augmentation du nombre d'étapes. Les conditions de réussite pour atteindre la performance par étapes relèvent de considérations techniques, pédagogiques, économiques, financières, également sociales (accompagnement des ménages). L'étude met en exergue l'absence, et le besoin, de **préconisations techniques pour l'ensemble des cas de figures pratiques rencontrés sur le terrain dont le bon traitement est nécessaire pour aboutir à une rénovation performante à terme**. Le traitement de ces cas de figures pourrait prendre la forme d'outils pédagogiques et techniques à destination des ménages et des entreprises.

Enfin, l'étude met en évidence que **l'intégration des énergies renouvelables** est souhaitable et même parfois nécessaire afin d'atteindre le niveau de performance visé, notamment pour le chauffage (bois, PAC), dans les parcours en 3 étapes et moins. L'amélioration du bilan énergétique d'un parcours en 4 étapes ou plus avec l'intégration d'énergies renouvelables est envisageable d'un point de vue strictement énergétique, mais le nombre important d'étapes génère des risques pour la santé des occupants (cas du report de la ventilation), des sources de pathologies (humidité dans les parois) et/ou des sensations d'inconfort pour les utilisateurs (ponts thermiques). De plus, l'augmentation des températures de consigne résultant du non-traitement des interfaces risque d'annuler les économies d'énergie générées grâce aux sources renouvelables. Enfin, le coût des parcours en 4 étapes ou plus avec solutions renouvelables en compensation dépasse celui d'un parcours en une seule étape.

Abstract

This study analyzes the necessary conditions for carrying out step-by-step efficient renovations of the French houses stock in order to reduce its energy consumption to the "BBC renovation" (Low Consumption Building) performance level, set as a national objective, by 2050, while preserving the health and the comfort of the inhabitants as well as the building structure.

It shows that the usual practices, limited to juxtaposing "work gestures" and named "partial renovations", will never achieve this objective. Moreover, in this "element by element" approach, improving the performance of each element does not reach the right level of global performance either. This suggests that the ambiguous term of "BBC-compatible work" should be abandoned. These partial renovations often lead to creating or increasing disorders in the building, with possible negative consequences on the comfort, or health of the inhabitants.

The study demonstrates that a global approach is mandatory to plan each efficient renovation steps, and it highlights the major importance of the treatment of connections between building components, guaranteeing the continuity of insulation, vapour retarder and airtightness, and avoiding pathologies to achieve a BBC renovation level or equivalent.

After having defined several structuring terms, some case studies and calculations establish that it is impossible to achieve efficient renovations in 4 steps or more. It can be reached in 1 to 3-step process but under strict conditions, described in the report. The probability of achieving efficiency level decreases with increasing number of steps. Success conditions for step-by-step efficient renovations are then detailed; they include technical, educational, economic, financial and social considerations (support for householders). The study highlights the lack, and so far the urgent requirement, of technical recommendations for all the practical scenarios encountered on work site, which need to be organised in educational and technical tools for householders and professionals.

Finally, the study concludes that integration of renewable energies in efficient renovations is advisable and even sometimes necessary in order to achieve the low energy target, in particular for heating (wood, heat pump). But if it is possible from time to time to balance lower overall efficiency with renewable energy components, this generally costs more than directly engaging in a complete and efficient renovation.

SYNTHÈSE GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE

Contexte et constats sur la rénovation énergétique

L'objectif français est de « disposer d'un parc bâti BBC rénovation ou assimilé à l'horizon 2050 » (Code de l'Énergie), en moyenne nationale. Atteindre cet objectif est nécessaire pour relever simultanément les défis climatiques (neutralité carbone en 2050), énergétiques (division par 2 des consommations énergétiques à 2050) et sociaux (lutte contre la précarité).

En ce qui concerne les logements individuels (plus de 16 millions de maisons en résidence principale, 56% des logements français), d'après plusieurs études en cours, le nombre de rénovations « BBC ou équivalent » est à ce jour négligeable au regard des rythmes à atteindre (plusieurs centaines de milliers de rénovations BBC rénovation ou équivalent par an) :

- 3780 rénovations « BBC rénovation ou équivalent » réalisées en une seule fois ;
- Quelques centaines de rénovations « BBC par étapes » initiées (1^{ère} étape réalisée) et aucune menée à terme depuis 2011.

Les pratiques actuelles majoritaires consistent à réaliser des opérations d'entretien ou de maintenance (principalement changement de fenêtres et de chaudière) et des rénovations ponctuelles (1 à 2 postes de travaux en général) en fonction des opportunités offertes par les aides financières (isolation des combles, des planchers bas, des murs...). Ces travaux n'ont pas permis à ce jour d'infléchir la courbe des consommations vers le niveau BBC rénovation visé pour le parc bâti dans son ensemble. Par ailleurs, ils peuvent participer à l'apparition ou au renforcement de désordres, de pathologies et de problèmes sanitaires (moisissures dans le logement, baisse du renouvellement d'air hygiénique...), malgré l'amélioration de confort pouvant être ressentie par les occupants.

Objectif et méthode de l'étude

L'étude « Rénovation performante par étapes » vise à **identifier les conditions de réussite permettant d'atteindre la performance à terme en rénovation par étapes, en maison individuelle**. L'étude s'appuie sur les enseignements issus de 2 approches : qualitative et calculatoire.

L'approche qualitative s'intéresse au confort des occupants, à leur santé (qualité de l'air intérieur notamment), mais également à la préservation du bâti. Elle se fonde à la fois sur des études publiées sur ces domaines, et des analyses des nombreux retours de terrains (pratiques actuelles, apparitions de moisissures de plus en plus fréquentes...). Elle **détaille des exemples très classiques de difficultés qui apparaissent lorsque deux postes de travaux ne sont pas traités simultanément** : isolation des combles ou remplacement des fenêtres et report de l'isolation des murs. Ce dernier cas est **fréquemment observé** sur le parc de logements alors qu'il conduit à de **nombreuses impasses de rénovation** : les ménages ne sont logiquement pas prêts à détruire des travaux récemment effectués (reprise des tableaux de fenêtres, remplacement des nouveaux volets roulants...) pour assurer une continuité de l'isolation nécessaire à la performance. Pourtant, ne pas traiter correctement l'interface menuiserie – mur génère des ponts thermiques en périphérie des menuiseries et favorise le développement de moisissures. L'étude montre par des exemples concrets et très fréquents les enjeux et les points de vigilances lors du traitement d'une interface entre deux postes réalisés en étapes distinctes.

L'approche calculatoire se concentre sur 10 typologies de logements construits avant 1982, auxquelles sont appliquées des parcours de travaux allant de 1 à 6 étapes. Les conclusions des calculs sont analysées à l'échelle du parc entier pour définir une stratégie à porter au niveau national : quels sont les parcours menant à une consommation moyenne nationale (chauffage + production d'eau chaude sanitaire) inférieure au seuil BBC rénovation ($80 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{\text{shab.an}}$) ?

Les deux approches se complètent pour **définir les conditions de réussite d'une rénovation par étapes performante à terme**, conditions présentées dans cette synthèse.

Définitions-clés pour la rénovation énergétique¹

Il est fréquent de parler de « rénovation énergétique » au sens large, sans évoquer le niveau de consommation énergétique de ces rénovations ni la façon de l'atteindre. Les différentes appellations sont légions : rénovation par étapes, rénovations partielles, élément par élément ou par gestes de rénovation, rénovation globale, travaux BBC-compatibles, rénovation BBC par étapes, rénovation par morceaux...

Pour plus d'efficacité dans les politiques publiques et les débats, il est fondamental de **distinguer le niveau de performance atteint par la rénovation du parcours de rénovation emprunté**. Le parcours de rénovation peut être conduit en **plusieurs opérations de travaux successives (« rénovation par étapes »)** ou en **une seule opération de travaux (« rénovation complète »)**. Il apparaît donc indispensable de préciser les définitions ci-après.

La rénovation performante d'un bâtiment est un ensemble de travaux qui permettent au parc bâti d'atteindre **a minima le niveau BBC rénovation ou équivalent**, en moyenne nationale et à l'horizon 2050, sans mettre en danger la **santé des occupants, en préservant le bâti de toute pathologie liée à ces travaux et en assurant le confort thermique et acoustique été comme hiver**.



Figure A : définition de la rénovation performante. Source : Dorémi.

Le bâtiment rénové performant peut soit atteindre lui-même le niveau de consommation BBC rénovation, soit contribuer à l'atteinte de cet objectif pour le parc bâti en moyenne nationale, notamment par la mise en œuvre d'une combinaison de travaux adaptée.

Un bâtiment rénové performant est un bâtiment qui a traité les **6 postes de travaux** (isolation des murs, des planchers bas et de la toiture, remplacement des menuiseries extérieures, ventilation et production de chauffage/eau chaude sanitaire) **ainsi que les interfaces** (jonctions physiques entre ces postes de travaux assurant l'étanchéité à l'air et la continuité de l'isolation) **et les interactions** entre ces postes (bon dimensionnement des systèmes notamment).

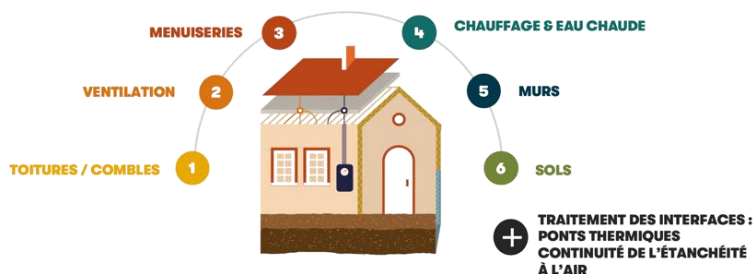


Figure B : schéma des 6 postes de travaux nécessaires à la performance thermique (source : Dorémi)

Le niveau BBC rénovation fait référence aux termes de l'[arrêté du 29 septembre 2009](#), soit un objectif de consommation de 80 kWh en énergie primaire par m² SHON et par an modulée selon la situation géographique et l'altitude du lieu considéré.

¹ Un glossaire plus complet est proposé en début de rapport

Une rénovation peut être performante en une seule étape de travaux : c'est la **rénovation complète et performante (ou rénovation globale)**. Elle peut être également performante en plusieurs étapes : c'est la **rénovation performante par étapes, ou rénovation par étapes performante à terme**. Le terme est l'horizon 2050, une fois l'ensemble des étapes de travaux réalisées. La complexité de l'exercice impose des **conditions de réussite décrites dans cette étude** (nombre d'étapes, traitement des interfaces et interactions, ...).

L'atteinte de la performance requiert une **approche globale de la rénovation** (ou une *vision* globale) ; elle consiste en une analyse architecturale et technique pour définir les bouquets de travaux pertinents et anticiper la bonne gestion des interfaces et des interactions entre postes de travaux.

La rénovation partielle est une action de travaux qui représente l'essentiel des pratiques actuelles de travaux énergétiques (approche « élément par élément », par « gestes de travaux » ou par « petits bouquets de 2 à 3 travaux »), sans approche globale, **non coordonnées et ne traitant que quelques postes de travaux**. Cette approche de la rénovation ne permet pas d'atteindre la performance à terme.

D'abord ne pas nuire... éviter les non-qualités²

Une rénovation qui préserve la santé des occupants et le bâti doit respecter des bonnes pratiques en matière de migration d'humidité et de vapeur d'eau, afin d'éviter les phénomènes de condensation à l'origine de développements de moisissures et de pathologies diverses pour le bâti, qui sont également préjudiciables à la qualité de l'air intérieur et à la santé des occupants.

Parmi ces bonnes pratiques, les impératifs suivants sont à mettre en pratique :

- Assurer un **renouvellement d'air suffisant par une ventilation mécanique contrôlée**. Par exemple, une ventilation continue à un débit de 0,6 vol/h permet d'évacuer l'humidité³ et les autres polluants de l'air et de garantir ainsi une bonne qualité d'air intérieur **dans toutes les pièces du logement** ;
- Accorder un **soin particulier au traitement des interfaces**⁴, permettant une continuité de la barrière freine-vapeur, de l'étanchéité à l'air et le traitement des principaux ponts thermiques qui pourraient créer des points froids pathogènes si l'interface entre deux postes de travaux n'est pas abordée dans sa globalité.

La problématique du traitement des interfaces devient concrète lorsque l'on regarde de près les **multiples configurations**⁵ rencontrées en rénovation, et toutes les **combinaisons imaginables entre ces différentes configurations**.

La complexité du traitement des interfaces augmente encore lorsque les postes de travaux de part et d'autre de l'interface ne sont pas réalisés simultanément, mais en 2 étapes distinctes et séparées dans le temps (absence de coordination).

² Non-conformités, malfaçons, désordres et dysfonctionnements qui peuvent donner lieu à l'apparition de pathologies du bâti, lesquelles peuvent avoir des conséquences structurelles et/ou sanitaires (définition de l'Agence Qualité Construction).

³ Débit utilisé dans l'étude Climaxion (Enertech Migration de vapeur, 2017) pour définir les solutions d'isolation des murs à mettre en œuvre dans les rénovations, en l'absence d'autres études définissant un débit minimum à prendre en compte.

⁴ Les interfaces sont des jonctions physiques entre 2 postes de travaux nécessitant un jointoiement (définition AQC).

⁵ La notion de « postes de travaux » n'est pas suffisante pour aborder les problématiques de conception et de mise en œuvre. Pour chaque poste, on distingue de multiples configurations : pour les murs : (Isolation Thermique par l'Extérieur, Isolation Thermique par l'Intérieur, ou mixte ITE/ITI), pour les toitures (combles perdus, rampants, sarking, toiture-terrasse...), pour les planchers bas (sur terre-plein, sur vide-sanitaire, sur local non chauffé...), pour les menuiseries extérieures : pose en feuillure, en tunnel, en applique, « en rénovation » ...), etc. Cette liste n'est évidemment pas exhaustive, et les combinaisons entre ces configurations sont très nombreuses.

Le rapport présente une matrice (Dorémi, Enertech, Matrice des interfaces et interactions, 2019) afin d'identifier en première approche les **configurations** qui ne posent pas de problème *a priori*, les configurations qui nécessitent d'anticiper les étapes ultérieures et de réaliser des reprises de travaux jugées envisageables, et les configurations qu'il semble irréaliste de traiter en 2 étapes distinctes.

Les exemples d'interfaces développées dans le rapport (partie 2) alertent sur les points de vigilance architecturaux et techniques qui peuvent apparaître en cas de report d'un poste de travaux, et selon plusieurs configurations. Le rapport présente également des pistes de solutions à mettre en œuvre afin d'anticiper les étapes ultérieures et/ou de reprendre les travaux précédents. Cependant, même si elles sont techniquement réalisables, ces solutions peuvent entraîner des **surcoûts** et s'accompagner de **freins psychologiques**, avec le risque que le ménage ne mène pas la rénovation à son terme : le traitement des interfaces ajoute un niveau de complexité à la rénovation par étapes, et limite l'atteinte de la performance à terme.

Ce travail d'analyse fine reste à systématiser pour toutes les configurations délicates, afin d'éclairer les décisions en procédant à des **regroupements de travaux judicieux** et en excluant certaines dissociations (comme le cas d'embarquer la ventilation dès lors qu'on remplace les menuiseries extérieures, par exemple).

Les **rénovations partielles**, par gestes de travaux, ne répondent pas aux critères de réussite des rénovations performantes à terme, car elles ne traitent pas simultanément les différents éléments de l'enveloppe, et par conséquent ne peuvent traiter **ni la continuité de la migration de vapeur, ni celle de l'étanchéité à l'air, ni les ponts thermiques, au niveau des interfaces**. L'approche qualitative conduit au contraire à viser une 1^{ère} étape de travaux conséquente, en regroupant judicieusement plusieurs postes de travaux.

Atteindre la performance à terme : les principaux résultats de calcul

Le rapport restitue un calcul sur 10 typologies de maisons représentatives du parc d'avant 1982, et 5 parcours de rénovation entre 1 et 6 étapes permettant de traiter les 6 postes de travaux d'une rénovation performante : isolation des murs, de la toiture, du plancher bas, remplacement des menuiseries extérieures, systèmes de ventilation et de chauffage/ECS.

Cette analyse fait apparaître les conclusions suivantes pour le parc construit avant 1982 (cf. Figure C) :

- La **rénovation complète et performante permet d'amener le parc au niveau de performance requis⁶**,
- Les **rénovations en 2 ou 3 étapes de travaux** peuvent amener le parc au niveau de performance requis **sous réserve du bon traitement des interfaces et interactions** et du regroupement de **4 à 5 postes de travaux judicieusement choisis dans la première étape**,
- Les **pratiques actuelles** (traitement de 5 postes de travaux sur 6, avec une performance alignée sur les seuils des aides financières) **ne permettent pas d'amener le parc au niveau de performance à terme**. Ce qui est également le cas pour un parcours par gestes de travaux embarquant un niveau de performance intrinsèque compatible avec le niveau BBC rénovation pour les 6 postes mais sans prendre en compte les interfaces et interactions. Pour ces parcours, les niveaux de consommation du parc à terme sont 1,4 à 2,7 fois plus élevés que les objectifs.

⁶ Objectif fixé à 80 kWhEP/m²SHAB.an pour le chauffage et l'ECS en calcul physique, soit l'équivalent aux 80 kWhEP/m²SRT.an pour les 5 postes du label BBC rénovation (calcul conventionnel).

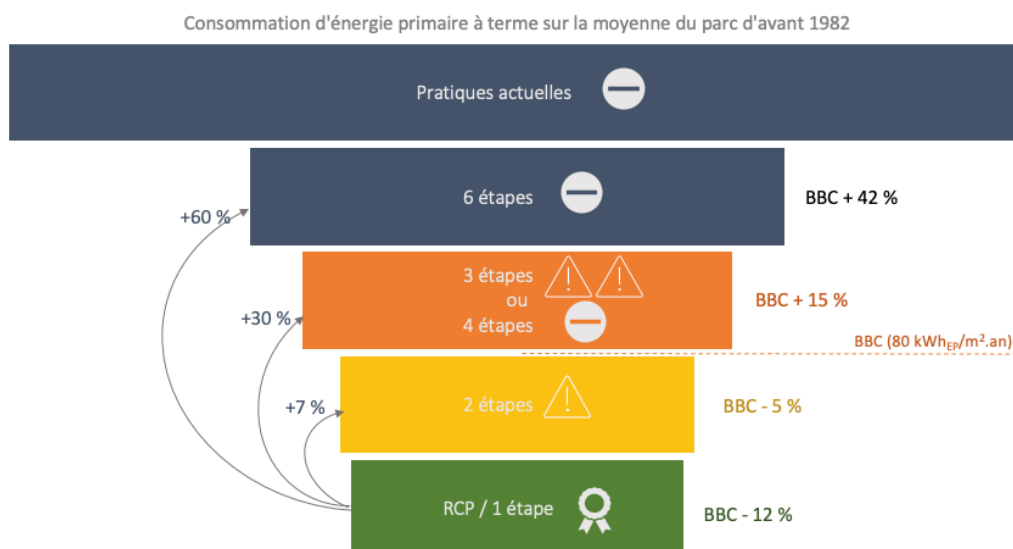


Figure C : Écarts de consommation sur la moyenne du parc construit avant 1982 entre les différents parcours de rénovation selon le nombre d'étapes, et écart à l'objectif BBC rénovation ou équivalent.

Légende : RCP = Rénovation Complète et Performante ;

⊖ : parcours ne permettant pas d'atteindre les objectifs de consommation BBC rénovation ni le confort pour les occupants, leur santé, la préservation du bâti et pouvant générer des impasses de rénovation ;

⚠⚠ : parcours comportant des risques pour le confort, la santé et/ou la préservation du bâti mais pouvant parfois atteindre les objectifs de consommation BBC rénovation sous conditions fortes ;

⚠ : parcours pouvant atteindre le niveau BBC rénovation sous conditions et préservant santé et confort pour les occupants et préservation du bâti ;

🏆 : parcours permettant d'atteindre les objectifs de consommation, de confort et santé pour les occupants et la préservation du bâti.

Les écarts relatifs entre les parcours sont significatifs (cf. Figure C) : un programme de rénovation composé de travaux dont chacun atteint la performance intrinsèque BBC rénovation (résistance thermique d'une paroi opaque, conductivité thermique d'une paroi vitrée, rendement d'un système de chauffage, etc.) permet effectivement d'atteindre un niveau de performance « BBC rénovation ou équivalent », sur la moyenne du parc, en 1 ou 2 étapes si les interfaces sont bien traitées, mais augmente **de + 30% les consommations énergétiques en moyenne sur le parc** s'il est mis en œuvre en 3 ou 4 étapes, et à **jusqu'à +60% en moyenne du parc en 6 étapes**.

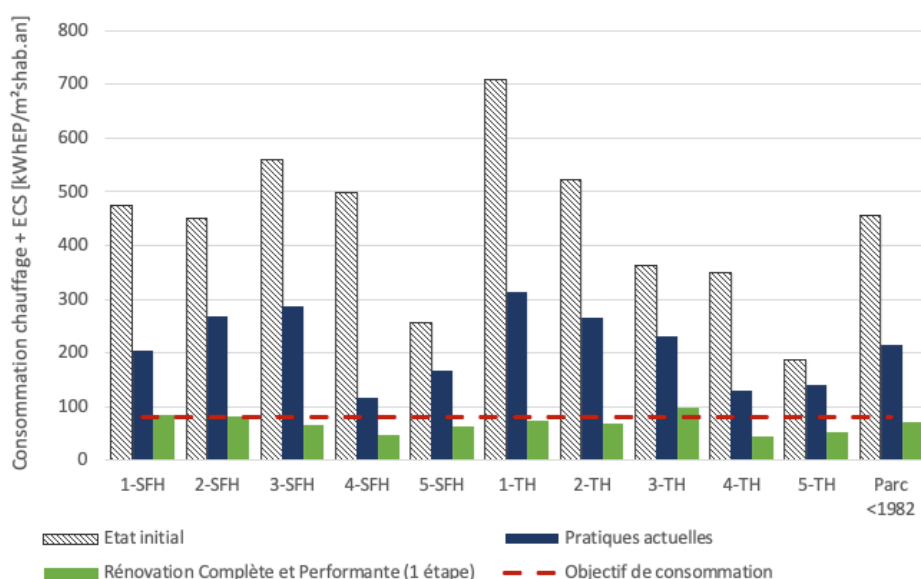


Figure D : Comparaison des consommations de chauffage et d'ECS avant et après rénovation, pour les parcours rénovation en une étape (RCP) et en 6 étapes (pratiques actuelles).

La Figure D décline les résultats des calculs pour les parcours de rénovation en une seule étape (RCP) et les pratiques actuelles pour les 10 typologies étudiées et sur la moyenne du parc de maisons individuelles construites avant 1982. Ce graphique apporte une conclusion complémentaire : **les typologies de maisons** (compacité, mitoyenneté, impact des ponts thermiques...) et le **programme de travaux envisagé** (par exemple ITE ou ITI, chaudière gaz ou bois, etc.) fait varier le niveau de performance à terme autour de l'objectif de consommation (entre 43 kWh_{EP}/m²_{shab.an} et 97 kWh_{EP}/m²_{shab.an} pour la RCP pour un objectif national de 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an}). Il convient donc de retenir **qu'une stratégie de rénovation doit concerner le parc de logement dans son ensemble** (moyenne du parc rénové en RCP : 70,7 kWh_{EP}/m²_{shab.an}). Si a contrario les efforts étaient limités à certaines typologies, il faudrait réaliser des efforts beaucoup plus conséquents sur d'autres (ce qui peut mettre en péril l'équilibre économique de la rénovation).

En complément, l'étude révèle que les écarts de consommation entre parcours d'une même typologie sont très variables (parfois élevés, parfois faibles) et ne dépend pas du nombre d'étapes. Ce résultat confirme l'analyse qualitative précédente (matrice des interfaces) selon **laquelle certaines configurations de travaux sont plus faciles à traiter non-simultanément** (impact moindre sur la performance à terme) **tandis que d'autres sont plus délicates** (impact plus élevé).

Les systèmes

La **ventilation** concentre plusieurs enjeux simultanément : la gestion de l'humidité et des polluants, la réduction des consommations de chauffage et d'électricité. Elle doit être mise en place dès la 1^{ère} étape de travaux afin de réduire le risque de condensation (et par conséquent les pathologies) et d'améliorer la qualité de l'air intérieur. La ventilation double-flux semble être le système le plus efficace en rénovation, c'est-à-dire capable d'atteindre efficacement ces différents objectifs, **si elle est bien posée, bien entretenue, et équipée d'un échangeur à haut rendement** (85% selon Eurovent et/ou supérieur à 70% selon PHI⁷) **et de ventilateurs basse consommation** (< 0,25 W/m³/h).

⁷ PHI : certification Passive Haus Institut / Eurovent : Certification européenne

Le **système de chauffage** doit posséder un bon rendement, y compris à basse puissance puisque les besoins sont extrêmement réduits dans une rénovation performante. La plage de modulation de certaines chaudières gaz est importante, et autorise leur mise en place dès lors que les déperditions ont été divisées par deux à la première étape de travaux. Pour les chaudières bois, fioul, les PAC, ou encore les poêles à bois, la plage de modulation est actuellement plus restreinte, il faudra les remplacer en fin de parcours. Lorsque le système de chauffage (défaillant) doit être remplacé en début de parcours, il est nécessaire d'embarquer simultanément la rénovation de l'enveloppe pour réduire fortement les déperditions. Dans le cas contraire une surconsommation importante est constatée, incompatible avec la performance visée (excepté pour certaines chaudières gaz très modulantes, seuls systèmes de chauffage actuellement sur le marché disposant d'une grande plage de modulation de puissance). Dans certaines rénovations où l'équipement de production de chaleur est remplacé avant réduction des besoins, l'occupant va devoir remplacer le système une seconde fois en fin de parcours.

Les **consommations pour la production d'ECS** deviennent importantes dans le bilan énergétique d'une rénovation performante (de 20% à 70% des consommations du logement) et doit impérativement être traité en rénovation performante : mise en place de systèmes hydroéconomes, calorifugeage des réseaux de distribution et surisolation des ballons électriques s'ils sont conservés.

Les **énergies renouvelables (EnR) pour le chauffage** (poêle bois, chaudières bois, pompes à chaleur, solaire thermique) doivent être intégrées prioritairement sur toutes les maisons pour des parcours en une à trois étapes. Cependant, la **compensation** du moins bon bilan énergétique d'un parcours en quatre étapes ou plus **par une production EnR n'est pas souhaitable** : l'investissement nécessaire dépasse systématiquement le coût d'une rénovation complète (en une seule étape). Par ailleurs, la multiplicité du nombre d'étapes de ces parcours compensés par énergies renouvelables risque de générer une mauvaise qualité d'air intérieur (report de la ventilation notamment), des risques de **pathologies** dans les parois (humidité dans les murs, ponts thermiques, etc.) et donc d'**inconfort** pour les occupants : dans ce cas, la température de consigne est augmentée pour **compenser cet inconfort impliquant une surconsommation**. Pour atteindre et assurer un maintien de la performance dans le temps (bilan énergétique et confort pour les occupants), il est donc **préférable de réduire le nombre d'étapes de travaux, plutôt que d'investir dans des EnR pour compenser une consommation d'énergie trop élevée** liée au nombre d'étapes.

Les conditions de réussite techniques et outils à développer

L'étude montre que la rénovation performante par étapes est envisageable, sous certaines conditions, bien qu'elle soit plus complexe à réaliser.

Dans tous les cas, une **approche globale de la rénovation** est requise, celle-ci n'est pas réservée à la rénovation en une seule fois⁸. Quel que soit le nombre d'étapes, cette approche globale implique :

- De respecter les **bonnes pratiques en matière de migration d'humidité et de vapeur d'eau** ;
- D'assurer un renouvellement d'air suffisant pour **garantir une bonne Qualité de l'Air Intérieur** ;
- De **traiter les 6 postes de travaux au bon niveau de performance** ;
- D'accorder un soin particulier au **traitement des interfaces** (continuité de la barrière freine-vapeur, de l'étanchéité à l'air et traitement des principaux ponts thermiques) ;

⁸ C'est pourquoi il est clairement préférable de retenir le terme de rénovation complète à celui de rénovation globale pour les rénovations performantes réalisées en une seule fois.

- De respecter un ensemble de préconisations pour le **choix des systèmes** de ventilation, de chauffage et de production d'ECS ;
- De réaliser un plan de financement sur l'ensemble du parcours.

La maîtrise des interfaces est l'élément-clé de la performance, et impose d'appliquer l'ensemble des conditions suivantes à tous les parcours de rénovation envisagés :

- Un parcours de rénovation limité à **2 ou 3 étapes de travaux**,
- ET une bonne conception en amont, afin de regrouper les postes de travaux judicieusement et notamment le regroupement de 4 à 5 postes dans une première étape,
- ET une excellente coordination des différents corps de métiers, même à des années d'intervalle pour assurer un **traitement performant des interfaces et des interactions**. Ce point constitue aujourd'hui un défi majeur dans la mise en place d'une dynamique massive de rénovations par étapes performantes à terme.

L'étude met en relief la nécessité :

- De poursuivre le travail d'analyse détaillée sur les points de vigilance associés aux différentes configurations d'interfaces rencontrées en rénovation,
- D'identifier clairement, au regard des objectifs, les interfaces qu'il est envisageable/délicat/aberrant de traiter en plusieurs étapes, et les regroupements de travaux judicieux,
- De **sensibiliser les ménages** et d'aider les accompagnants à contribuer à une prise de décision éclairée entre les différents parcours de rénovation performante (en une fois ou en 2 à 3 étapes),
- Et d'**outiller, former et accompagner les professionnels** à la réalisation de rénovation performante en une seule ou plusieurs étapes (3 maximum) avec par exemple des carnets de détails appuyant la conception, la mise en œuvre et facilitant la traçabilité des choix réalisés.

De nouvelles pratiques et orientations

Au-delà des préconisations techniques listées précédemment, l'étude pointe quelques évolutions souhaitables des dispositifs d'accompagnement et de financement de la rénovation énergétique, qui sont autant de conditions de réussite à mettre en place (cf. partie 5 du rapport détaillé).

Les conclusions appellent en effet :

- **A écarter les rénovations partielles**, dont la juxtaposition des gestes de travaux ne permet pas d'atteindre une performance à terme et risque de favoriser le développement de pathologies entre étapes de travaux,
- **A promouvoir et faciliter le financement et la réalisation de rénovations performantes en une étape** (rénovation complète et performante, RCP),
- **A accompagner des rénovations performantes par étapes** (jusqu'à 3 étapes maximum) lorsque la RCP ne peut pas être mise en œuvre pour des contraintes techniques, psychologiques (reprise de travaux récents), sociologiques et/ou architecturales.
- **A faire évoluer les systèmes de production de chauffage** basés sur les énergies renouvelables pour qu'ils proposent des plages de modulation plus importantes.

Ceci implique de :

- Faire évoluer la communication nationale autour de la rénovation énergétique en intégrant la notion de performance (sain + préservation du bâti + confortable + consommation BBC rénovation ou équivalent) pour les rénovations en une ou plusieurs étapes (3 maximum),
- **Densifier le dispositif d'information, conseil et accompagnement des ménages** pour pouvoir accélérer la rénovation performante, et le faire évoluer pour y intégrer l'accompagnement technique en amont pendant et après le chantier nécessaire à cette rénovation performante.
- Soutenir la montée en compétence et l'accompagnement des professionnels dans leurs changements de pratiques, afin de pouvoir traiter les nouveaux enjeux, complexes, de la rénovation performante par étapes.

Il apparaît donc fondamental, en maison individuelle, de favoriser la rénovation complète et performante et de construire d'urgence les outils pour rendre possible la rénovation performante par étapes en 2 ou 3 étapes de travaux. C'est un impératif majeur à l'échelle nationale pour réduire les consommations d'énergie, mais également pour préserver la santé des occupants, leur confort et le bâti.

Étude de cas : les impasses de la rénovation

*Ci-contre : illustration de la typologie 3-SFH utilisée pour cette étude de cas.
Source : (TABULA Episcopo, 2015). Étude de cas inspirée de retours terrain.*



M et Mme X, ménage modeste, habitent une maison individuelle construite dans les années 1960 et chauffée au fioul. Non isolée, cette maison est en classe G du DPE.

Conscients de leur facture élevée (3 450 €/an pour chauffage, ECS, électricité des auxiliaires – chauffage et ventilation, abonnements compris), ils contactent un artisan qui leur propose une **pompe à chaleur air-eau** en remplacement de leur chaudière fioul et du ballon électrique.

L'artisan leur propose une PAC de 20 kW double service non modulante, pour environ 13 000 € TTC. Cette action bénéficiant de MaPrimeRenov, de CEE et de CEE « coup de pouce », il reste environ 6 000 € à payer. Le couple mobilise un éco-prêt à taux zéro pour financer cette somme et n'a pas mobilisé de fonds propres. Leur facture chute à 2 150 € par an, le ménage est satisfait.

Dans les années suivantes, ils sont contactés successivement par deux entreprises qui leur proposent **l'isolation des combles à 1€** puis **l'isolation du plancher bas à 1€**. Ces travaux réalisés, leur facture descend encore à 1 800 € par an, avec un temps de retour instantané.

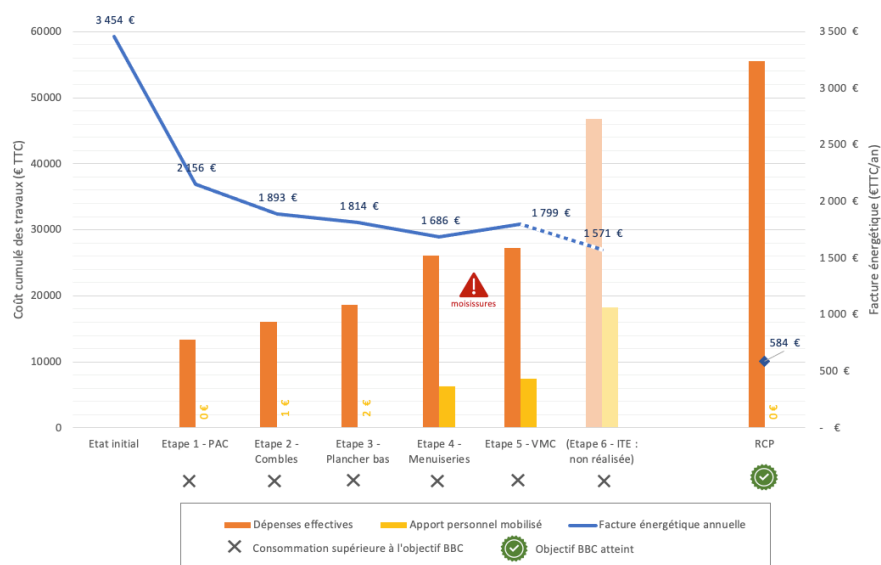
Quelques années après, le couple souhaite **changer les menuiseries** qui sont largement défraîchies. Un artisan leur propose du double vitrage actuel en pose « rénovation » et le changement de la porte d'entrée pour environ 7 400 € TTC. Malgré MaPrimeRenov et les CEE, il reste 6 300 € à financer, or l'éco-PTZ n'est plus disponible car déjà mobilisé plus de 5 ans auparavant. Le couple devra payer de sa poche, ce qu'il fait. De plus, au bout de quelques mois, des moisissures apparaissent au-dessus de la douche. Après avoir questionné un spécialiste, le couple se rend compte que leur maison est à présent plus étanche à l'air et qu'il leur faut une ventilation mécanique. Ils font donc installer une **VMC hygroréglable** en urgence pour 1 200 € TTC, et bénéficient de CEE, soit 1 100 € de plus à financer sur fonds propres. La facture ne baisse qu'un peu mais, comme l'envie de changer les fenêtres était surtout motivé par l'usage, le couple n'en est pas conscient. En revanche, ils sont devenus très méfiants vis-à-vis de la rénovation à la suite de la pathologie qu'ils ont subie.

Pendant ce temps, leurs voisins, M et Mme Y, ménage modeste également, ont réalisé une **rénovation complète et performante** de leur maison, en tous points identique, pour 55 500 €_{TTC} environ. Après déduction de 27 300 € d'aides directes (MaPrimeRenov, CEE et CEE « coup de pouce »), il leur restait 28 200 € environ à financer par un éco-PTZ. **Ils n'ont engagé aucun apport personnel**, pour une opération dont le temps de retour est inférieur à 10 ans. Ils ont quasiment divisé sa facture annuelle par 6 (performance thermique des isolants et menuiseries plus élevées, les 6 postes de travaux traités), **sans pathologies** (bon traitement des interfaces) et **avec un air sain** (VMC double-flux). M et Mme Y se sentent bien dans leur maison, été comme hiver, et dans leur budget mensuel, le **gain sur la facture énergétique** (239€/mois de moins) **compense largement les mensualités de l'éco-PTZ** (167€/mois).

Attirés par les faibles factures énergétiques de la famille Y, M et Mme X **se renseignent pour réaliser une ITE**, dernier poste à améliorer. Mais le devis à environ 19 500€, réduit à 11 000 € grâce à MaPrimeRenov et aux CEE, mais non finançable par un éco-PTZ, leur semble beaucoup trop cher, surtout avec l'argent engagé quelques années auparavant. L'artisan, formé à la rénovation performante, leur indique également que la PAC est déjà surdimensionnée et devra être remplacée.

Par ailleurs, ils n'ont aucune envie de se relancer dans les dérangements que provoquent les travaux ni de risquer à nouveau une pathologie (de fait, les menuiseries n'ont pas de dormants élargis, il y aura un pont thermique en tableaux qui ferait moisir l'ancien dormant bois recouvert par la pose « rénovation » ; et d'autre part, l'isolation des combles à 1€ a été faite sans recouvrir la tête de mur, donc il y aurait un pont thermique important à la jonction plafond - mur).

Le couple décide donc de ne pas réaliser ces travaux et la facture énergétique de la maison reste à 1800 €/an soit 3 fois plus que leurs voisins.



L'écart de coût de travaux entre les deux parcours correspond à la meilleure performance de chaque poste de travaux pour le parcours RCP (ventilation double flux, épaisseurs d'isolant plus élevées, membranes d'étanchéité à l'air, ...) et au bon traitement des interfaces (bonne étanchéité à l'air du projet, peu de ponts thermiques).

INTRODUCTION

CADRAGE DE L'ÉTUDE

Contexte : les objectifs nationaux

La loi pour la transition énergétique et la croissance verte (LTECV) d'août 2015 a inscrit dans le Code de l'énergie un objectif ambitieux : la consommation moyenne du parc bâti français doit être rénovée aux normes BBC (Bâtiment Basse Consommation) rénovation ou assimilées à l'horizon 2050⁹. Dans cette introduction, une rénovation sera dite « performante » si elle atteint cet objectif du Code de l'énergie (norme BBC rénovation ou assimilée), et ce terme sera précisé par la suite.

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)¹⁰ confirme l'ambition du rythme de rénovations, en visant d'ici 2020 370 000 « rénovations thermiques radicales » de logements et 700 000 par an à partir de 2030. L'objectif visé est d'« aboutir au niveau assimilable aux normes bâtiment basse consommation (BBC) en moyenne sur la totalité [du] parc en 2050 », renvoyant ainsi à la définition précédente du BBC rénovation. La SNBC mentionne également le risque des « impasses des rénovations partielles qui ne pourraient évoluer vers des rénovations plus globales », qui fait l'objet de la présente étude.

Atteindre cet objectif de rénovation performante au niveau BBC rénovation ou équivalent, en moyenne du parc national, est donc au cœur des politiques de **transition énergétique**, mais aussi de la **lutte contre les bouleversements climatiques et contre la précarité énergétique**. C'est également un enjeu majeur pour le **développement économique, industriel et la création d'emplois** pour les trente prochaines années.

⁹ « Pour répondre à l'urgence écologique et climatique, la politique énergétique nationale a pour objectifs [...] de disposer d'un parc immobilier dont l'ensemble des bâtiments sont rénovés en fonction des normes " bâtiment basse consommation" ou assimilées, à l'horizon 2050, en menant une politique de rénovation thermique des logements concernant majoritairement les ménages aux revenus modestes » ; [Article L100-4 alinéa 7 du Code de l'énergie](#).

¹⁰ Les références à la SNBC sont issues du rapport SNBC de mars 2020 consultable ici : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf

Réformes du niveau BBC envisagées en 2020

La présente étude se base sur un raisonnement en énergie primaire, suivant la définition originelle du BBC rénovation (cf. [arrêté du 29 septembre 2009](#)), soit une consommation conventionnelle sur 5 usages (Cep) de 80 kWh_{EP}/m²_{SRT modulée.an} (voir partie 3.1 pour l'adaptation à la méthode de calcul de l'étude).

Cette étude ne prend donc pas en compte les éventuelles réformes envisagées dans le « projet de stratégie à long terme pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments à usage résidentiel et commercial, public et privé » [soumis à consultation par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire \(MTES\) au 1^{er} trimestre 2020](#). Ce projet propose notamment :

- de redéfinir le niveau BBC à 60 kWh_{EF}/m².an (en énergie finale donc)
- et d'introduire une notion d'« équivalent rénovation », définie par un gain de -65 kWh_{EF}/m²

Le raisonnement en énergie finale aurait pour conséquence de renforcer davantage l'exigence de performance sur les logements dont le chauffage n'est pas électrique, rendant plus difficile l'installation de chauffage renouvelable (biomasse et réseaux de chaleur compris). Et à l'inverse, cette logique réduirait les exigences de performance sur les logements chauffés à partir d'une source électrique. Ces évolutions ne changeraient cependant pas fondamentalement la nature des conclusions de cette étude.

La notion d'« équivalent rénovation » vise à cumuler des gestes de travaux pour les rendre comparables à des rénovations performantes, en visant un gain de -65 kWh_{EF}/m² par rapport à la consommation moyenne du parc existant et en particulier celle du parc d'avant 1975. Or, les analyses conduites dans le cadre de cette étude montrent que la consommation actuelle du parc est loin de faire consensus (cf. partie 3). D'après les données de consommation du parc actuel (cf. annexe 1), il paraîtrait judicieux de définir l'« équivalent rénovation » sur un gain d'au moins -230 kWh_{EP}/m², et non -65 kWh_{EF}/m², pour atteindre l'objectif nationale de consommation de 80 kWh_{EP}/m².

Un focus spécifique : la maison individuelle

Au sein du parc bâti français, les maisons individuelles représentent près de la moitié des consommations du secteur résidentiel-tertiaire, de l'ordre de 300 TWh_{EF}¹¹, loin devant le tertiaire public ou privé et les logements collectifs.



Figure 1 : Répartition « en grande masse » des consommations (énergie finale) du bâtiment, tous usages. Les pavés sont à l'échelle des consommations énergétiques du secteur représenté, tous usages. Sources : CEREN, INSEE, ADEME et SDES.

Le chauffage des maisons d'avant 1975 représente à lui seul **10% des consommations énergétiques françaises**¹², c'est pourquoi cette étude est focalisée sur cette typologie particulière de bâtiments que sont les maisons.

Du point de vue méthodologique :

- les maisons peu isolées construites jusqu'à 1982 sont intégrées dans cette étude, soit un **parc de 10 millions de logements** représentant 62% du parc de maisons individuelles ;

¹¹ Sources : SDES, ADEME et INSEE.

¹² Sources : CEREN, INSEE, ADEME et SDES.

- les postes **chauffage** et **ECS** sont principalement traités ici : le chauffage en tant que principal poste de consommation *avant* rénovation, et l'ECS car il devient un poste important de consommation *après* rénovation.

Le parc de maisons a de très nombreuses spécificités qu'il est impératif de prendre en compte pour conduire une analyse pertinente des conditions de réussite de rénovations performantes par étapes.

A titre d'exemples, mentionnons les points suivants :

- Les maîtres d'ouvrage en maison sont des ménages, en grande majorité propriétaires occupants. Ce ne sont ni des experts en thermique, ni en travaux, ni même en gestion de patrimoine. Leurs décisions interviennent bien plus souvent à la suite d'un « coup de cœur » qu'après une analyse rationnelle étayée et en coût global.
- En maison individuelle, peu de maîtres d'œuvre, de bureaux d'études ou de bureaux de contrôle interviennent, et encore moins en rénovation qu'en neuf. L'offre de rénovation énergétique des maisons est portée dans son immense majorité par de petites entreprises locales, couvrant chacune un ou deux postes de travaux et non les 6 postes nécessaires pour atteindre la performance. Les différentes actions de travaux possibles sont souvent vécues comme « en concurrence », ce qui dessert la coopération entre les entreprises pourtant nécessaire à l'atteinte de la performance. Ajoutons également que ces artisans sont souvent très seuls, peu armés pour faire monter en compétences leur petite entreprise (CSTB, Les obstacles à la montée en compétences des artisans du bâtiment, 2016). De plus, ils ne disposent que de peu de soutien et de très peu d'outils pour intégrer les innovations, la rigueur et la vision globale qu'exige la mise en œuvre d'une rénovation performante (AQC, Points sensibles ITI-ITE, Décembre 2019) et (Dominique Naert, Thèse professionnelle CSTB, 2015).

Conduire une rénovation jusqu'à la performance en maison individuelle est donc plus complexe et justifie d'être traitée spécifiquement, compte-tenu de la taille et du caractère diffus de ce parc et de son niveau de consommation. En somme, l'étude prendra en compte les exigences de planification et de mise en œuvre pour rénover une maison jusqu'à la performance, et les spécificités du parc bâti.

Constat : les pratiques actuelles

L'enquête TREMI 2017 annonce que plus de 5 millions de ménages ont réalisé des travaux de rénovation (énergétique ou non) sur la période 2014-2016, mais que **seulement 25% de ces projets ont permis de sauter au moins une classe de DPE** (ADEME TREMI, 2018). De même, seulement 5% des travaux réalisés ont un impact énergétique jugé « important » (saut de 2 classes énergétiques ou plus selon DPE).

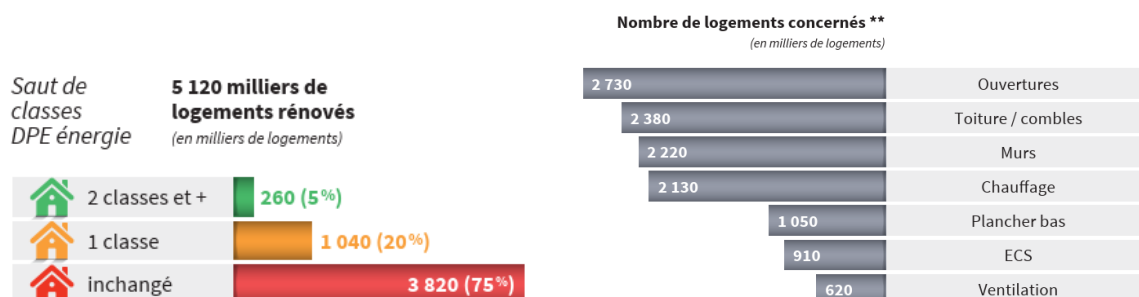


Figure 2 : Extraits de l'étude ADEME TREMI, 2018. Gauche : Saut de classes DPE énergie pour les travaux engagés par les ménages. Droite : Travaux privilégiés par les ménages.

En effet, les ménages privilégient la rénovation partielle de leur maison (1 à 2 postes de travaux, comme le remplacement des menuiseries et/ou l'isolation des toitures/combles). Seules 35% des rénovations comportent plus de 2 postes de travaux.

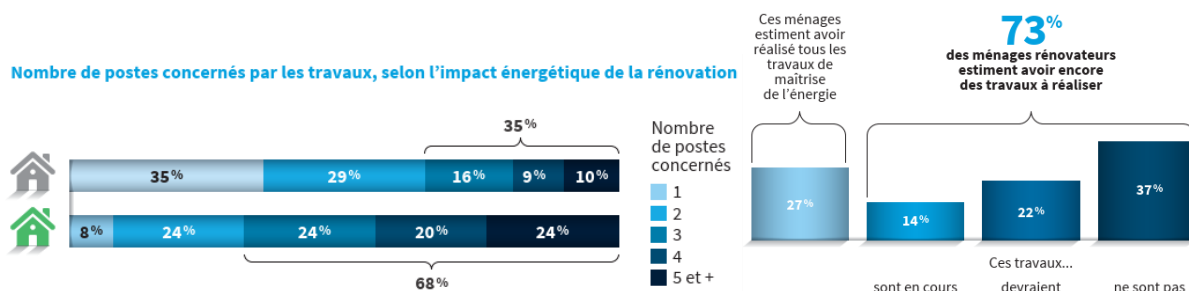


Figure 3 : Extraits de l'étude ADEME TREMI, 2018. Gauche : Nombre de postes concernés par les travaux de rénovation pour un saut de 2 classes DPE énergie ou plus et tous types de rénovation. Droite : Sondage auprès des ménages ayant réalisés sur les prochaines étapes envisagées, étalement des travaux dans le temps.

Pourtant, 2/3 des ménages concernés n'ont pas planifié d'autres travaux : **ils ne sont donc pas engagés dans un parcours permettant d'atteindre la performance par étapes**. 27% d'entre eux pensent cependant que tous les travaux ont été faits. Il y a un décalage entre la définition qu'ont les ménages de la rénovation énergétique et l'ambition du gouvernement à l'horizon 2050.



A l'autre bout de l'échiquier, le collectif Effinergie recense les rénovations de logements individuels au niveau BBC rénovation en France, en lien avec les Régions et territoires mettant en œuvre des dispositifs soutenant la rénovation énergétique :

- **quelques centaines de rénovations « BBC rénovation par étapes »** initiées seulement (1ère étape réalisée), et aucune menée à terme à ce jour en matière de performance, d'après un recensement effectué auprès des Régions et territoires, pour des dispositifs mis en place entre 2011 et 2018 (Effinergie BBC par étapes, 2018) ;
- **3 780 rénovations « BBC Effinergie rénovation ou équivalent »**, en une seule fois, sur le parc de maisons individuelles en secteur diffus, d'après un recensement réalisé dans le cadre du projet de recherche Perf in Mind soutenu par l'ADEME, les Régions et territoires (Perf in Mind Panorama dispositifs, 2020).

Le constat sur le terrain, en France et jusqu'à présent, est que **la plupart des travaux dits « énergétiques » relèvent plutôt de travaux d'entretien ou de maintenance** (remplacement de fenêtres, d'une chaudière en fin de vie...), ou encore d'approches opportunistes (offres à 1€) et non d'opérations de rénovation énergétique planifiées et coordonnées visant l'atteinte du niveau BBC rénovation à terme. Les ménages n'intègrent pas encore, dans leurs décisions d'aujourd'hui, les perspectives de performance à terme de leur logement. Les ménages vivent la rénovation énergétique comme complexe, tant au niveau technique (choix des travaux, des entreprises) qu'au niveau financier.

Ce constat est à mettre en regard des objectifs : l'essentiel de la tâche reste encore devant nous. S'il y a consensus, au niveau national comme au niveau européen, sur l'importance de la rénovation énergétique, son intérêt pour l'économie, l'emploi, pour le climat, pour lutter contre la précarité énergétique, il apparaît également qu'aucun pays, au niveau européen, n'a encore atteint le rythme de rénovation et le niveau de performance en phase avec les ambitions 2050.

Objectif et méthodologie de l'étude

Il existe une diversité d'approches et de points de vue sur la façon de conduire cette dynamique de montée en puissance de la rénovation énergétique, de la financer, sur le niveau de performance à atteindre ou encore sur l'organisation à mettre en œuvre. Faut-il embarquer un peu d'économie d'énergie dans chaque action de travaux planifiée par les ménages à la façon des « passeports de rénovation énergétique » ? Ou se projeter dans une rénovation à énergie positive en une seule étape comme l'expérimente EnergieSprong ? Au niveau national, les notions de travaux dits « BBC-compatibles » (permettant théoriquement d'atteindre une consommation BBC rénovation à terme) et de parcours de rénovation « BBC par étapes » sont désormais utilisés. Cependant, les modalités de mise en œuvre de ces parcours n'ont pour l'heure pas été définies.

Cette étude examine plusieurs parcours de rénovation par étapes, en s'inspirant des définitions en cours et des pratiques actuelles, et propose des éclairages aux nombreuses questions qui se posent sur la modalité de mise en œuvre d'un parcours de rénovation par étapes :

- Est-ce que les 25% d'économies d'énergie visées par le dispositif Habiter Mieux Sérénité (ANAH), les 40% d'économies d'énergie exigées par la Banque Européenne d'Investissement, les travaux générés par les CEE, ou exigés par la Règlementation Thermique sur l'Existant (RT-Ex) permettront d'atteindre 75% d'économies d'énergie d'ici 2050 ?
- Peut-on atteindre une performance BBC rénovation à terme, sur la moyenne nationale du parc, quel que soit le nombre d'étapes ? Quels sont les travaux indissociables ? Quelles sont les interfaces et interactions à traiter simultanément ?
- Quelles sont les préconisations techniques à respecter et les points de vigilance à avoir en tête ?
- Comment s'assurer que la rénovation sera menée à terme, jusqu'à la performance BBC rénovation ?

Cette étude vise à apporter des éclairages sur ces points en identifiant les conditions de réussite de rénovations performantes par étapes, pour le parc de maisons individuelles et conformément aux objectifs nationaux.

Cette étude est basée autant sur des **travaux existants** (cf. références bibliographiques page 129) que sur des **retours de terrain**, afin de s'adapter au point de vue et au cadre spécifique et contraint des acteurs de la maison individuelle.

Les éléments techniques présentés dans cette étude sont notamment basés sur les retours d'expérience du dispositif Dorémi (voir encadré) et l'expertise d'Enertech.



Une étude basée sur des retours d'expérience de terrain



Le dispositif Dorémi a été imaginé dès 2011 afin de structurer l'offre de rénovation complète (en une seule étape de travaux) et performante des maisons individuelles, au niveau local, et de susciter la demande en s'appuyant sur des tiers de confiance (les collectivités locales et leurs partenaires, en particulier).

Dans la phase de preuve de concept du dispositif, plus d'un tiers des quelques 350 projets étudiés ont donné effectivement lieu à une rénovation complète et performante. Les autres projets n'ont pas directement atteint la performance pour plusieurs raisons : choix du ménage, budget restreint, contraintes techniques ou « aberration économique » (une chaudière non-performante récemment installée, une isolation sous rampants refaite récemment, insuffisamment isolée et qu'il est exclu de refaire à court terme, etc.). Pour la plupart de ces chantiers, il a cependant été constaté que les travaux effectués sont bien plus ambitieux que les travaux habituellement réalisés (en comparaison de l'étude TREMI de l'ADEME par exemple) : réalisation de l'ensemble des travaux énergétiques moins un ou deux postes de travaux, en règle générale.

Ces résultats encourageants ont cependant conduit à un constat difficile : les outils techniques et pédagogiques construits pour permettre aux artisans de réaliser en une seule fois des **rénovations performantes** ne sont plus du tout adaptés lorsque la rénovation se déroule « par étapes ». **Le constat a également été fait de l'absence d'outils pédagogiques et techniques pour aider les artisans à mettre en œuvre, par étapes, des rénovations qui soient performantes à terme, ainsi que d'outils fiables d'aide à la décision pour aider le ménage dans ses choix de combinaisons de travaux.** Ces retours d'expérience ont permis de mettre en exergue que des rénovations énergétiques mal conduites par étapes peuvent générer de multiples problèmes (dégradation de la qualité de l'air intérieur, moisissures et autres désordres dans les murs, ...)

Des études de cas ont alors été conduites, à partir de rénovations complètes et performantes, en posant la question : et si ces rénovations avaient été conduites par étapes ? Quelles incidences sur les choix techniques, la coordination entre artisans à plusieurs années d'intervalle, sur l'accompagnement amont du ménage, sur le financement ?



CeDRe

Centre de ressources pour les plateformes
de la rénovation énergétique en

Auvergne-Rhône-Alpes

Ce travail a abouti à un travail commun avec la Région Auvergne-Rhône-Alpes, qui a mandaté Dorémi en 2018 pour animer un groupe de travail dédié au sein du CeDRe (Centre de Ressources régional pour les plateformes de rénovation énergétique). De mai à septembre 2018, ce groupe, composé à la fois d'acteurs institutionnels (Région, DREAL, ADEME) et opérationnels (animateurs PTRE et conseillers EIE) a permis, avec la contribution de professionnels reconnus (Effinergie, AQC, Enertech, Pouget Consultants, etc.) de :

- dresser la liste des enjeux et précautions à prendre en matière de rénovation « BBC par étapes »,
- identifier les ressources et bonnes pratiques existantes, ainsi que les manques et besoins complémentaires.

Les retours d'expérience alimentant cette étude sont issus de cette base de travail, présentée lors du 7ème Congrès National du Bâtiment Durable à Lyon en octobre 2018 (CeDRe - Rénovation par étapes, 2018), de retours d'expérience dans le cadre de chantiers Dorémi, ainsi que de l'expertise et l'expérience d'Enertech.

GLOSSAIRE DE LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE

Il est fréquent de parler de « rénovation énergétique » au sens large, sans évoquer le niveau de consommation énergétique de ces rénovations ni la façon de l'atteindre. Les différentes appellations sont légions : rénovation par étapes, rénovations partielles, élément par élément ou par gestes de rénovation, rénovation globale, travaux BBC-compatibles, rénovation BBC par étapes, rénovation par morceaux... Le présent glossaire, clarifie cette terminologie, pour plus d'efficacité dans les politiques publiques et les débats.

Il est fondamental de **distinguer le niveau de performance atteint par la rénovation et le parcours de rénovation emprunté**. Le parcours de rénovation peut être conduit en **plusieurs opérations de travaux successives** (« rénovation par étapes ») ou en **une seule opération de travaux** (« rénovation complète »).

Les définitions conservées comme indispensables sont les suivantes

Rénovation performante

La rénovation performante d'un bâtiment est un ensemble de travaux qui permettent au parc bâti d'atteindre, a minima, le niveau BBC rénovation ou équivalent, en moyenne nationale et à l'horizon 2050, sans mettre en danger la santé des occupants, en préservant le bâti de toute pathologie liée à ces travaux et en assurant le confort thermique été comme hiver.



Figure 4 : Définition de la rénovation performante. Source : Dorémi.

Le bâtiment rénové performant peut soit atteindre lui-même le niveau de consommation BBC rénovation, soit contribuer à l'atteinte de cet objectif pour le parc bâti en moyenne nationale, notamment par la mise en œuvre d'une combinaison de travaux adaptée.

Un bâtiment rénové performant est un bâtiment qui a traité les 6 postes de travaux (isolation des murs, des planchers bas et de la toiture, remplacement des menuiseries extérieures, ventilation et production de chauffage/eau chaude sanitaire) ainsi que les interfaces (jonctions physiques entre ces postes de travaux assurant l'étanchéité à l'air et la continuité de l'isolation) et les interactions entre ces postes (bon dimensionnement des systèmes notamment).

Le niveau BBC rénovation fait référence aux termes de l'[arrêté du 29 septembre 2009](#), soit un objectif de consommation de 80 kWh en énergie primaire par m² SHON et par an modulée selon la situation géographique et l'altitude du lieu considéré.

Rénovation complète et performante ou rénovation globale

La rénovation complète et performante, ou rénovation globale, est une rénovation performante menée en une seule opération de travaux.

Rénovation performante par étapes, ou rénovation par étapes performante à terme

La rénovation performante par étapes est une rénovation performante à terme (horizon 2050) une fois l'ensemble des étapes de travaux réalisées. La complexité de l'exercice impose des conditions de réussite décrites dans cette étude (nombre d'étapes, traitement des interfaces et interactions, ...). Atteindre la performance en 1, 2 ou 3 étapes de travaux, exige toujours une **approche globale de la rénovation** (vision de la maison « à terme », quand elle sera performante) pour bien articuler les interfaces (jonctions physiques entre 2 postes) et les interactions (dimensionnement du chauffage, de la ventilation...), que ces interfaces et interactions soient traitées simultanément ou sur plusieurs années.

Rénovation partielle

Cette approche de la rénovation représente l'essentiel des pratiques actuelles de travaux énergétiques (approche « élément par élément », par « gestes de travaux » ou par « petits bouquets de 2 à 3 travaux »), sans approche globale, **non coordonnées et ne traitant que quelques postes de travaux**. Cette approche de la rénovation doit être abandonnée au profit des rénovations complètes et performantes, ou des rénovations performantes par étapes. La rénovation partielle est une action de travaux qui ne permet pas d'atteindre la performance à terme.

Approche globale de la rénovation

L'atteinte de la performance requiert une approche globale de la rénovation ; elle consiste en une analyse architecturale et technique pour définir les bouquets de travaux pertinents et anticiper la bonne gestion des interfaces et des interactions entre postes de travaux.

Postes de travaux de la rénovation énergétique

Les 6 postes de travaux à traiter en rénovation performante sont les suivants : isolation des murs, de la toiture, du plancher bas, remplacement des menuiseries extérieures, systèmes de ventilation et production de chauffage et eau chaude sanitaire (ECS).

Configurations

La notion de postes de travaux n'est pas suffisante pour aborder les problématiques de conception et de mise en œuvre. Le mode constructif ainsi que la technique de rénovation retenue définissent de multiples configurations :

- Pour les murs : ITE (Isolation Thermique par l'Extérieur), ITI (Isolation Thermique par l'Intérieur), isolation mixte ITE/ITI, présence d'un débord de toiture ou non...
- Pour les toitures : combles perdus, rampants, sarking, toiture-terrasse, présence d'un faux-plafond...
- Pour les planchers bas : sur terre-plein, sur vide-sanitaire accessible ou non, sur local non chauffé...
- Pour les menuiseries extérieures : pose en feuillure, en tunnel, en applique, « en rénovation », avec/sans occultations/volets roulants...

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive, et les combinaisons entre ces configurations sont très nombreuses.

Interface

Conformément à la définition de l'Agence Qualité Construction (AQC), une interface est une jonction physique entre deux postes de travaux (exemples : jonction ITE-combles perdus, réseau de chauffage traversant une ITI...). La plupart des interfaces nécessitent une mise en œuvre adaptée pour assurer une continuité de la barrière frein-vapeur, de l'étanchéité à l'air et une diminution des points thermiques (jointoiement par des membranes, isolants...). Une rénovation performante impose de traiter minutieusement les interfaces. Le bon traitement des interfaces impose une bonne coordination entre les professionnels intervenant sur les différents lots.

Interaction

Conformément à la définition de l'AQC, une interaction est un lien de dépendance entre deux postes de travaux sans jonction physique, par exemple le bon dimensionnement du système de chauffage selon le niveau de performance de l'enveloppe, ou l'étanchéité à l'air requise pour un poêle à bois au sein d'une enveloppe étanche. La rénovation performante impose de tenir compte de ces interactions entre postes de travaux ; il s'agit souvent d'enjeux de conception.

Non-qualité

Ce terme générique englobe les non-conformités, malfaçons, désordres, dysfonctionnements, qui peuvent donner lieu à l'apparition de pathologies du bâti, lesquelles peuvent avoir des conséquences structurelles et/ou sanitaires.

Impasses de rénovation

Les impasses de rénovation sont des actions de travaux qui ne permettent plus d'atteindre la performance à terme : épaisseurs d'isolant insuffisantes, non traitement de certaines interfaces (tableaux des menuiseries, remontées de murs en combles...), équipements de production de chaleur non modulants ... et plus généralement actions de travaux rendant non rentables, non finançables ou impossibles à traiter techniquement les dernières étapes pourtant nécessaires pour atteindre la performance à terme.

Ventilation performante

Une ventilation performante est capable de prendre en compte simultanément plusieurs enjeux-clés : le renouvellement d'air hygiénique (gestion sanitaire de l'humidité et des polluants pour une bonne qualité de l'air intérieur), la maîtrise de l'énergie (réduction des consommations de chauffage et d'électricité) et le confort des usagers (thermique, acoustique...). La ventilation fait partie intégrante d'une rénovation performante.

Les définitions qui ne sont pas ou peu utilisées dans ce rapport sont les suivantes

Rénovation lourde

Ce terme fait parfois référence à une rénovation complète, parfois à une rénovation qui dépasse les seuls travaux de rénovation énergétique. Ces ambiguïtés, ainsi que l'image négative renvoyée, conduit à abandonner ce terme.

Efficacité active/passive

Ces termes ont été utilisés pour qualifier les parcours basés uniquement sur le changement des systèmes (efficacité active) ou uniquement de l'enveloppe (efficacité passive). Les deux actions doivent être menées et articulées entre elles pour atteindre la performance, ce qui rend obsolète leur usage.

Travaux « BBC-compatibles »

Ce terme désigne le niveau de performance intrinsèque de chaque poste de travaux (résistance thermique d'une paroi opaque, conductivité thermique d'une paroi vitrée, rendement d'un système de chauffage, etc.). Dans une rénovation performante, chaque poste de travaux doit être traité à un niveau « BBC-compatible », mais la juxtaposition de travaux dits « BBC-compatibles » ne suffit pas à atteindre la performance à terme (absence de traitement des interfaces et des interactions). Si elle est utilisée, cette appellation doit l'être avec le plus grand discernement : c'est une condition nécessaire mais loin d'être suffisante pour atteindre la performance. Le terme très ambigu de rénovation « BBC-compatible » est souvent utilisé ; il est trompeur et devrait être abandonné.

Rénovation BBC par étapes

Une rénovation « BBC par étapes » peut s'inscrire dans la définition de la rénovation performante par étapes, dès lors qu'elle respecte les conditions de réussite identifiées dans cette étude (atteinte par étapes du label BBC rénovation tel que défini par l'arrêté de 2009, sans générer de non-qualités sur le bâti, ...).

Autres définitions utilisées dans ce rapport, uniquement à des fins de calcul, et qui n'ont pas d'utilité en dehors de ce cadre calculatoire

Rénovation semi-globale

Cette appellation désigne un parcours qui se focalise sur la 1ère étape de travaux sans précision sur la suite du parcours de rénovation et l'atteinte de la performance à terme. La rénovation semi-globale repousse 3 à 4 postes de travaux en 3 ou 4 étapes.

Rénovation quasi-complète

La rénovation quasi-complète reporte un seul poste de travaux dans une seconde étape en anticipant le traitement des interfaces entre les deux étapes. Il est proposé de les abandonner au profit du terme de « rénovation performante par étapes » qui en reprend les principales qualités tout en intégrant des conditions de réussite indispensables.

Rénovation partielle renforcée

Cette appellation désigne une rénovation partielle basée sur des travaux « BBC-compatibles » (absence d'approche globale de la rénovation, mais chaque poste de travaux atteint un niveau de performance intrinsèque compatible avec le label BBC rénovation).

RAPPORT D'ÉTUDE DÉTAILLÉ

Structure du rapport

La **première partie** de l'étude prend un peu de recul sur **ce que doit être une rénovation énergétique** : au-delà de la technique et de la thermique, une rénovation énergétique doit **préserver le bâtiment**, elle doit **préserver la santé des occupants**, et elle doit **permettre à la maison d'être confortable**. Cette partie permettra de définir des critères à prendre en compte au moment de la rénovation concernant la ventilation des logements, ainsi que sur les interfaces entre postes de travaux (ponts thermiques, étanchéité à l'air, migration de vapeur d'eau).

La **deuxième partie** se concentre sur **3 exemples**, fréquemment rencontrés sur le terrain, d'enchaînement de travaux énergétiques orientés sur l'enveloppe du bâtiment. Par l'illustration très détaillée de ces 3 cas, cette partie permet d'**appréhender de façon didactique et pratique toute la complexité des rénovations énergétiques par étapes**, en particulier au niveau des interfaces entre postes de travaux. Elle permet d'identifier certains risques de pathologies aux étapes intermédiaires, et d'envisager les surcoûts et les freins psychologiques qui menacent l'atteinte de la performance à terme.

La **troisième partie** se base sur le **calcul** et sur une **modélisation du parc de maisons d'avant 1982 via 10 typologies de maisons et 5 parcours de rénovation énergétique**. Elle permet d'**identifier les parcours qui permettent** (au moins en théorie) **d'atteindre la performance à terme**, et donc d'objectiver et de quantifier les consommations obtenues par des parcours de rénovation contrastés.

La **quatrième partie** se focalise sur les équipements et **analyse les systèmes de chauffage** en rénovation par étapes qui permettent de **traiter les interfaces** problématiques. Elle traite également de la question de la **place des énergies renouvelables en rénovation énergétique**, et leur capacité ou non de compenser une moindre performance en rénovation par étapes.

Enfin, la **cinquième partie** porte sur les **conditions de réussite pour l'accompagnement des ménages en rénovations performantes à terme**.

Les annexes viennent largement compléter et préciser les différentes parties : l'**Annexe 1** justifie des choix structurants de l'étude concernant les méthodes de calcul retenues. L'**Annexe 2** présente les hypothèses de calcul et la démarche pour la modélisation des 10 typologies de maisons utilisées pour la troisième partie de l'étude. L'**Annexe 3** présente les 10 typologies de maisons et les principaux résultats de modélisation. L'**Annexe 4** présente les hypothèses économiques (coûts travaux, aides mobilisables pour un ménage de revenu supposé médian, etc.).

1. Une rénovation performante doit préserver le bâti, la santé et le confort des occupants

Cette partie aborde, de façon synthétique, trois dimensions importantes de la rénovation énergétique : le comportement hygrothermique des bâtiments à l'origine de nombreuses pathologies, le confort des usagers et la qualité de l'air intérieur.

La rénovation énergétique des bâtiments est une science complexe, qui nécessite de bien appréhender le **comportement hygrothermique des bâtiments**, qui concerne la migration d'humidité et de vapeur dans les matériaux, ainsi que les phénomènes de condensation dans les parois¹³ et au niveau des points singuliers¹⁴ (AQC, Observatoire, 2019). De nombreux développements de **pathologies du bâtiment** sont à déplorer à la suite de rénovations partielles menées sans compréhension globale des enjeux (AQC, Rénovation thermique performante par étape, 2015), sans la formation ou les outils nécessaires sur ce comportement hygrothermique.

Ces problèmes sont très souvent identifiés dans le « bâti ancien » (bâtiments d'avant 1948, construits avec des matériaux perméables à la vapeur d'eau : chaux, briques, ...), plus vulnérable, car en partie construit avec des matériaux putrescibles. Cependant, ces risques doivent en fait être pris en compte sur l'ensemble du parc bâti : les bâtiments d'après 1948 subissent également des malfaçons, et donc des pathologies, qui peuvent être très préjudiciables aux bâtiments et à leurs usagers.

Cette première partie met en exergue les principales problématiques, difficultés et bonnes pratiques liées au comportement hygrothermique des bâtiments, en s'appuyant sur les travaux conduits par l'AQC (AQC, Rénovation thermique performante par étape, 2015) et sur la synthèse bibliographique réalisée par Enertech pour Climaxion/ADEME/Région Grand Est/Oktave en partenariat avec Dorémi (Enertech Migration de vapeur, 2017).

En termes de **confort des usagers**, les rénovations par étapes peuvent également présenter des points de vigilance : infiltrations d'air parasites, parois froides ou surchauffées localisées, condensation sur les murs, moisissures, hétérogénéité des températures, acoustique, etc.

La question de la **ventilation** fait l'objet d'un focus particulier, sur la base de campagnes de mesures effectuées par Enertech. Il s'agit en effet d'un enjeu majeur pour la **qualité de l'air intérieur (QAI)**, et par conséquent la **santé des occupants**, le confort, la préservation du bâti et la performance énergétique.

1.1. Des bâtiments « sains », exempts de pathologies

Le **comportement hygrothermique** des parois est caractérisé par des phénomènes physiques et chimiques de transfert d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois, et de condensation potentielle. Ces phénomènes ont été largement décrits dans de nombreuses études et publications, entre autres HYGROBA (HYGROBA, 2013) et RAGE (RAGE, 2012)¹⁵.

¹³ L'AQC constate une augmentation des condensations à l'intérieur des logements (AQC, Observatoire, 2019) rénovés et neufs.

¹⁴ Les points singuliers, par opposition avec la notion de « parois courantes », désignent les lieux d'interfaces entre différents éléments constitutifs de l'enveloppe du bâtiment : jonctions murs/toitures, murs/planchers bas ou intermédiaires, entre murs, entre murs et menuiseries, toitures et fenêtres de toitures, ainsi que les traversées ponctuelles de l'enveloppe par des éléments structurels (poteaux, poutres, ossatures, suspentes...) ou par des réseaux (plomberie, chauffage, ventilation, électricité).

¹⁵ Autres références bibliographiques récentes commentées dans l'annexe 1 de l'étude d'Enertech pour Climaxion (Enertech Migration de vapeur, 2017).

Pour autant, des divergences entre ces études subsistent, et les observations sur le terrain appellent à faire preuve d'humilité, tant les conditions réelles (météo, mise en œuvre des matériaux...) peuvent différer de celles des simulations, et amener à des constats parfois singuliers.

Ce qui est certain, c'est qu'**intervenir sur un bâtiment** - qu'il s'agisse de l'isolation d'une paroi indépendamment des autres, de l'enveloppe dans son intégralité, de l'amélioration de l'étanchéité à l'air du bâtiment, de la mise en place d'une ventilation ou simplement de la réalisation d'un enduit extérieur, sans incidence énergétique - modifie le comportement hygrothermique préexistant, et **peut initier ou renforcer une « pathologie » du bâtiment**.

On entend par pathologies du bâtiment :

- La formation de traces d'humidité (conséquences principalement esthétiques : peintures qui craquèlent) ;
- L'apparition de salpêtre, de moisissures, de champignons. Conséquences sanitaires : les spores de moisissures sont un allergène puissant qui ont un impact direct sur la qualité de l'air et la santé des habitants ;
- Dans les cas les plus graves, la fissuration des enduits, l'éclatement du béton sous l'effet du gel, le pourrissement de poutres structurelles en bois, l'humidité excessive dans des matériaux sensibles comme le pisé ou les pans de bois. Conséquences structurelles potentiellement graves : effondrements de planchers, pans de murs ...



Figure 5 : Pathologies observées après rénovation. De gauche à droite : présence de salpêtre (source : humidites.fr), présence de moisissures sur mur intérieur (source : prix-immobilier.info), trace d'humidité et enduit extérieur dégradé (source : Enertech).



Figure 6 : Apparition de moisissures à la suite de l'isolation de vieux murs. De gauche à droite : moisissures sur mur extérieur, humidité dans les murs par suite de l'installation d'un voile étanche sous le plancher, traces de moisissures dans un mur de refend (sources : AQC).



Figure 7 : Phénomène de condensation au niveau des têtes de solives, renforcé par l'absence de ventilation en phase chantier (cas pouvant se produire également dans un logement rénové peu ou non ventilé). Source : AQC (**AQC, Humidité dans la construction, 2019**).

Ces pathologies sont donc essentiellement liées à la présence d'humidité et à la condensation de vapeur d'eau, qui se produit lorsque la température de surface est inférieure au point de rosée, à l'endroit des « points froids » du bâtiment. La pose d'un isolant va modifier le régime de température des parois. Les **points singuliers que sont les interfaces entre ouvrages vont cumuler un certain nombre de « désavantages » et de risques** : ponts thermiques, défauts d'étanchéité à l'air, chemins capillaires facilitant la migration d'humidité...

En première approche, les rénovations doivent appliquer les **7 bonnes pratiques suivantes**, élaborées pour les rénovations complètes et performantes (Enertech Migration de vapeur, 2017)¹⁶ :

1. **Ventiler mécaniquement et efficacement** de préférence à hauteur de 0,6 vol/h en continu, soit généralement légèrement plus que la réglementation de 1982 ne l'impose, afin d'évacuer les apports d'humidité par les occupants (douches, cuisine, respiration...). Les simulations réalisées dans cette étude ne couvriraient pas le cas de la ventilation hygroréglable. L'absence de risque de pathologie dans ce cas où le taux de renouvellement d'air est abaissé en l'absence des occupants reste à étudier ;
2. **Traiter les remontées humides** avant rénovation (pathologie préexistante)¹⁷ ;
3. **Assurer l'étanchéité à l'air** avec, par exemple, une membrane freine-vapeur continue pour éviter de concentrer le problème à l'endroit des discontinuités ;
4. **Respecter la perméabilité croissante** des matériaux et la capacité de séchage des murs ;
5. **Protéger les façades des pluies** (qui apportent des quantités d'eau potentiellement beaucoup plus importantes que la seule migration de vapeur) ;
6. **Traiter les nez de planchers intermédiaires** en bois ou hourdis ;
7. **Choisir une solution d'isolation des façades à bon escient** : tenir compte des avantages et inconvénients respectifs de l'isolation thermique des murs par l'extérieur (ITE) ou par l'intérieur (ITI).

¹⁶ Il est rappelé que les conclusions de l'étude ne sont applicables que dans le cadre d'une rénovation complète et performante, que les parois sont isolées en totalité (il ne doit pas rester de point froid majeur) et que l'étude ne couvre pas les bâtiments climatisés (voir la partie « objet » du rapport (Enertech Migration de vapeur, 2017)).

¹⁷ Si les remontées humides ne peuvent pas être totalement traitées, les matériaux choisis pour la rénovation des parois (isolant, enduits et finitions) devront être compatibles avec la présence d'eau liquide dans le mur.

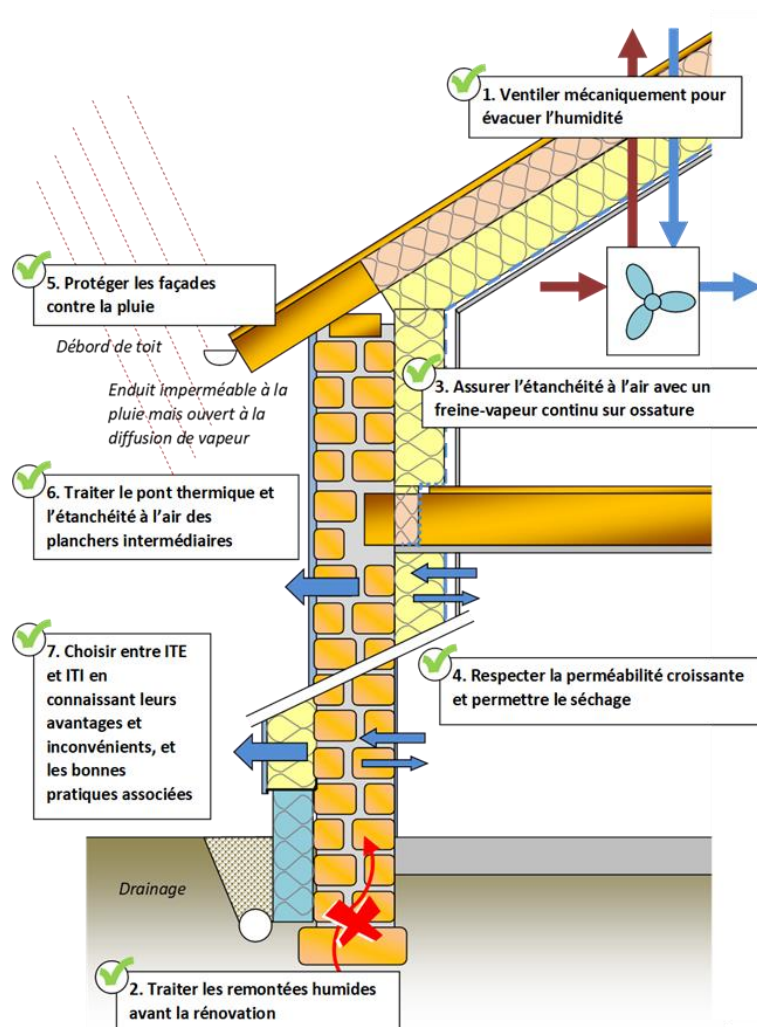


Figure 8 : Schéma illustrant les 7 bonnes pratiques de conception pour éviter les pathologies liées à l'humidité dans une rénovation complète et performante. Source : Enertech (**Enertech Migration de vapeur, 2017**)

L'approche temporelle est importante pour se rendre compte de l'impact des pathologies sur un projet de rénovation en plusieurs étapes. Effectivement, les pathologies peuvent apparaître en peu de temps lorsqu'une de ces sept bonnes pratiques n'est pas appliquée lors d'une rénovation. Le cas le plus frappant étant certainement le report de l'installation d'une ventilation dans un projet de rénovation (isolation des murs et remplacement des fenêtres a minima) : des moisissures peuvent apparaître sur les points froids en moins d'une année (voir Figure 9).



Figure 9 : Exemple de développement de moisissures autour d'une trappe de la salle de bain ainsi qu'en périphérie de la menuiserie extérieure de la cuisine, moins d'un an après rénovation thermique d'un logement avec absence de ventilation (à l'arrêt). Source PUCA (**PUCA, janvier 2013**).

Il apparaît clairement que la mise en œuvre de ces bonnes pratiques implique une approche globale des travaux de rénovation et une très bonne coordination entre les acteurs impliqués (en conception comme en réalisation), ce qui est possible lors d'une rénovation complète et performante, mais pas nécessairement par étapes.

Limitier les risques de pathologie d'une **1^{ère} étape de travaux** implique :

- De mettre en œuvre une ventilation assurant un **renouvellement d'air suffisant** ;
- De maîtriser la **migration de la vapeur d'eau dans les parois** ;
- D'assurer la continuité de la barrière d'**étanchéité à l'air de l'enveloppe** ;
- D'anticiper et de **traiter les ponts thermiques importants**, qui peuvent créer des points froids pathogènes si l'interface entre deux postes de travaux n'est pas abordée dans sa globalité.

Cette conclusion écarte de fait la plupart des rénovations partielles qui ne traiteraient pas simultanément les différents éléments de l'enveloppe, et par conséquent ni l'étanchéité à l'air ni les ponts thermiques au niveau de certaines interfaces. Cela concerne même certains parcours de rénovation avec une vision « semi-globale » (en 3 ou 4 étapes de travaux, voir Partie 3 de l'étude) où l'enchaînement de travaux consécutifs ne permet pas de traiter correctement certains ponts thermiques pour des raisons techniques. La 2^{ème} partie de cette étude illustre la complexité de ces problématiques sur quelques cas courants.

1.2. Le confort et la santé des occupants

L'appréciation du **confort thermique ressenti par les occupants** d'un bâtiment est décrit dans la norme NF EN ISO 7730 comme la résultante de plusieurs paramètres, parmi lesquels figurent :

- La température de l'air ;
- La température moyenne de rayonnement (intégrant donc les températures de parois) ;
- La vitesse relative de l'air (soit, dans le langage courant, les « courants d'air ») ;
- La pression partielle de vapeur d'eau (soit, dans le langage courant, l'humidité de l'air).

Les rénovations complètes et performantes permettent d'optimiser le confort thermique ressenti par les occupants en neutralisant toute paroi froide, en régulant correctement le chauffage, en neutralisant les « courants d'air » par une bonne étanchéité à l'air et en gérant l'humidité de l'air (ventilation, bon transfert de vapeur dans les murs, ...).

En rénovation par étapes, **le traitement partiel des postes de travaux énergétiques génère concrètement des phénomènes propices à la sensation d'inconfort** :

- Parois froides (parois restant non isolées, que ce soit aux murs, au plafond, au sol ou côté menuiseries)
- Températures hétérogènes (entre des parties d'un même bâtiment plus ou moins bien isolées, plus ou moins chauffées),
- Surchauffes localisées (difficultés à régler convenablement une installation de chauffage avec des besoins non-homogènes),
- Surchauffes estivales (toitures ou parois non isolées, ventilation insuffisante, menuiseries non protégées),
- Mouvements d'air (infiltrations d'air parasites, ventilation « manuelle », etc.).

Nous avons ici une partie de l'explication du fait que les travaux conduits aujourd'hui n'aboutissent qu'à des économies d'énergie très faibles, voire nulles (ADEME TREMI, 2018): les sensations d'inconfort après des travaux de rénovation partielle sont compensées par l'augmentation de la température de chauffage (il n'est pas rare de constater des consignes à 22 ou 23°C¹⁸) pour tenter de pallier cet inconfort.

Là encore, il apparaît qu'une approche globale permettant de **regrouper un maximum de travaux dès la première étape** de rénovation est de nature à améliorer le confort.

¹⁸ Campagnes de mesure Enertech en logement et REX PREBAT, Ademe.

Au-delà du confort, les bâtiments, et notamment les logements, dans lesquels les utilisateurs passent au moins la moitié de leur temps, ont un impact sur la santé des occupants. Selon le parcours de rénovation choisi, les **pathologies** du bâtiment évoquées plus haut, ainsi qu'une **ventilation insuffisante**, affectent la qualité de l'air intérieur (QAI). Par exemple, l'étude Climaxion (Enertech Migration de vapeur, 2017) utilise la valeur de 0,6 vol/h en continu pour définir les solutions de rénovation préservant le bâti, et notamment le bâti ancien.

Plusieurs **centaines de polluants** sont présents dans les logements, si bien que l'air intérieur de nos logements est souvent plus pollué que l'air extérieur, même en ville :

- Les polluants « chimiques », dont les composés organiques volatils (COV), le plus répandu étant le formaldéhyde, les composés organiques semi-volatils, les gaz inorganiques : monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NOX), dioxyde de carbone (CO₂), ozone (O₃). Ces polluants peuvent venir des colles (panneaux, carrelages, ...), des peintures, des résines, de nos vêtements et autres textiles, des produits d'entretien et de nettoyage, des désodorisants...
- Les polluants « physiques » : particules et fibres, issues d'activités comme la cuisine, le ménage ou le bricolage,
- Les polluants « biologiques » : moisissures et champignons, bactéries et virus, pollens, acariens, ... Ils peuvent provenir des pathologies de migration de vapeur d'eau dans le logement, de l'air extérieur, des animaux domestiques...

La plupart de ces polluants est invisible, et ils induisent des risques pour la santé : **allergies, difficultés respiratoires...** Point souligné dans un rapport de l'Institut négaWatt (Institut négaWatt - Résorber la précarité, 2018) s'appuyant sur une étude ANSES, OQAI, CSTB (ANSES Coût des polluants de l'air intérieur, 2014) : « *la mauvaise qualité de l'air intérieur est à l'origine de 28 000 nouveaux cas de pathologies et 20 000 décès chez les Français chaque année* ». Ces problématiques sont développées et approfondies dans les publications du Dr Suzanne Déoux et Médiéco, notamment le « Guide de l'habitat sain » (Drs DEOUX, 2002 (réédition 2004)).

Si la rénovation énergétique ne permet pas d'agir directement sur les sources de pollutions, **le poste « ventilation » joue un rôle-clé** pour disposer d'une bonne qualité d'air intérieur. En effet, une augmentation du renouvellement d'air améliorera directement la qualité d'air intérieur. Pour autant, une augmentation du renouvellement d'air baissera aussi la performance de la maison, en augmentant sa consommation de chauffage (perte des calories par renouvellement d'air).

Actuellement, 4 systèmes de ventilation sont mis en œuvre sur des projets de rénovation :

- la ventilation non contrôlée ou ventilation dite « naturelle »,
- la ventilation simple-flux autoréglable (à débit constant),
- la ventilation simple flux hygroréglable de type A ou B,
- la ventilation double flux à récupération de chaleur¹⁹.

Peu d'études permettent de comparer ces équipements. De plus, des campagnes de mesures mettent en avant des problèmes de conception, de mise en œuvre (fuites des réseaux, mauvais équilibrage, écrasement des conduits, etc.) ou de maintenance (filtres encrassés, entrées d'air bouchées, ...), ce qui ne permet pas la comparaison.

Cependant, les systèmes de ventilation peuvent être analysés selon les quatre critères suivants, faisant écho à la définition de la rénovation performante (santé, non-pathologie, confort, faible consommation) :

- impact sur la consommation d'énergie du logement (consommation pour le chauffage de l'air neuf et consommation d'électricité des ventilateurs),
- gestion de l'humidité,
- qualité de l'air intérieur,
- confort thermique et acoustique pour l'occupant (notamment par la température de soufflage et le bruit lié au soufflage).

¹⁹ La ventilation double-flux retenue est composée de ventilateurs à faible consommation (< 0,25W / (m³/h)) et d'un échangeur haute performance (>85% selon Eurovent et/ou supérieur à 70% selon PHI).

Sur cette base de comparaison, il est possible de synthétiser les points suivants concernant les solutions de ventilation :

- la ventilation non contrôlée dite « naturelle » ne répond pas aux exigences d'une rénovation performante, malgré sa popularité²⁰, car elle n'est satisfaisante pour aucun des 4 enjeux traités (débits aléatoires et non maîtrisés, générant un inconfort pour l'occupant et une mauvaise qualité de l'air) ;
- les VMC simple-flux hygroréglables et double-flux participent à une réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage de l'air neuf²¹;
- les VMC simple-flux autoréglables et double-flux permettent d'assurer un renouvellement d'air de 0,6 vol/h²² ;
- la ventilation double flux assure un meilleur confort thermique en hiver et en été (air soufflé tempéré les 2 saisons).

Pour mener une rénovation performante, il est nécessaire d'intégrer une **ventilation performante**, à savoir une solution qui assure une bonne qualité de l'air intérieur tout en limitant les consommations d'énergie (chauffage et électricité). Il ressort de cette analyse, par recoupement, que **la ventilation double-flux est le meilleur compromis technique en rénovation énergétique**, car elle permet d'assurer un bon renouvellement d'air, et donc une bonne qualité d'air intérieur, tout en participant aux économies d'énergie du projet de rénovation. La mise en œuvre doit cependant être anticipée dès le début du projet de rénovation (réseaux de soufflage et d'extraction à intégrer). Son fonctionnement et sa maintenance doivent être présentés aux utilisateurs à la réception pour assurer son bon fonctionnement dans le temps. Alors qu'elle est adoptée en Europe par certains pays qui travaillent de longue date sur la performance du bâti²³, elle est encore très peu connue en France, où elle souffre d'une méconnaissance, voire d'un déficit de confiance et d'image, et d'un manque d'entreprises compétentes pour la mettre en œuvre. Les remontées de terrain de la démarche Dorémi font part de l'écart entre les croyances des ménages, des artisans et souvent des relais locaux d'une part, et l'intérêt de la ventilation double-flux bien dimensionnée, bien posée et bien maintenue d'autre part.

Plusieurs retours d'expérience sur la VMC double-flux mènent aux conclusions suivantes : si les équipements sont correctement dimensionnés (puissance du ventilateur < 0,25 W/m³.h ; échangeur thermique à haute performance : 85% selon EUROVENT) et correctement installés et entretenus (bonne étanchéité à l'air du réseau, traitement de l'acoustique, entretien des filtres), la consommation d'énergie est modérée et le renouvellement d'air est bon (0,5-0,6 vol/h). En revanche, si l'échangeur n'est pas assez performant, si les filtres ne sont pas entretenus et/ou si l'acoustique n'est pas pris en compte, la consommation énergétique, le confort thermique et acoustique et/ou le renouvellement d'air seront dégradés.

Actuellement, trop peu d'études et d'analyses de retours d'expérience portent sur le croisement des paramètres clés d'une ventilation performante que sont le type de ventilation, la consommation énergétique, le taux de renouvellement d'air, les niveaux d'émissions de polluants et la qualité d'air intérieur, et ce encore moins en maison individuelle. Les retours d'expérience disponibles dans la bibliographie restent donc à ce jour largement insuffisants pour permettre, par des références extérieures à des retours de terrain, de corroborer, par des études complémentaires, les analyses de la présente étude. L'encadré ci-après propose quelques enseignements partiels issus de campagne de mesures d'Enertech. Ces éléments constituent des premiers apports pour éclairer la réalité de terrain sur cette problématique complexe.

²⁰ Les ventilations naturelles (non mécaniques) sont courantes dans les logements anciens mais également dans certains projets actuels, mais n'assurant pas en permanence un renouvellement d'air de 0,6 vol/h, et peuvent présenter un renouvellement d'air bien supérieur notamment en cas de vent.

²¹ Cf. Annexe 1.

²² Des retours d'expérience sur la VMC simple-flux hygroréglable mènent à deux conclusions : si les équipements sont correctement dimensionnés (puissance du ventilateur < 0,2 W / (m³/h)) et correctement installés (bonne étanchéité à l'air du réseau), la consommation d'énergie est modérée mais le renouvellement d'air est limité (0,2 Vol/h). En revanche, si le débit est plus élevé que les recommandations (plus d'occupation que les projections réglementaires par exemple), le renouvellement d'air peut être plus élevé, mais au détriment d'une consommation d'énergie élevée. Sources : retours terrain, essentiellement issues de campagnes de mesure d'Enertech.

²³ En Suède, 90% des maisons individuelles construites après 1990 sont équipées de ventilation avec récupération de chaleur. Source : FFB, QAI, Comment font nos voisins européens ? Bâtimétier n°41-2015.

Ventilation – Quelques retours de mesures d'Enertech

ENERTECH, Réhabilitation de 32 logements à Thury-Harcourt (maisons individuelles groupées équipées de VMC hygroréglables)

- Débit théorique : 0,5 vol/h.
 - Débits moyens mesurés année 1 : 0,2 à 0,5 vol/h, avec certaines pièces en débit nul (défaut de fonctionnement des détecteurs de présence dans les WC).
 - Débits moyens mesurés année 2 : baisse drastique des débits de 35 à 50% en 1 an (explication potentielle : encrassement, conduits souples pliés, ...) ;
 - Aucun fonctionnement hygroréglable constaté : le débit au caisson est constant ;
 - Qualité d'air (mesure des taux de CO₂) : selon la norme européenne EN13779, la qualité de l'air est considérée « satisfaisante » durant seulement 70% du temps et « modérée » à « faible » (soit > 1000 ppm) pendant 30% du temps. De plus, les occupants se plaignent de mauvaises odeurs, impliquant ouverture des fenêtres été comme hiver.
 - Consommation électrique moyenne mesurée : 0,98 kWh_{élec}/m²_{SHAB}.an.
- ⇒ En comparaison avec une ventilation double flux performante et auto-équilibrée consommant 1,7 kWh_{élec}/m²_{SHAB}.an, l'écart de consommation des ventilateurs est largement compensé par les économies de chauffage de la ventilation double flux. Il y a un réel intérêt à faire monter en compétence les installateurs de solutions de ventilation tant pour assurer une bonne qualité de l'air que pour limiter la consommation énergétique des ventilateurs.
- ⇒ Dans ce cas, la qualité de l'air n'est pas satisfaisante en raison de débits insuffisants mesurés.



ENERTECH, Projet Concerto, ZAC de la Confluence à Lyon (logements collectifs neufs équipés de VMC hygroréglables)²⁴

- Débit théorique 0,3 vol/h.
 - Débits moyens mesurés 0,5 à 0,7 vol/h.
 - Très peu de variation de débit journalier lié à la présence humaine (entre 0,02 et 0,05 vol/h) ou saisonnier (lié aux différences d'hygrométrie).
 - L'étanchéité à l'air des réseaux est surtout mise en cause, générant un fort appel d'air et des infiltrations parasites. *In fine*, les taux de renouvellement d'air globaux sont élevés (plus élevés qu'avec des ventilations simple flux autorégulées), et par voie de conséquence aucune économie d'énergie mais plutôt une surconsommation de chauffage.
- ⇒ Les débits mesurés, supérieurs aux débits théoriques, augmentent la consommation des ventilateurs et les consommations de chauffage (air extérieur froid).
- ⇒ La très faible variation des débits avec un système hygroréglable est observée sur de nombreuses autres installations (cf. campagnes de mesure Enertech).

Nota : **Les problèmes observés dans ces deux exemples** (mauvaise conception, mauvaise mise en œuvre, mauvaise étanchéité à l'air des réseaux de ventilation ou encore absence de maintenance) **peuvent également être observé sur des projets équipés de ventilation double flux** (cf. REX AQC).

Étude à venir :

« Perf In Mind », ENERTECH / Effinergie / Institut négaWatt / MEDIECO avec le soutien des Régions Bourgogne-Franche-Comté, Centre-Val-de-Loire, Grand Est et Normandie et de Dorémi et le soutien financé de l'ADEME (APR « bâtiments responsables 2020 ») (Perf in Mind, Rapport à venir en 2021)

Campagne de mesure de 40 maisons individuelles rénovées à un niveau BBC rénovation ou équivalent, VMC SF hygroréglable ou DF. Mesure simultanée de la qualité d'air (CO₂, COV, PM, radon), des débits de ventilation et de la consommation électrique.

Projet en cours, résultats disponibles 1er semestre 2021.

²⁴ <https://www.enertech.fr/rubrique/rubrique-236/>

D'autres interactions entre lots peuvent impacter la QAI lorsqu'elles sont mal appréhendées. C'est le cas notamment lors du remplacement des fenêtres (ou de l'amélioration de l'étanchéité à l'air du logement) tout en conservant un système de combustion sans adapter l'amenée d'air comburant (poêle ou insert conservé). La mauvaise combustion dégage du monoxyde de carbone et risque d'intoxiquer les occupants, surtout en cas de renouvellement d'air insuffisant pour le logement.

En conclusion de ce premier chapitre, il est important d'ancrer qu'une **rénovation énergétique se doit en premier lieu d'être saine, non-pathogène et confortable** pour être qualifiée de performante en plus de l'objectif de réduction des consommations (voir Figure 10). **Une rénovation performante par étapes se doit donc d'être performante à terme**, tout en préservant le bâti, la santé et le confort des occupants à **chacune des étapes** puisque la suivante peut n'intervenir que plusieurs années après la précédente



Figure 10 : Définition de la rénovation performante (Source : Dorémi).

Les points singuliers que constituent les interfaces entre ouvrages de l'enveloppe sont des zones à risques (risques de ponts thermiques, de fuite d'air, donc de condensation et de moisissures) à considérer avec une grande attention, tout comme le système de ventilation qui a une place-clé dans la qualité d'air intérieur, le confort et l'économie d'énergie. Ces éléments imposent une **approche globale de l'ensemble des travaux** dès le début, et de **regrouper le maximum de travaux dès la 1^{ère} étape**.

A cet égard, cette étude alerte sur le fait que la plupart des approches actuelles de rénovation partielle, quand bien même elles préconisent des travaux dits « BBC-compatibles », font généralement l'impasse sur ces points de vigilance, ou se contentent de préconisations générales insuffisantes. Les outils disponibles en rénovation énergétique de maisons sont largement insuffisants et peu adaptés aux professionnels intervenant en maison individuelle (des entreprises artisanales, rarement des maîtres d'œuvre) qui ne sont globalement pas suffisamment formés et pas encadrés. Il n'existe pas à ce jour de contrôles, ni de démarche qualité pour la rénovation énergétique par étapes²⁵, quel que soit le nombre d'étapes, ce qui est assez facilement compréhensible car un suivi qualité à coût raisonnable n'est pas envisageable, en rénovation partielle.

En parallèle, les maîtres d'ouvrage en maison sont également peu sensibilisés et peu incités par les systèmes d'aides actuels à considérer autre chose que la rénovation partielle. Les outils à proposer à ces 2 acteurs majeurs – les professionnels et les maîtres d'ouvrage – pour améliorer la prise en compte de la performance dans les rénovations, sont développés dans la suite de ce document.

²⁵ APR B2C2 (BBC rénovation par étapes) en cours, avec en vue la mise à disposition d'un outil de suivi qualité des rénovations de maisons individuelles et de logements collectifs, menées par étapes.

Architecture et rénovation

Des rénovations saines et préservant le bâti doivent être mises en œuvre sur toutes les typologies de logements. D'autres critères sont à prendre en compte pour assurer le confort des occupants (thermique mais aussi visuel ou acoustique) et pour répondre à des exigences architecturales (aménagement intérieur fonctionnel, valorisation des éléments patrimoniaux, ...).

Le Conseil National de l'Ordre des Architectes a **publié en 2019 un « Formulaire d'évaluation des potentialités architecturales et écologiques »** d'un logement pour accompagner les particuliers dans leur projet de rénovation écologique ne nécessitant pas de permis de construire. Dans ce document, 4 critères sont évalués (voir figure ci-dessous) :

- Orientation du logement et accès à la lumière naturelle ;
- Surface et habitabilité du logement ;
- Confort thermique ;
- Éléments patrimoniaux.

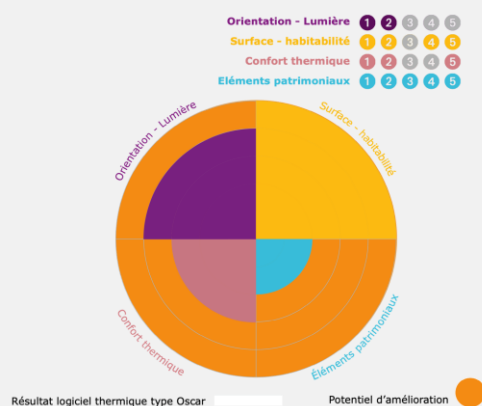


Figure 11 : Diagramme d'évaluation des potentialités architecturales et écologiques (source : Conseil National de l'Ordre des Architectes).

Ces critères doivent être étudiés systématiquement pour définir le parcours de rénovation d'un logement. C'est le cas pour les 10 typologies de cette étude : le choix d'un parcours de rénovation est adapté à la typologie étudiée.

Cas d'un logement ancien (<1915) en pierre, non isolé, chauffé avec des poêles fioul et avec fenêtres simple vitrage, bâtiment non protégé :

- Éléments patrimoniaux : le choix d'une isolation par l'intérieur permet de conserver l'image architecturale de la construction ;
- Orientation – lumière : la pose des nouvelles menuiseries combinée avec l'isolation par l'intérieur ne doit pas réduire l'accès à la lumière du logement ;
- Surface – habitabilité : le conduit du nouveau poêle bois central et des habillages des nouveaux réseaux de ventilation doivent s'intégrer aux espaces de vie du logement (soffites, gaines, faux-plafonds ponctuels, ...) ;
- Confort thermique. : les solutions de rénovation doivent permettre de se sentir bien dans le logement en été comme en hiver. Dans le cadre de cette étude, les solutions techniques retenues pour le parcours de rénovation complète et performante permettent de répondre à ce critère pour le confort d'hiver. Les occultations retenues devront participer au confort d'été et à l'image architecturale du projet.

2. Les interfaces : le cœur de la rénovation performante de l'enveloppe du bâtiment

En première partie, les « points singuliers » ont été définis comme étant des lieux d'interfaces entre différents éléments constitutifs de l'enveloppe du bâtiment : jonctions murs/toitures, murs/planchers bas ou intermédiaires, entre murs, entre murs et menuiseries, toitures et fenêtres de toitures, ainsi que les traversées ponctuelles de l'enveloppe par des éléments structurels (poteaux, poutres, ossatures, suspentes...) ou par des réseaux (plomberie, chauffage, ventilation, électricité).

Les interfaces entre postes de travaux de rénovation énergétique constituent toutes des points singuliers, où se superposent les problématiques de **migration d'humidité et de vapeur**, de traitement des **ponts thermiques** et de **l'étanchéité à l'air**. Les plus grandes précautions doivent être prises (raccordement des freine-vapeur, limitation des points froids...) pour éviter de concentrer sur ces zones les risques de condensation, source d'inconfort et de moisissures néfastes pour la santé des occupants et de dégradation des matériaux sensibles (pourrissement des bois, corrosion des métaux...) critiques pour la pérennité du bâti, comme évoqué en première partie.

Par ailleurs, le traitement des ponts thermiques et de l'étanchéité à l'air sont indispensables pour atteindre une performance énergétique suffisante de l'enveloppe (objectif BBC rénovation), au même titre que les caractéristiques de chaque élément de l'enveloppe ou des équipements. **La réalisation d'interfaces de qualité est donc essentielle pour la prévention des pathologies, pour la performance énergétique du bâtiment et pour éviter des impasses de rénovation.**

Or les interfaces entre postes de travaux sont souvent traitées en maison individuelle par des professionnels différents : la plupart des entreprises artisanales maîtrisent quelques corps de métier, mais rarement tous ceux nécessaires à la réalisation d'une rénovation performante. C'est pourquoi la **coordination entre tous les corps de métier** est déterminante lors d'une rénovation complète et performante (en une seule étape de travaux) de la conception à la réalisation. Cette démarche nécessite de déployer des moyens spécifiques comme acquérir des pratiques communes, techniques et aussi organisationnelles.

Dans le cas d'une rénovation performante de l'enveloppe par étapes, la difficulté augmente encore considérablement :

- Les corps de métier n'interviennent pas conjointement, mais **parfois à plusieurs années d'intervalle**, et ne peuvent pas se coordonner aisément,
- Des anticipations et des travaux supplémentaires, parfois lourds, sont nécessaires pour traiter convenablement les interfaces,
- Ce qui implique des surcoûts et des freins psychologiques (casser pour refaire).

Concrètement, les retours d'expérience de chantiers de rénovation performante font ressortir différents niveaux de difficulté dans le traitement des interfaces (cf. Figure 12) :

- Certains éléments de l'enveloppe n'ont pas de jonction physique entre eux et par conséquent pas d'interface (ex : isolation du plancher bas et isolation de la toiture), ou certaines interfaces ne posent pas de difficultés particulières (classement VERT) ;
- Certaines interfaces posent des **difficultés majeures** (classement ROUGE) et les postes de travaux doivent donc être traités simultanément, sous peine d'imposer des **reprises considérables** :
 - **coûteuses économiquement** : il faudra souvent casser un élément réalisé en 1^{ère} étape.
 - **et/ou coûteuses « psychologiquement »** : il semble difficilement concevable pour un ménage de devoir reprendre un poste de travaux réalisé quelques années auparavant, et c'est compréhensible lorsqu'il n'est pas sensibilisé aux enjeux.
- Les autres interfaces (classement JAUNE et ORANGE) impliquent une **anticipation des problèmes de conception et de mise en œuvre, et donc de figer, dès le 1^{er} poste rénové, la solution technique qui devra être mise en œuvre ultérieurement sur le 2^{ème} poste**. C'est la logique de « feuille de route » qui

ne doit pas être basée seulement sur l'ordonnancement des opérations dans le temps, mais bien complétée par des préconisations techniques portant sur les interfaces (dormants élargis, membranes en attente, etc.).

Réalisé en 1er :		Isolation des murs		Isolation de toiture				Menuiseries	Isolation du plancher bas		
Réalisation à une étape ultérieure :		ITI	ITE	Combles perdus	Rampants	Sarking	Toiture terrasse		Terre plein (ou VS) non isolable	Isol. sous chape	Plancher bas isolable
Isolation des murs	ITI	Si plancher intermédiaire en bois	Si plancher intermédiaire en bois	Si faux-plafond	Si pied-droit sur plancher bois						
	ITE							Si pose réno ou Volet roulant			
Isolation de toiture	Combles perdus	Si faux-plafond	Si débord de toit maçonné								
	Rampants		Si débord de toit maçonné ou toiture en appui					Si fenêtre de toit			
	Sarking		Si débord de toit maçonné ou sans débord ou toiture en appui					Si fenêtre de toit			
	Toiture terrasse							Si fenêtre de toit			
Menuiseries					Si fenêtre de toit						
Isolation du plancher bas	Terre plein (ou VS) non isolable										
	Isol. sous chape										
	Plancher bas isolable										

Figure 12 : Matrice de synthèse des complexités de traitement des interfaces entre 2 postes de travaux sur l'enveloppe, selon l'ordre d'exécution.

Légende des couleurs utilisées : Interface inexistante ou non problématique ; Solution envisageable par étapes ; Anticipation indispensable dès la première étape ; Difficulté majeure, irréaliste

Complément pour la lecture de la matrice : certaines cases ont 2 couleurs pour représenter le cas général et une configuration ayant un impact différent sur l'interface ou l'interaction. Exemple ligne Combles Perdus et colonne ITI : vert = Interface faible dans le cas général ; orange = anticipation indispensable lorsqu'un faux plafond est en place à l'état existant.

Cette matrice se lit en choisissant une colonne pour une configuration d'un poste de travaux d'enveloppe (par exemple, configuration « ITI » pour le poste de travaux « Isolation des murs ») qui sera réalisée à une étape et une ligne pour un autre poste de travaux dans une de ses configurations qui sera réalisée à une étape ultérieure. L'intersection de cette colonne de travaux primaires et de cette ligne de travaux secondaires indique par sa couleur la difficulté de traitement par étapes de cette interface, selon la légende ci-dessus. Parfois, une interface (intersection colonne/ligne) présente 2 couleurs car une ou plusieurs particularités constructives d'un des 2 postes considérés complexifient encore son traitement par étapes. Les cas de particularités constructives sont indiqués par un « Si » (et « ou » s'il y en a plusieurs sur une même interface).

Le niveau de détail nécessaire à l'analyse des interfaces dépasse la notion de postes de travaux : le mode constructif du logement et la technique de rénovation retenue déterminent les solutions de traitement des interfaces entre 2 postes. C'est ce qui est appelé une « configuration ». Par exemple : l'interface entre ITI et combles perdus sera traitée très différemment de celle entre ITE et isolation des rampants. De même, les traitements diffèrent selon le type de pose de menuiseries (applique intérieure, feuillure, tunnel) et leurs interfaces avec une ITE ou une ITI, avec ou sans volets roulants, etc.

Pour être complète, cette analyse doit également prendre en compte les points de vigilance liés aux interfaces ou interactions entre travaux sur l'enveloppe et sur les **systèmes**. Il ne faut pas négliger, en particulier, la gestion

de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe lors de sa traversée par des réseaux de chauffage, de plomberie, de ventilation ou encore d'électricité (ADEME Pérennité étanchéité à l'air Normandie, 2016).

Au total, Dorémi et Enertech ont identifié plus de 100 interfaces différentes²⁶, dont 70 mériteraient une analyse détaillée. L'identification et le détail de tous ces points de vigilance auraient un intérêt majeur pour sensibiliser et guider les ménages dans leurs parcours de rénovation, et plus encore pour former et outiller les professionnels, mais cela représente un projet d'envergure qui sort du cadre de cette étude.

A titre d'exemple du degré de détail requis pour bien traiter les interfaces problématiques, les paragraphes suivants se concentrent sur 3 cas de figure particulièrement courants (niveau de difficulté relatif aux couleurs de la matrice précédente).

Cas		Difficulté
1	Remplacement des menuiseries avant l'isolation des murs	ITI / ITE
2	Isolation des combles perdus avant l'isolation des murs	ITI / ITI+faux-plafond / ITE
3	Isolation de la toiture en rampants avant l'isolation des murs	ITE / ITE

²⁶ Étude Dorémi-Enertech en cours sur les points de vigilance des rénovations par étapes.

2.1. Cas 1 : remplacement des menuiseries avant l'isolation des murs

Comme indiqué en introduction, l'enquête TREMI (ADEME TREMI, 2018) a relevé que les travaux « énergétiques » privilégiés par les Français concernaient les menuiseries extérieures et leurs occultations. Les motifs sont multiples (confort thermique, aspect esthétique, confort visuel, aspects pratiques d'ouverture ou d'entretien, incitations fiscales, pratiques commerciales...) et finalement peu liées à la rénovation énergétique.

Mais quel qu'en soit le motif, le fait est que les menuiseries extérieures sont bien souvent remplacées avant de penser à l'éventualité d'isoler les murs. Cela s'apparente à une logique de maintenance d'équipements vieillissants, plutôt que de rénovation énergétique.

Pour les calculs de la partie 3, cette hypothèse d'ordonnancement d'étapes a notamment été retenue pour les typologies de maisons issues de l'étude TABULA (voir détails paragraphe 3) : 1-SFH, 2-SFH, 3-SFH, 1-TH et 2-TH.



1-SFH



2-SFH



3-SFH



1-TH



2-TH

La question est de savoir si cela est réellement problématique de dissocier le remplacement des menuiseries et l'isolation des murs, et comment cela pourrait être géré par étapes.

1^{ère} étape : le remplacement des menuiseries

La pose des menuiseries, en tant qu'éléments de l'enveloppe isolante de la maison, se doit d'assurer une parfaite continuité avec l'isolation et l'étanchéité à l'air des parois attenantes.

Notamment pour éviter un pont thermique, et donc un risque de condensation et de moisissures à l'interface entre menuiserie et mur, l'isolant devra pouvoir recouvrir le cadre (dormant) de la menuiserie sur une surface la plus grande possible.

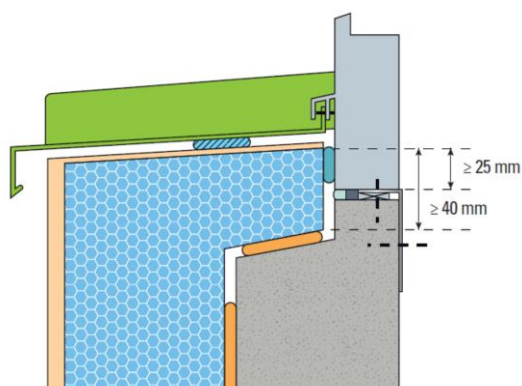


Figure 13 : Exemple de recommandation de recouvrement ITE sur menuiserie. Source : PACTE, Calepin de chantier Fenêtres avec Isolation Thermique par l'Extérieur.

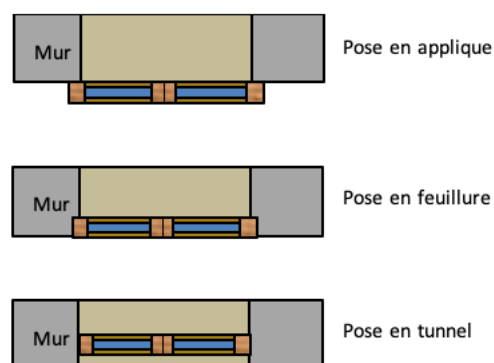


Figure 14 : Types de pose de menuiseries

Parmi les différentes méthodes de pose des menuiseries (voir ci-contre), la pose en applique est celle qui offre la plus grande surface de contact entre menuiserie et isolant, puisque la menuiserie se trouve dans le même plan que l'isolant mural.

Mais si l'isolation n'est pas réalisée en même temps que le remplacement des menuiseries, la pose des nouvelles menuiseries ne se fera pas en applique pour des raisons esthétiques évidentes (cf. photos ci-dessous), et d'autant plus si le choix entre ITI et ITE n'a pas été anticipé. La pose se fera donc plutôt **en tunnel ou en feuillure**.



Figure 15 : Fenêtre posée en applique en attente d'une ITI



Figure 16 : Fenêtre posée en applique en attente d'une ITE

Par ailleurs, dans le cas spécifique de la rénovation, pour simplifier le travail des installateurs, les fabricants de menuiseries ont créé des profils de dormants qui s'adaptent sur les anciennes menuiseries. Cette méthode de pose, dite « **en rénovation** » ou « **dépose partielle** », conserve le dormant de l'ancienne menuiserie sur lequel viendra se fixer la nouvelle menuiserie. Et même si la largeur apparente du dormant constituerait faciliter le recouvrement par l'isolant mural, ce type de pose présente des contraintes par rapport à une future isolation des murs, notamment en matière d'étanchéité à l'air beaucoup plus aléatoire (cf. Figure 17), mais également comme source de pathologie dans le cas d'une future ITE.



Ancien dormant conservé, posé en feuillure.

[NB : La feuillure est ici créée par un doublage en brique dont l'étanchéité à l'air est particulièrement complexe à obtenir]

L'appui endommagé de l'ancienne fenêtre n'a pas été conservé. Un rejingot devra être recréé tout en assurant l'étanchéité à l'eau et à l'air

Figure 17 : Défaut d'étanchéité d'un dormant conservé en prévision d'une pose en rénovation de la nouvelle menuiserie

Ainsi, une des premières conditions nécessaires pour envisager de réaliser ces travaux par étapes est d'anticiper comment vont être isolés les murs : par l'extérieur ou par l'intérieur car cela va grandement influencer les types de menuiserie et de pose.

2^{ème} étape : ITI

Si les menuiseries ont été posées à l'identique sans anticiper la pose de l'isolant et de son freine-vapeur/sa membrane d'étanchéité à l'air (cas général aujourd'hui), on se retrouve dans les cas de figures suivants (pose en feuillure et coupe horizontale à gauche, pose en tunnel et coupe verticale à droite) :

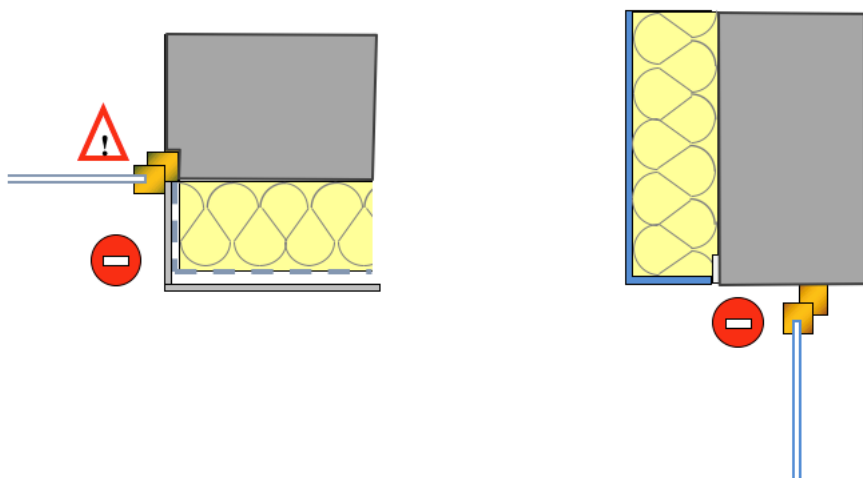


Figure 18 : Interface entre menuiserie et isolant intérieur non anticipée : pathologie assurée. (source : Dorémi)



Il n'y a pas la place pour que l'isolant recouvre le dormant donc le manque de continuité d'isolation crée un pont thermique avec un risque de condensation à l'interface et donc de moisissures voire de pourrissement sur un cadre en bois.



Il n'y a pas la place pour raccorder le freine-vapeur au dormant : difficile d'assurer l'étanchéité à l'air.

A noter que la gestion d'un bloc-baie où un volet roulant intérieur est solidaire du dormant de la menuiserie complexifie encore plus la situation. Il faut déjà être sûr de la bonne isolation et de la bonne étanchéité du coffre de volet, qui ne sont pas toujours optimales et deviennent totalement aléatoires après une intervention de maintenance (remise en place de l'isolant compliquée et étanchéité altérée). En cas de pose en tunnel (courant en présence d'embrasure), il sera quasiment impossible de venir raccorder le freine-vapeur sur le coffre sans empêcher la maintenance.

Ainsi, à cette étape-là, il n'y a en fait que 2 choix possibles :



Raccorder au mieux isolant et membrane sur la menuiserie en acceptant les défauts et leurs conséquences pathologiques : la rénovation est non performante !



Remplacer de nouveau les menuiseries pour qu'elles soient adaptées à l'isolation.

Condition de réussite

Pour ne pas obérer cette étape d'isolation, il faut donc anticiper le futur recouvrement d'isolant et **prévoir une menuiserie à dormant élargi** lors de la première étape (voir Figure 19).

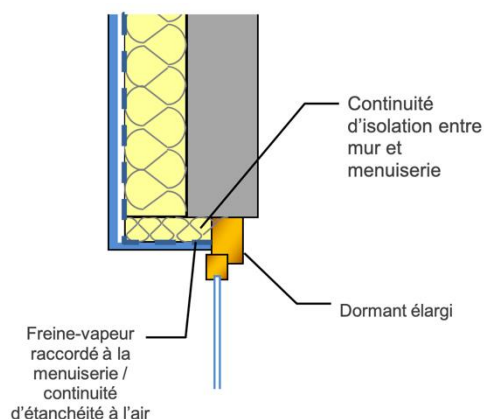


Figure 19 : Dormant élargi en anticipation d'une ITI (source : Dorémi)

La largeur de dormant devra permettre (voir Figure 20) :

- le recouvrement par 40mm d'isolant (ou $R > 1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ pour couper le pont thermique du tableau) ;
- la pose du parement d'au moins 10mm (plaque de plâtre 10 à 13mm + ossature de fixation ou plaque de plâtre /contreplaqué dans une feuillure prévue dans le dormant) ;
- l'espacement nécessaire aux paumelles, au débattement d'ouverture et au dégondage (+20mm en périphérie de l'ouvrant).

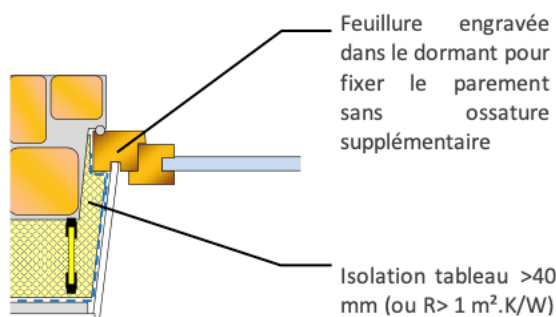


Figure 20 : Dormant adapté à un futur doublage isolé (source : Dorémi)

Il faut donc, également, bien **accompagner le ménage dans l'acceptation de ce choix** anticipé car l'aspect du dormant élargi avant la pose de l'isolation ira probablement à l'encontre d'un des motifs possibles, voire probables du remplacement des menuiseries (aspect esthétique et gain en clair de vitrage).

Il faudra également éviter la pose de bloc-baie avec coffre de volet roulant intérieur, en particulier pour une pose en tunnel.

C'est pourquoi, dans la matrice présentée précédemment, cette interface « menuiseries / ITI » est classée avec un niveau de difficulté ORANGE : « anticipation indispensable dès la première étape ».

2^{ème} étape alternative : ITE

Si, dans ce cas également, les menuiseries ont été posées à l'identique sans anticiper la pose de l'isolant, on se retrouve dans un cas de figure similaire au cas précédent :

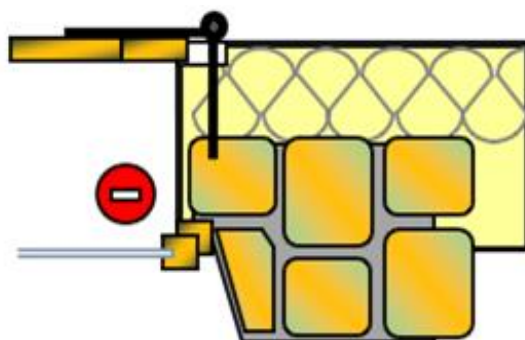


Figure 21 : ITE non anticipée lors du remplacement des menuiseries (source : Dorémi)



Le dormant n'est pas assez large pour accueillir un retour d'isolant, donc il y a un pont thermique et par conséquent, risque de condensation puis moisissures



La traverse basse du dormant n'est pas assez haute et/ou le rejingot n'a pas été rehaussé donc on ne peut pas isoler l'appui de fenêtre sans risque de perturber le rejet d'eau et d'obstruer les trous de drainage de la menuiserie : risques de pathologie sur l'isolant et la menuiserie à cause d'une mauvaise gestion des eaux de pluie (voir Figure 13 : **Exemple de recommandation de recouvrement ITE sur menuiserie. Source : PACTE, Calepin de chantier Fenêtres avec Isolation Thermique par l'Extérieur.**).

Condition de réussite

Comme dans le cas de l'ITI, il faut **prévoir une menuiserie à dormant élargi** pour anticiper le futur recouvrement d'isolant.

Il faut, encore une fois, bien **accompagner le ménage dans l'acceptation de ce choix** anticipé car l'aspect du dormant élargi sur une fenêtre alignée sur la façade avant la pose de l'isolation pourra heurter la motivation esthétique du remplacement des menuiseries.

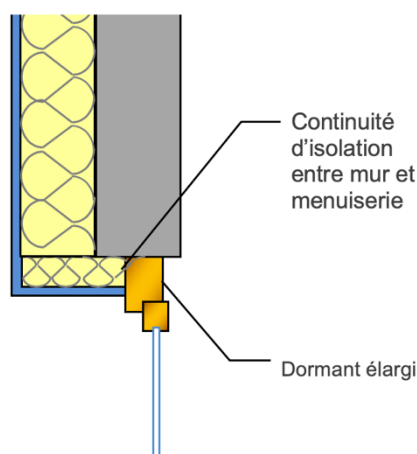


Figure 22 : Dormant élargi en anticipation de l'ITE (source : Dorémi)

En suivant les recommandations minimales du e-Cahier du CSTB 3709_V2 sur les principes de mise en œuvre de l'ITE autour des baies, l'isolant doit recouvrir le dormant de la menuiserie sur au moins 2,5cm à 4cm selon l'emplacement de la menuiserie (voir Figure 23).

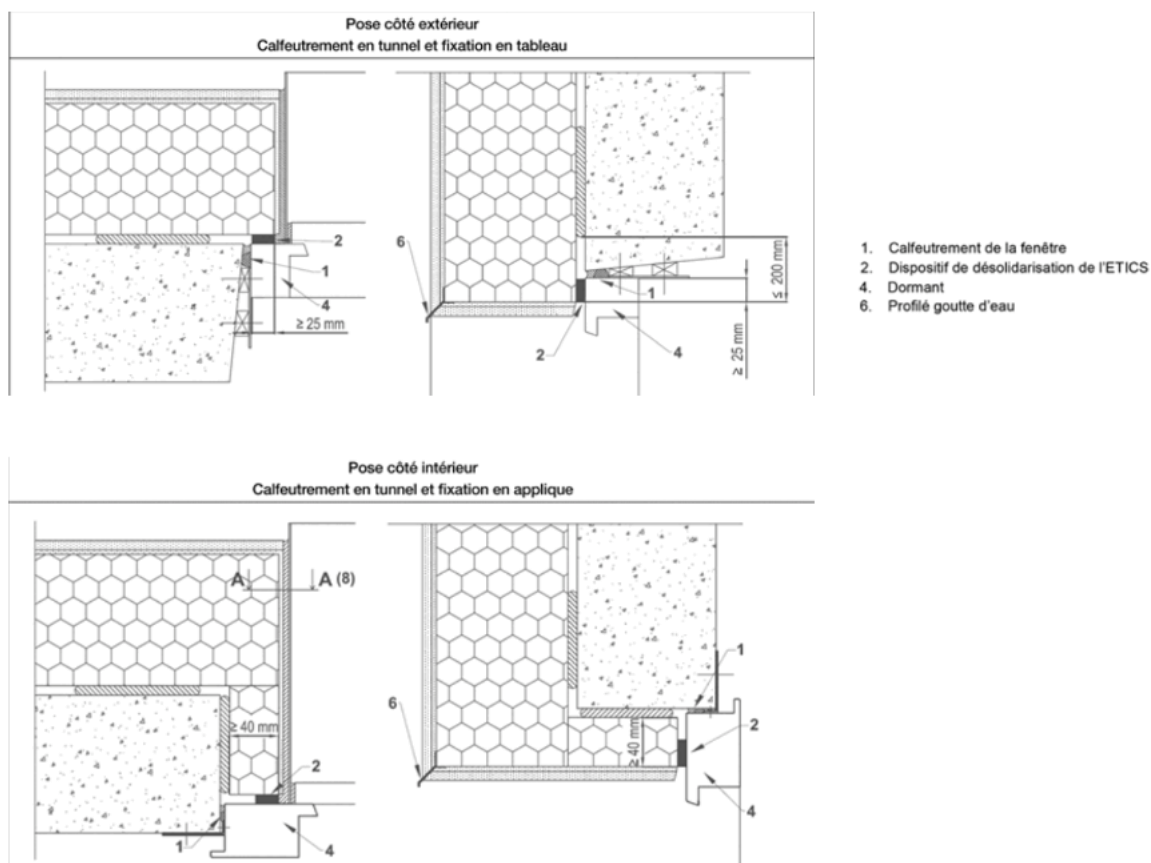


Figure 23: Extraits des fiches A3 et A4 du CPT 3709_V2

Il peut donc être judicieux de déplacer la menuiserie au nu extérieur pour permettre un recouvrement du dormant par l'isolant sans avoir à traiter les retours de tableaux, sources de ponts thermiques, et limiter l'élargissement du dormant. Mais, évidemment, ceci **doit être anticipé dès la commande des menuiseries**.

Sinon, de même que dans le cas d'une ITI, il n'y aura, à cette étape-là, plus que 2 choix possibles :



Raccorder au mieux isolant et membrane sur la menuiserie en acceptant les défauts et leurs conséquences pathologiques => rénovation non performante



Remplacer de nouveau les menuiseries pour qu'elles soient adaptées à l'isolation.

Cas de la pose en rénovation avant une isolation par l'extérieur : attention danger !

Comme évoqué plus haut, la pose en rénovation, qui consiste à limiter les interventions sur le bâti en conservant l'ancien dormant et en l'habillant avec un nouveau dormant adapté, est susceptible de créer des problèmes avec une isolation par l'extérieur. En effet, en maison individuelle, les anciens dormants sont généralement en bois et les nouvelles menuiseries « rénovation » peuvent être en PVC ou en aluminium, matériaux étanches à la migration de vapeur d'eau.

Donc pour éviter un phénomène de condensation entre habillage et ancien dormant qui finirait par faire pourrir le bois sur lequel est fixée la nouvelle menuiserie, le DTU 36.5 préconise que l'habillage extérieur soit ventilé. Or, s'il est décidé ensuite de réaliser une ITE, on se retrouve donc avec un espace ventilé entre isolation du mur et menuiserie, qui **crée un pont thermique important**.

Il se peut également que l'isolant et sa bavette de protection posés en appui gênent la ventilation de l'habillage extérieur. Le bois de l'ancien dormant se retrouve donc enfermé dans une zone de pont thermique concentrée et mal ventilée, et sera donc soumis à condensation et détérioration.

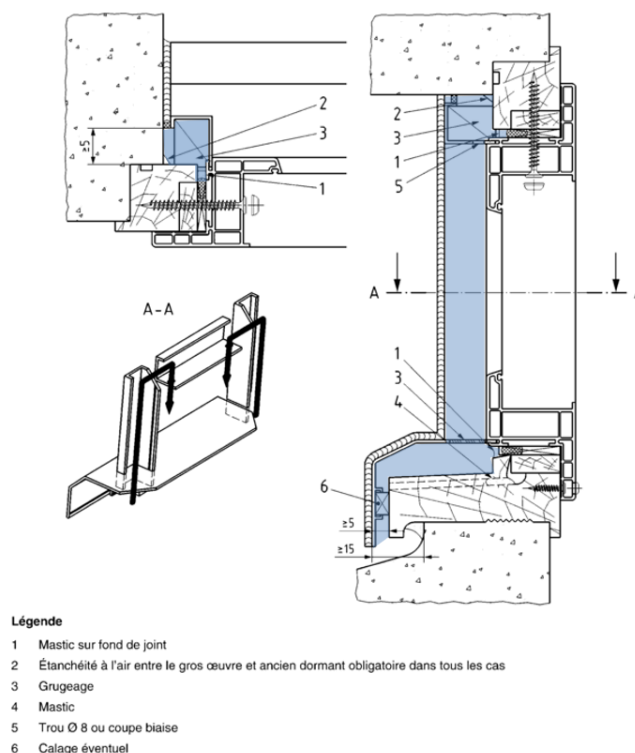


Figure 24 : Exemple de mise en œuvre en rénovation extrait du DTU 36.5 P1-1, indiquant l'espace ventilé (coloré en bleu) à préserver entre l'habillage et l'ancien dormant en bois

Cas des volets roulants installés avant une isolation par l'extérieur

Bien souvent, le remplacement des menuiseries est accompagné de l'installation de nouvelles occultations, et les volets roulants sont couramment plébiscités. Mais la fixation du coffre et des coulisses sur la maçonnerie représentera un gros obstacle à la continuité d'isolation dans le cas où une ITE serait envisagée (voir Figure 25).

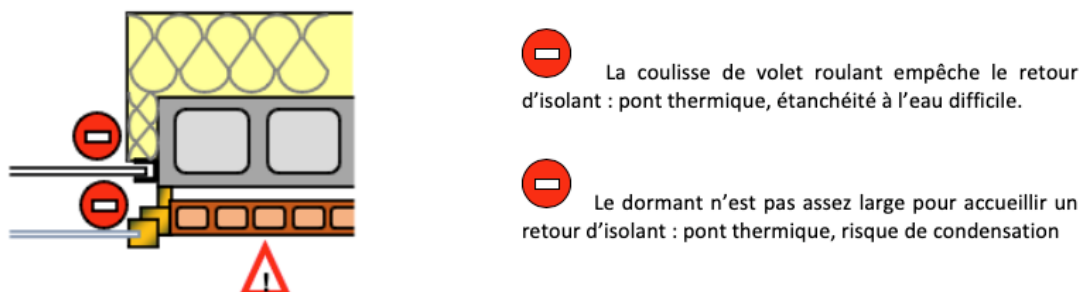
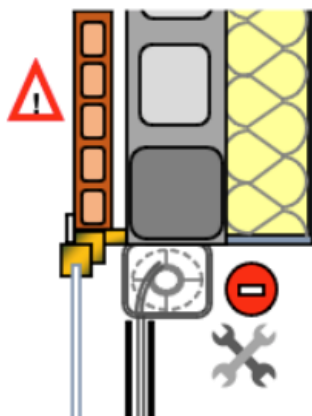


Figure 25 : ITE interrompue par un volet roulant existant (source : Dorémi)

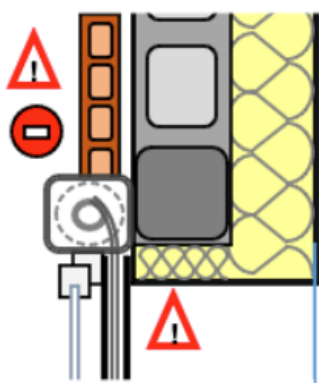


Si un coffre de volet roulant est posé en extérieur sous linteau : difficulté technique pour l'intégrer à l'ITE. Présence de pont thermique assuré lorsqu'aucun isolant n'est posé au-dessus du coffre de volet roulant



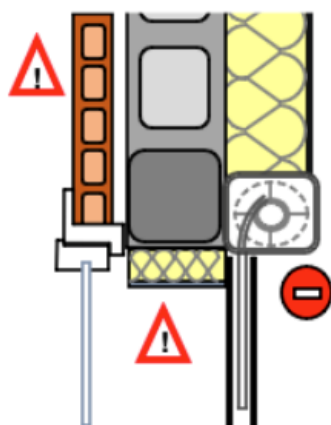
Les coffres de volet roulant posés en rénovation s'ouvrent généralement sur l'avant pour la maintenance donc il n'est pas possible d'isoler devant au risque d'empêcher l'ouverture le coffre et d'accéder au moteur en cas de nécessité.

Figure 26 : Pont thermique sur l'ITE dû à un coffre de volet roulant sous linteau (source : Dorémi)



Si un coffre de volet roulant est posé en intérieur : présence de pont thermique et étanchéité à l'air complexe à traiter.

Figure 27 : Pont thermique et défaut d'étanchéité avec un coffre de volet roulant intérieur (source : Dorémi)



Si un coffre de volet roulant est posé en extérieur en façade : difficulté technique pour l'intégrer à l'ITE. Présence de pont thermique assuré lorsqu'aucun isolant n'est posé derrière le volet roulant.

Figure 28 : Pont thermique sur l'ITE dû à un coffre de volet roulant en applique (source : Dorémi)

Condition de réussite

Pour qu'il ne devienne pas source de pont thermique, le volet roulant doit être installé en anticipant l'isolation par l'extérieur : le coffre et les coulisses doivent être espacés de la maçonnerie par une épaisseur d'isolant suffisante (4 cm) pour couper le pont thermique en linteau et tableau.

Le volet roulant doit donc être commandé à des dimensions réduites par rapport aux cotes tableau et il faut accompagner le ménage dans l'acceptation de l'esthétique et du risque de dégradation d'une isolation de tableau non finie ou de l'esthétique d'un volet « flottant », espacé du mur en attendant l'isolation des murs. Autant dire que ça ne se fera jamais si l'installation de nouveaux volets roulants ne se fait pas en même temps que l'ITE.

Cette interface peut ainsi être classée avec un niveau de difficulté Orange « anticipation indispensable dès la première étape ». En ce qui concerne le remplacement total de la menuiserie seule, mais elle se classe en difficulté Rouge « Difficulté majeure (irréaliste) » si une occultation (et en particulier, un volet roulant, non adaptable) a été installée ou si une pose en rénovation d'une menuiserie PVC ou Alu se fait sur un ancien dormant bois.

Évolutions souhaitables des menuiseries extérieures

Les menuiseries extérieures sont des éléments à part entière de l'enveloppe isolante d'un bâtiment mais, comme évoqué en introduction de cet exemple, c'est également un équipement avec ses évolutions techniques et fortement empreint d'affect dans son choix. D'ailleurs, les services marketing des fabricants de menuiseries œuvrent à entretenir ces sources d'envies de changement par une forte présence commerciale, notamment médiatique.

Malgré le coût important de l'opération, il est donc inéluctable que les menuiseries seront remplacées plus fréquemment que les autres éléments isolants de l'enveloppe (désynchronisation). Donc, quand bien même une rénovation complète et performante serait réalisée aujourd'hui, il faudrait anticiper le fait que les menuiseries pourraient être remplacées dans quelques années sans nécessité énergétique, mais pour des raisons esthétiques (goûts évoluant selon les tendances marketing ou les propriétaires successifs) ou d'évolutions technologiques (développement de vitrage plus isolant, à contrôle solaire intelligent, opacifiant par commande électrique, producteur d'électricité photovoltaïque, à acoustique renforcé, à ouverture pilotée...) ; il faut donc anticiper le fait que la rénovation des menuiseries s'effectuera tôt ou tard par étapes...

Pour prendre en compte cette hypothèse à forte probabilité, il paraît indispensable de faire évoluer les pratiques de pose, voire de fabrication des menuiseries, pour que, lors de la première rénovation conjointe des menuiseries et de l'isolation murale, un système pérenne et définitif de continuité d'isolation et d'étanchéité à l'air soit installé permettant de changer seulement les menuiseries sans avoir à refaire l'isolation, la plâtrerie, ou l'enduit qui les entourent (modularité).

Il serait intéressant de faire travailler la profession sur un système adéquat, qui, par exemple, pourrait être constitué d'un précadre isolant fixé sur la maçonnerie, continu à l'isolation murale, sur lequel seraient définitivement raccordés les dispositifs d'étanchéité à l'air, et profilé de façon à accueillir des dormants de menuiserie adaptés en garantissant une parfaite étanchéité.

2.2. Cas 2 : isolation des combles perdus avant l'isolation des murs

La toiture est considérée, à juste titre, comme la principale source de déperditions de chaleur dans une maison non isolée. Pour cette raison, l'État a décidé de privilégier l'isolation de la toiture en lui octroyant des aides plus conséquentes. Notamment, les certificats d'économie d'énergie, bonifiés par le « Coup de Pouce Isolation », ont produit une offre de travaux d'isolation de combles perdus à un prix très attractif : les opérations « Combles à 1€ ».

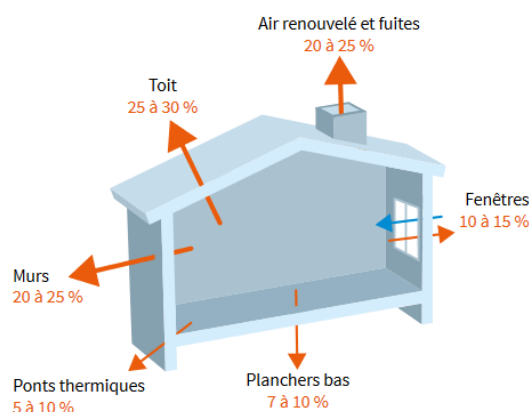


Figure 29 : Pertes de chaleur d'une maison d'avant 1974 non isolée. Source : Guide Isoler sa maison de l'ADEME.

Ainsi, le cas de figure où l'isolation des combles est effectuée avant l'isolation des murs (voire totalement indépendamment d'une réflexion préalable et globale sur l'isolation du logement) est devenu très courant dans les pratiques actuelles.

Pour les calculs de la partie 3, cette hypothèse a notamment été retenue pour les typologies de maisons suivantes : 3-SFH, 2-TH et 3-TH.



3-SFH : isolation des combles perdus avant ITE



2-TH : isolation des combles perdus avant une ITI



3-TH : isolation de combles perdus avant une ITE

Figure 30 : Exemples de typologies concernés par l'interface combles perdus - murs

1^{ère} étape : l'isolation des combles perdus

La pratique courante actuelle est d'arrêter l'isolant **au droit du nu intérieur des murs** périphériques (gouttereaux et pignons), ou contre la panne sablière.

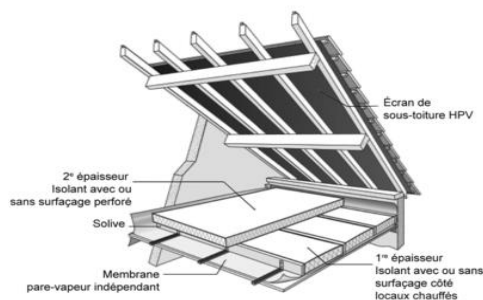


Figure 31 : Isolation en laine minérale déroulée en 2 couches Source : CPT 3560_V2 du CSTB

Cette pratique correspond notamment aux recommandations du CPT 3693_V2 du CSTB (CSTB CPT 3693 v2, 2015) pour l'isolation des combles par un isolant en vrac soufflé.



Figure 32 : Mise en place de déflecteurs. Source : CPT 3693 (CSTB)

Si le mur périphérique ne dépasse pas la hauteur d'isolant soufflé d'au moins 10 cm, ce cahier prescrit la mise en place de déflecteurs positionnés au nu intérieur du mur afin de ne pas créer un obstacle à la ventilation des combles en partie basse, tout en évitant des mouvements d'air dans l'isolant.

Ainsi, en ne se concentrant à cette étape que sur l'isolation des combles, aucune règle ou recommandation professionnelle ne fait allusion au **risque de discontinuité d'isolation entre toiture et murs** et aux conséquences du pont thermique éventuel.

Règles et réalités

Les travaux décrits sont considérés réalisés dans les règles de l'art par des professionnels consciencieux. Selon les CPT 3693 et 3647, l'entreprise réalisant l'isolation de combles perdus doit reconnaître l'état des combles et notamment **s'assurer que le support de l'isolant est étanche à l'air**.

Malheureusement, notre expérience des chantiers sur lesquels ont été réalisées des opérations d'isolation à 1€ témoigne de l'absence totale de gestion de l'étanchéité à l'air (qui représenterait certainement, pour les entreprises, un surcoût non absorbable par les CEE). Ce retour d'expérience est d'ailleurs partagé par l'AQC dans son rapport « Isolation des combles perdus par soufflage, 12 enseignements à connaître », enseignement n°3 (AQC Combles perdus, 2019).

Ce point n'est par ailleurs pas contrôlable aisément, ce qui rend très hypothétique le respect systématique par les professionnels de cette exigence d'étanchéité à l'air, qui est complexe à traiter mais dont la performance à terme dépend directement.

2^{ème} étape : ITE

Si rien ni personne ne prévient l'entreprise mandatée à cette étape pour l'isolation des murs, elle va, par habitude, arrêter son isolant sous la sous-face du débord de toiture.

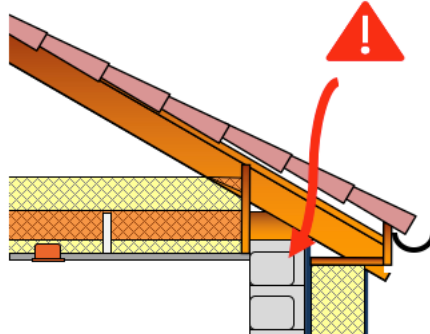


Figure 33 : Discontinuité d'isolation entre combles et ITE (source : Dorémi)

Il reste alors un pont thermique important au niveau de la tête de mur. Celui-ci provoque un point froid important dans le logement **avec un risque de moisissure sur le haut du mur**.

Si le mur est constitué d'un matériau relativement perméable à la vapeur d'eau, il y a un risque important de condensation concentré aux jonctions mur/charpente qui entraînera un pourrissement des bois de charpente en appui sur le mur et donc un risque structurel sur le bâtiment.

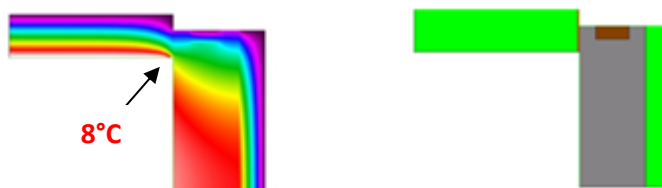


Figure 34 : Simulation par éléments finis du pont thermique sur la tête de mur non isolée (source : Enertech). Le point froid généré par ce pont thermique est de 8°C dans l'angle intérieur pour -11°C extérieur. Il provoque donc un risque grave de condensation.

Un exemple de ce cas de figure a été rencontré sur une maison récemment rénovée :

- la toiture avait été reprise, notamment les habillages de débord de toit ;
- les combles perdus ont été isolés avec 40 cm de ouate de cellulose soufflée jusqu'au nu intérieur du mur ;
- l'entreprise d'ITE est intervenue quelques mois plus tard et n'a pas trouvé opportun de démonter ces habillages si récents, et a donc arrêté son isolant en dessous.

Éléments de contexte : une ventilation VMC simple-flux hygroréglable est bien installée et en fonctionnement. Une grille d'entrée d'air réglementaire est présente sur une des deux fenêtres de la pièce dans laquelle s'est manifesté le désordre.



Figure 35 : Moisissures apparues sur un pont thermique dû à la discontinuité de l'ITE et de l'isolation des combles (Source : Dorémi).

Pour éviter ce pont thermique, il faut donc réaliser l'isolation de la tête de mur pour permettre la jonction avec l'ITE.

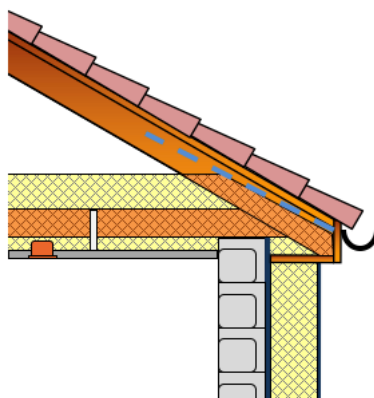


Figure 36 : reprise d'isolation de toiture pour continuité avec l'ITE (source : Dorémi)

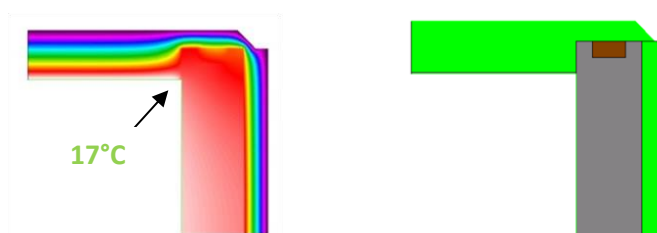


Figure 37 : Simulation par éléments finis du pont thermique sur la tête de mur isolée (Source : Enertech). Le point froid généré par ce pont thermique n'est que de 17°C dans l'angle intérieur pour -11°C extérieur, il n'y a pas de risque de pathologie.

Il aurait été judicieux de l'anticiper lors de l'isolation des combles en permettant à l'isolant d'aller au plus loin.

Et si cela n'a pas été anticipé à l'étape précédente...

Si l'isolant des combles a été bloqué verticalement lors de la 1^{ère} étape, selon les recommandations vues précédemment, il faudra lors de la réalisation de l'ITE **accéder à la tête de mur par l'extérieur en découvrant le bas de la toiture**.

Or l'ITE est généralement réalisée par une entreprise de façadiers qui ne sont ni formés ni assurés pour intervenir sur la toiture et sa couverture. Il y a donc un **surcoût certain** pour cette nouvelle intervention, qui sera encore accentué s'il est fait appel à une nouvelle entreprise.

En l'absence d'accompagnement du ménage, le surcoût peut être encore aggravé s'il n'est pas avisé de faire intervenir cette entreprise en charge de ce complément d'isolation **en même temps que les façadiers** afin de profiter de l'échafaudage en place (probablement à rehausser cependant) pour un accès aisé et sécurisé à la toiture.

Même si le problème de pont thermique a été identifié et indiqué au ménage à cette deuxième étape, il y a fort à parier que les travaux correctifs ne soient pas effectués car :



- le surcoût sera rédhibitoire,
- cette intervention particulière d'isolation complémentaire ne pourra profiter d'aucune aide financière,
- il y aura un frein psychologique important à retoucher (casser partiellement et refaire) des travaux récents.

C'est pourquoi, dans la matrice présentée précédemment, cette interface est classée avec un niveau de difficulté Orange : « Anticipation indispensable dès la première étape ».

En conclusion, l'étape « isolation des combles perdus » aurait dû pointer les risques et anticiper une ITE future. Cela aurait certainement convaincu le ménage que ces 2 lots étaient difficilement dissociables et qu'il était plus qu'opportun de réaliser les 2 opérations simultanément.

2^{ème} étape alternative : ITI

Lors de la réalisation de l'ITI, il faut s'assurer que le plafond sur lequel s'arrête l'isolant des murs est bien le support de l'isolation des combles.

Cas général : le plafond est en contact avec l'isolant des combles et il est étanche à l'air

Dans ce cas-là, le traitement de l'interface isolation mur/combles est sans complexité, même en procédant en 2 étapes : le freine-vapeur de l'ITI, également membrane d'étanchéité à l'air dans de nombreux cas, devra être raccordé sur le parement du plafond (étanche à l'air).

Ce freine-vapeur est indispensable pour protéger l'isolant mural de toute condensation d'eau au contact du mur extérieur, froid (voir les 7 bonnes pratiques mentionnées dans la partie 1).

Si le plafond n'est pas une dalle en béton, le pont thermique lié à l'épaisseur du parement (plaque de plâtre, brique plafonnante, lattis bois plâtré) est suffisamment minime pour être négligé et ne pas contraindre à ouvrir le plafond en périphérie pour assurer le contact entre isolants horizontal et vertical.

Pour un plancher haut en béton, il y aura alors un pont thermique (type plancher intermédiaire en ITI), mais il ne représente pas réellement de source de pathologie. En effet, le plancher en béton ne craint pas la migration de vapeur et le risque de condensation inhérent puisqu'il est son propre pare-vapeur. Le plancher étant isolé entièrement par-dessus et sur l'épaisseur de l'isolant mural en dessous, le risque de condensation sur les parements intérieurs n'est probable qu'en conditions extrêmes.

Comme ce pont thermique structurel est difficile à supprimer complètement en ITI, il a notamment été intégré dans l'élaboration des bouquets de travaux proposés en RCP (STR) en le compensant par un renforcement des résistances thermiques proposées pour l'enveloppe.

Pour se prémunir au maximum d'un risque de condensation sur l'angle dalle/parement mural intérieur, on pourra encore réduire le pont thermique en posant un isolant en périphérie de la sous-face du plancher béton sur 60 cm minimum. Cette isolation périphérique entraînera vraisemblablement la création d'un faux-plafond ou de soffites, avec l'occasion de jouer architecturalement sur les volumes intérieurs.

Dans la matrice présentée précédemment, cette interface est classée avec un niveau de difficulté Vert « interface non problématique ».

Cas d'un plénum en faux-plafond

Il n'est pas rare de rencontrer des plénums²⁷ en plafond. Ils sont généralement issus d'une rénovation « esthétique » pour masquer un plafond originel (lattis abîmé, plafond en brique fissuré, plancher de grenier sur solivage apparent, dalle béton, etc...) et/ou faire passer des réseaux, installer des spots, abaisser la hauteur sous plafond, etc.

Lorsque l'isolation des murs se fera par l'intérieur, si l'isolant du mur s'arrête sous le parement du faux-plafond, il y aura un important pont thermique par discontinuité de l'enveloppe isolante sur la hauteur de ce plénum.

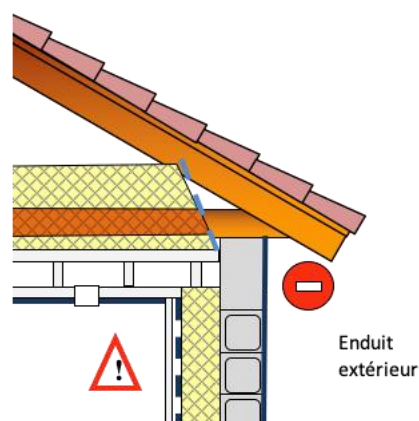


Figure 38 : Discontinuité d'isolation et d'étanchéité à l'air en cas de faux-plafond (plénum non isolé) (source : Dorémi)



Pont thermique / défaut d'étanchéité à l'air au niveau du plafond (plâtre, plafonnette en brique, ...).



Risque de pathologie / moisissure accentué par l'isolation des deux parois.

²⁷ Plénum : c'est l'espace entre la sous-face de la dalle du niveau supérieur et la face supérieure du faux-plafond.

Et si cela n'a pas été anticipé à l'étape précédente...

Pour corriger cette absence d'isolant en périphérie du plénum, il faut donc pouvoir accéder à cet espace, soit par-dessus, soit par-dessous.

a) Solutions de traitement de l'isolation du plénum par-dessus

En choisissant d'accéder au plénum par-dessus (dalle béton exclue évidemment), via les combles, il va falloir :

1. Sécuriser l'accès à la périphérie des combles perdus, en créant ou complétant les cheminements nécessaires depuis la trappe ou une ouverture en toiture. Pour ne pas dégrader l'isolant en marchant dessus ou en le comprimant avec les cheminements, il faudra certainement retirer cet isolant le temps de l'intervention.
2. Enlever l'isolant en périphérie sur une surface suffisamment large pour qu'une personne puisse travailler, notamment en bas de pente.
3. Décoller et retirer la membrane freine-vapeur et/ou d'étanchéité à l'air s'il y en a une.
4. Découper le support (plancher sur solivage ou lattis ou brique sous solivage) pour accéder au plénum.
5. Poser sur toute la hauteur du plénum un isolant de même épaisseur que l'isolant mural, avec une membrane freine-vapeur verticale collée sur le faux-plafond et autour des solives traversantes. (étanchéité très complexe à garantir, notamment en raison de l'accessibilité très limitée, voire impossible, sous les solives)
6. Reposer un support et coller la membrane, s'il y en a une, sur la maçonnerie périphérique.
7. Reposer l'isolant dans les combles comme à l'origine



Bilan : énormément de main d'œuvre dans des conditions d'accès difficiles, d'où un chiffrage de l'opération conséquent et très probablement rédhibitoire. De plus, dans cette configuration, les plans d'étanchéité à l'air continus sont la membrane verticale protégeant l'isolant mural et l'enduit du faux-plafond (donc lambris exclu) dont il faudra vérifier l'état par rapport aux fissures éventuelles et aux percements (attention à l'étanchéité des spots encastrés). Une bonne partie de cette intervention aurait pu être évitée si elle avait été anticipée et effectuée en même temps que l'isolation des combles.

b) Solutions de traitement de l'isolation du plénum par-dessous :

Il pourrait alors paraître plus facile d'accéder au plénum par-dessous.

Pour cela, si et seulement si aucun spot ou autre source de chaleur n'est intégré dans le faux-plafond à proximité des murs (risque de surchauffe, de destruction du spot voire d'incendie), on pourrait :

1. Percer quelques trous à scie cloche dans le parement du plénum en périphérie
2. Insuffler un isolant en vrac avec une densité et une quantité suffisante pour essayer de combler toute la hauteur du plénum sur une largeur au moins équivalente à l'épaisseur de la future isolation murale.
3. Reboucher soigneusement les trous pour recréer la continuité de la barrière d'étanchéité à l'air et à la vapeur de l'enduit du plafond.
4. Repeindre l'ensemble des plafonds pour masquer les reprises de plâtrerie si elles ne se situent pas dans l'emprise du doublage isolant mural.

Sinon, il faudrait :

1. Découper le faux-plafond en périphérie sur une largeur suffisante pour pouvoir travailler (>30cm) et au moins jusqu'à la fixation suivante (fourrure parallèle au mur) pour refixer un parement à la fin.
2. Couper et déplacer les supports de fixations (fourrures, suspentes, lisses ou crochets) du faux-plafond devenus gênants.
3. Monter l'isolant mural et son freine-vapeur au contact du support de l'isolant des combles (en soignant les contours de solives le cas échéant).
4. Poser de nouvelles fixations du faux-plafond (suspentes + fourrure parallèle au mur ou rallonges de fourrures perpendiculaires) au plus proche de l'isolation murale.

5. Poser la jonction de parement entre cette isolation verticale et l'ancien parement découpé. Si le support de l'isolant des combles n'est pas une dalle béton et qu'il n'y a pas de membrane d'étanchéité sous l'isolant des combles visibles par en dessous, alors c'est le parement continu du faux-plafond (pas de lambris !) qui fait office de plan d'étanchéité horizontal supérieur, il faut donc lier ce parement horizontal à la membrane verticale en fermant l'angle avec un adhésif adapté.
6. Fixer la lisse haute de l'ossature du doublage sur les nouvelles fourrures (ajoutées ou allongées) du faux plafond, poser les fourrures verticales et le parement mural.
7. Faire les joints au plafond entre ancienne et nouvelle parties et repeindre l'ensemble des plafonds pour masquer les jonctions de parements.

NB 1 : les fourrures métalliques d'ossature sont un exemple, elles peuvent évidemment être remplacées par une structure en bois, pour diminuer l'empreinte carbone de l'ouvrage.

NB 2 : pour que le faux-plafond puisse être considéré comme plan d'étanchéité, il faut qu'il soit continu sur toute la surface délimitée par des parois verticales étanches à l'air (doublages ou mur de refend étanches à l'air). Les cloisons qui « traverseraient » le faux-plafond sont des sources fréquentes de défaut d'étanchéité de l'enveloppe.



Bilan : Cette opération peut donc s'avérer également très complexe et coûteuse.

Malgré tout, compte tenu des différentes solutions exposées, cette interface est classée comme présentant un niveau de difficulté Jaune « Solution envisageable par étapes ». Elles sont cependant tellement lourdes qu'une anticipation aurait été préférable – un classement en orange ou rouge serait probablement plus réaliste.

En anticipant qu'une isolation des murs se ferait ultérieurement par l'intérieur, il aurait pu être entrepris une solution d'isolation des combles incluant une suppression du plénum :

- Dans le cas d'un faux-plafond masquant un ancien plafond en lattes plâtré fixé directement sous un solivage ou un plafond suspendu en plafonnette brique, il vaudra mieux supprimer le lattes ou les briques en périphérie des murs avant l'isolation des combles pour avoir une retombée périphérique d'isolant dans le plénum.
- Dans le cas d'un faux-plafond en briques (plafonnette) ou en plaques de plâtre suspendu sous un plancher de combles en bois (cas des greniers utilisés comme espace de stockage), le plus sûr est de supprimer le platelage du plancher en conservant le solivage (qui supporte le faux-plafond) pour ouvrir complètement ce plénum par le dessus et le remplir d'isolant.

En cohérence avec le CPT 3647 sur *la mise en œuvre des procédés d'isolation thermique rapportée en planchers de greniers et combles perdus*, choisir de conserver le plancher et de remplir entièrement le plénum par un isolant (insufflé) est une solution délicate pour la gestion de la vapeur, le plancher devenant un frein à sa migration du côté froid de l'isolant qui imposerait l'ajout d'un freine-vapeur côté chaud de l'isolant (c'est-à-dire mise en œuvre complexe de la membrane autour des solives ou réfection complète du faux plafond pour tendre le freine-vapeur sous les solives)

4.3.1.2 Isolant recouvert d'une surface de répartition

Lorsqu'une surface de répartition (parquet sur solives, panneaux de particules, etc.) est placée au-dessus de l'isolation, il y a risque de condensation, en particulier en sous-face de cette surface si sa perméance est faible vis-à-vis des perméances des couches inférieures constituées par le plancher avant isolation (plafond de l'étage inférieur) et l'isolation. Une feuille pare-vapeur doit être posée sur la paroi plancher support et l'ensemble doit répondre à la règle suivante :

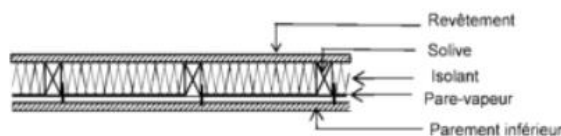


Figure 39 : Extrait du CPT 3647 sur l'isolation de combles en plénum

De plus, la hauteur du plénum est très certainement insuffisante pour l'épaisseur d'isolation nécessaire (> 35cm après tassement).

(NB : Dans le cas d'un plancher haut en béton, puisqu'il n'est possible d'intervenir que par en dessous, l'anticipation n'est pas nécessaire et l'isolation périphérique du plénum se fera au moment de l'isolation des murs)

Conclusion :

S'il est décidé lors d'une première étape d'isoler les combles perdus et de reporter à plus tard l'isolation des parois verticales (exemple très courant actuellement), **le choix de la méthode d'isolation des murs doit être anticipé lors de l'isolation de ces combles** sous peine de ne pas traiter d'importants ponts thermiques ou des défauts conséquents d'étanchéité à l'air.

Or actuellement le ménage ne sait généralement pas s'il envisage ultérieurement une ITE ou une ITI, lorsqu'il passe commande d'une isolation des combles à 1€, et il faudrait donc pouvoir couvrir tous les possibles...

2.3. Cas 3 : isolation de la toiture en rampants avant l'isolation des murs

Qu'il soit lié à une architecture vernaculaire ou un souhait d'exploiter des m² disponibles, l'aménagement des combles est assez commun en France. Il en a découlé un consensus sur l'expérience de vivre sous les toits : glacière en hiver et fournaise en été, c'est invivable sans une bonne isolation. Ainsi, l'isolation des rampants fait souvent partie des travaux prioritaires pour améliorer le confort de sa maison avec combles aménagés.



Figure 40 : Typologie 1-TH

L'isolation de ces rampants se fait beaucoup plus par l'intérieur que par l'extérieur (méthode sarking), pour des raisons budgétaires, mais aussi de contraintes réglementaires (il faut déposer un permis de construire pour isoler une toiture en sarking car cela change la hauteur du faîtage de la maison). Cet exemple se concentre donc ici sur l'isolation des rampants par l'intérieur.

Pour les calculs de la partie 3, cette hypothèse a notamment été choisie pour la typologie de maison TH1.

De même que dans le cas étudié ci-avant de l'isolation des combles perdus, la principale problématique à considérer est la **continuité de l'isolation et de l'étanchéité à l'air avec une future isolation des murs**. Or cette problématique se traitera différemment selon que l'isolation des murs se fera par l'intérieur ou par l'extérieur.

1^{ère} étape : isolation des rampants

Tant que l'isolation des murs n'a pas été réfléchie, l'isolation des rampants risque de simplement s'arrêter contre l'intérieur du mur, notamment quand il est envisagé de refaire uniquement les plafonds et leur isolation dans des combles déjà aménagés.

Selon toute probabilité, la membrane freine-vapeur et d'étanchéité à l'air sera alors collée sur les parements existants des murs périphériques.

2^{ème} étape : ITE

On se retrouve ici dans une configuration similaire au cas de l'interface combles perdus / ITE décrite précédemment.

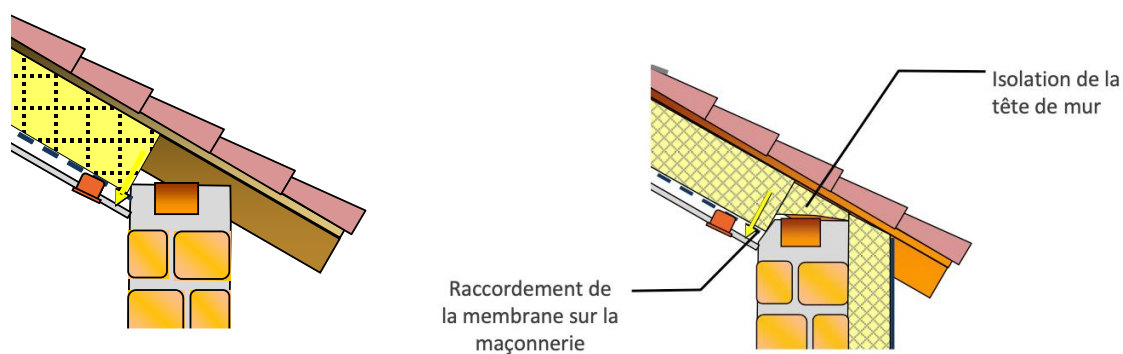


Figure 41 : Isolation des rampants et ITE. Gauche : isolation des rampants sans réflexion sur l'isolation des murs à venir. Droite : Continuité d'isolant à prévoir entre rampant et ITE. (source : Dorémi)

Il faut réussir à faire la jonction en isolant la tête de mur selon une des 2 solutions :

- a)  le complément d'isolation se fait par l'intérieur et il faut alors découper le bas du plafond, décoller la membrane pare-vapeur/pare-air pour accéder à l'espace à isoler puis tout refermer proprement et refaire la peinture du plafond.
- b)  le complément d'isolation se fait par l'extérieur et il faut alors accéder à la toiture pour enlever plusieurs rangées de tuiles, les liteaux, potentiellement le pare-pluie et la volige, mettre l'isolant en respectant les distances sous couvertures pour maintenir leur ventilation et reposer tous les éléments enlevés.

Ces 2 solutions sont complexes et chères, et cette situation peut être évitée en anticipant lors de l'isolation des rampants.

Il est également important à cette étape de vérifier qu'il y aura bien continuité des plans d'étanchéité à l'air entre rampants et murs.

Pour rappel, dans le cas d'une isolation des murs par l'extérieur, en l'absence d'ajout d'une membrane, le plan d'étanchéité des parois verticales peut être :

- a) Le mur lui-même si c'est un voile béton (béton banché avec trous de banches rebouchés soigneusement et joints de dilatation traités)
- b) l'enduit extérieur (chaux, ciment) :
 - continu
 - en bon état (sans fissurations, décollements, perforations, etc...)
 - avec les traversées de gaines étanchéifiées (éclairage extérieurs, alimentations de volets roulants électriques, robinet de puisage extérieur, etc...)
- c) l'enduit intérieur (plâtre, chaux, ciment) :
 - appliqué directement sur la maçonnerie structurelle (pas de doublage avec vide technique)
 - continu (à vérifier notamment au niveau des planchers intermédiaires)
 - en bon état (sans fissurations, décollements, perforations, etc...)
 - avec les appareillages et gaines encastrés eux-mêmes étanchéifiés.

Dans tous les cas, il faudra donc que la membrane d'étanchéité des rampants soit raccordée directement sur une partie de maçonnerie étanche (voile béton, enduit intérieur ou arase béton en lien avec l'enduit extérieur).

Si ces travaux d'isolation ne se font pas simultanément, cela exigera donc une vérification de ce raccordement soit :

- a)  sur la foi d'une preuve archivée (rapport, photos...)
- b)  par un contrôle destructif : dépose du parement des rampants en bas de pente, voire du parement de doublage des murs pour visualiser ce raccordement, correction si nécessaire puis repose du parement et reprise de revêtement

C'est pourquoi, dans la matrice présentée précédemment, cette interface est classée avec un niveau de difficulté Orange « anticipation indispensable dès la première étape ».

Cas particulier d'une toiture en appui sur un mur

Dans le cas où les rampants isolés sont ceux d'une toiture intermédiaire en appui sur un mur soit en faîtage (rive de tête) soit latéralement (rives sur pignon), il faut particulièrement faire attention à la **continuité de l'étanchéité à l'air** entre mur et rampant.

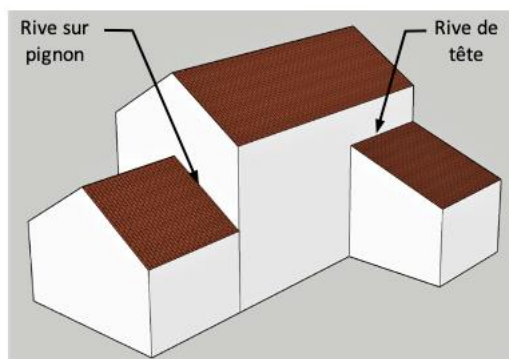


Figure 42 : Types de toiture en appui sur un mur (source : Dorémi)

En effet, pour une isolation par l'extérieur, il est souvent considéré que l'enduit extérieur existant va jouer le rôle de barrière d'étanchéité à l'air.

Or, si la toiture intermédiaire n'est pas un ajout après la construction initiale de la maison, l'enduit de façade est arrêté au-dessus de la couverture du rampant intermédiaire (voir Figure 43).

Un enduit intérieur est peut-être appliqué sous le parement du plafond rampant, fixé sous les chevrons ou les pannes, mais dans l'épaisseur entre couverture et plafond, le mur d'appui n'a reçu aucun enduit.

Pour une maçonnerie en blocs maçonnés, laissée nue sans enduit, il y a donc une rupture de son plan d'étanchéité et une ouverture à la migration à la vapeur d'eau. Celle-ci pourrait venir condenser dans l'isolant du rampant en appui, pouvant générer une détérioration de cet isolant voire de la charpente.

Ainsi, si l'isolation des murs n'est pas réfléchie simultanément à celle des rampants, il y a un risque fort de fixer la membrane d'étanchéité des rampants sur le mur d'appui en oubliant d'assurer sa continuité avec l'enduit de façade... ce qui ne sera pas corrigé ensuite sauf au prix de déposer puis reposer parement, membrane, et isolant aux abords du mur d'appui à étanchéfier.

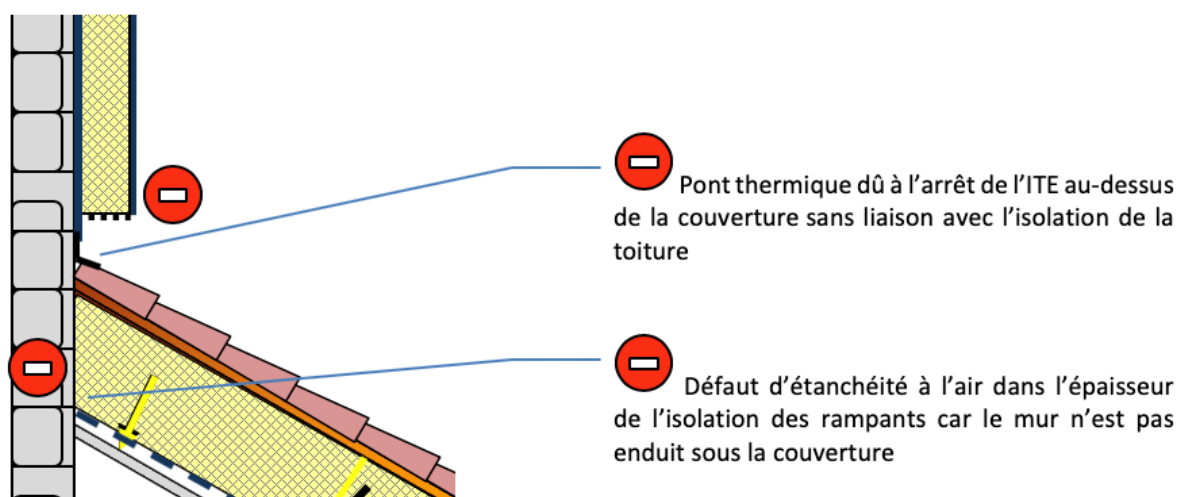


Figure 43 : Pratique courante de discontinuité d'isolation et d'étanchéité à l'air entre ITE et rampants (source : Dorémi)

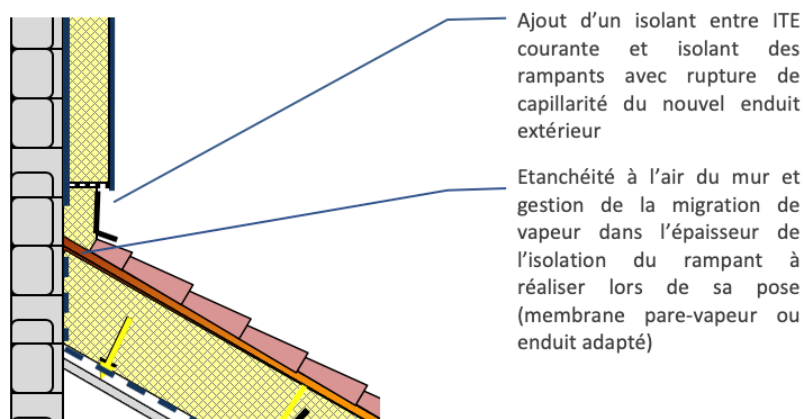


Figure 44 : Bonnes pratiques de liaison d'isolation et d'étanchéité à l'air entre ITE et rampants (source : Dorémi)

2^{ème} étape alternative : ITI

Si l'isolation des murs par l'intérieur n'est pas faite en même temps que celle des rampants, on sera alors confronté à la difficulté de mettre en contact les isolants (pont thermique) et de raccorder ensemble les membranes pare-vapeur/pare-air des murs et des rampants (infiltration d'air et migration de vapeur dans l'isolant et la charpente).

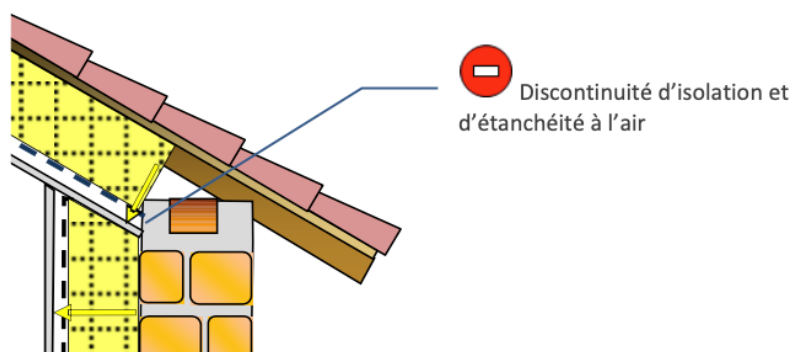


Figure 45 : ITI réalisée après l'isolation des rampants sans avoir prévu la continuité de l'isolation et de gestion de l'étanchéité à l'air et de la migration de vapeur d'eau (source : Dorémi)



Pour faire ce raccordement, il faudra accéder à la membrane de la toiture donc on sera contraint de découper la périphérie du parement de plafond (plaque de plâtre, lambris...) et de modifier les supports de fixation (tout ça sans abîmer la membrane), puis de refaire la jonction de parement du plafond avec celui du mur isolé et probablement refaire la peinture du plafond.

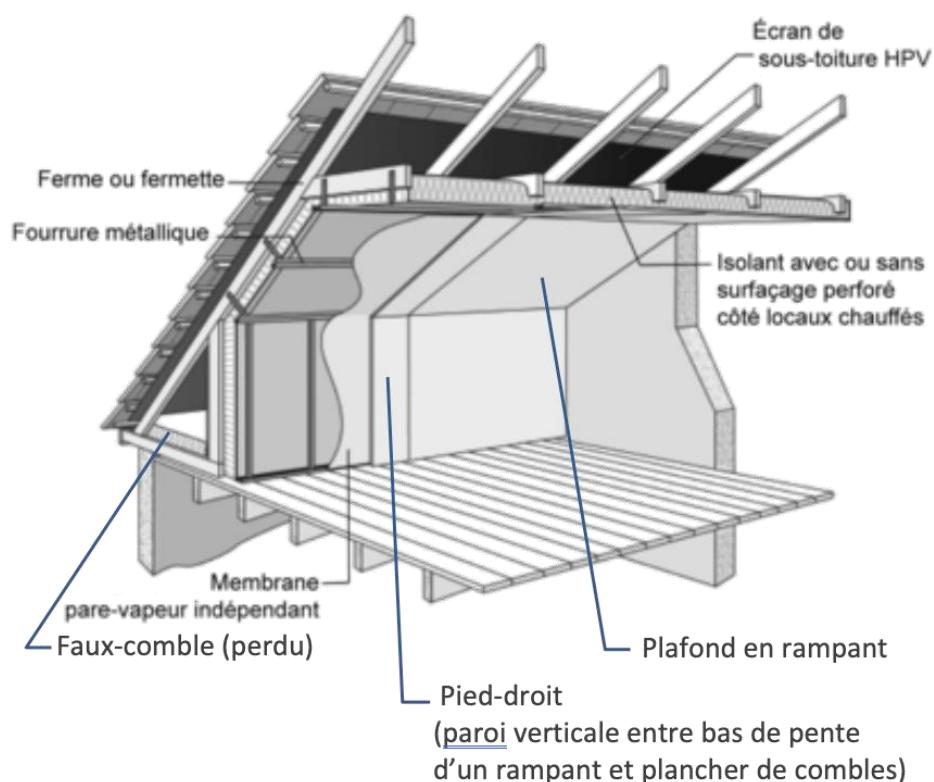
C'est pourquoi, dans la matrice présentée précédemment, cette interface est classée avec un niveau de difficulté Orange : « anticipation indispensable dès la première étape ».

Cas particulier d'une ITI partielle en étape 1

Lors de l'isolation des rampants, un professionnel consciencieux proposera de prolonger l'isolation des rampants sur les pieds-droits jusqu'au plancher de combles (voir Figure 46).

Si le pied-droit n'est pas au niveau du mur extérieur, il y a également un faux-comble à isoler horizontalement (sur le plancher).

Si ce plancher est une dalle en béton, la membrane freine-vapeur couvrant l'isolant vertical du pied-droit sera collée dessus puisque le béton constitue une paroi étanche à l'air et à la vapeur.



Mais si le plancher est en bois (donc non étanche à l'air), la membrane devra être prolongée horizontalement entre isolant et plancher pour se raccorder sur une partie étanche de la maçonnerie. Il faudra prendre soin de maintenir la continuité sous la structure de la paroi du pied-droit, ce qui sera très complexe si elle n'est pas réalisée ou refaite lors de l'isolation.

Si l'isolation des murs par l'intérieur de l'étage sous les combles aménagés est réalisée plus tard, il deviendra quasi impossible de raccorder la membrane pare-vapeur/pare-air de l'ITI sur celle des combles.

On se retrouve, en effet, dans la configuration d'une ITI avec un plancher intermédiaire en bois. Pour être bien traitée, cette configuration exige d'ouvrir le plancher en périphérie pour effectuer la liaison entre isolants et membranes des 2 niveaux, en prenant soin des jonctions d'étanchéité autour du solivage.

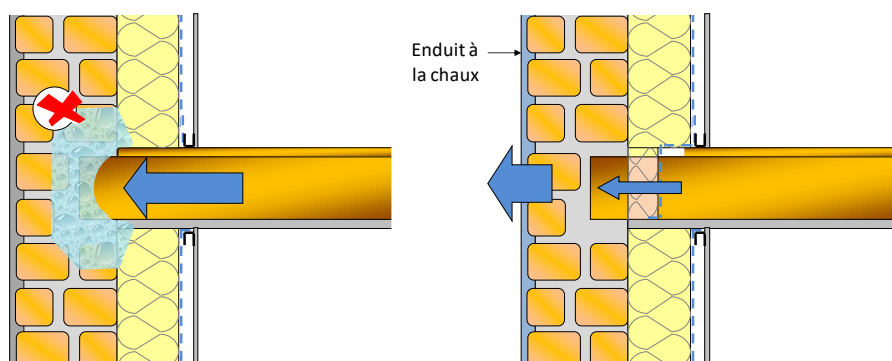


Figure 47 (gauche) : ITI sans continuité d'isolant et de pare-vapeur dans l'épaisseur d'un plancher bois (Source : Dorémi)
Figure 48 (droite) : Continuité d'ITI en découpant le plancher en périphérie (Source : Dorémi)

Or démonter en périphérie une partie du plancher des combles après l'avoir isolé sera extrêmement complexe. De même, il sera difficile de traiter ce plancher en même temps que l'isolation des combles si l'isolation des murs n'est pas réalisée conjointement. Cela demande des travaux importants par en-dessous, sur le plancher et l'éventuel faux-plafond (voir cas « isolation des combles perdus sur faux-plafond »), que les ménages n'ont visiblement pas envisagés puisqu'ils n'ont pas associé l'ITI dans cette étape de travaux.

C'est pourquoi, dans la matrice présentée précédemment, cette configuration d'interface est classée avec un niveau de difficulté Rouge « difficulté majeure (irréaliste) ».

Ces quelques exemples de réalisation de travaux d'isolation de l'enveloppe par étapes montrent bien la **grande complexité d'un traitement non simultané des interfaces** qui implique :

- de l'**anticipation dans les choix et la réalisation au risque de créer des situations pathologiques irrémédiables** ;
- des **travaux supplémentaires compliqués et exigeants** dans le soin à y apporter pour ne pas altérer les produits déjà posés ;
- un **budget supérieur** pour refaire des parties de travaux et/ou réaliser des travaux plus compliqués ;
- que les professionnels intervenant à des années d'intervalle soient informés des choix précédents (**traçabilité**) et disposent des mêmes pratiques, **formations et outils** pour la gestion de ces cas complexes (inexistants à ce jour).

Et le phasage des travaux sur les équipements ?

Comme évoqué en introduction de ce chapitre, si cette partie s'intéresse uniquement aux enchaînements de travaux d'enveloppe, il ne faut surtout pas oublier ni négliger l'interaction des travaux d'installation d'équipements sur cette enveloppe.

En effet, traiter à des étapes dissociées les traversées d'enveloppe par des conduits de chauffage ou de ventilation, c'est prendre un risque sur la pérennité de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe.

Quelques exemples :

- Lorsque les systèmes sont remplacés ou intégrés après traitement de l'enveloppe, il faudra ouvrir largement les parements pour travailler confortablement et efficacement puis les refermer et effectuer des reprises, ce qui représentera un surcoût non négligeable.
- De plus, traiter les passages de réseau à des étapes dissociées des travaux d'enveloppe risque d'aboutir à une intégration peu cohérente des équipements, voire inesthétique.
- Si les réseaux sont réalisés avant une isolation par l'intérieur, ils seront une gêne pour la mise en place de l'isolant et de son pare-vapeur, d'où une perte de performance énergétique, à moins d'entreprendre et payer de nouveaux travaux pour les déplacer.
- Si ces réseaux sont réalisés après des travaux d'ITI, ils ne pourront pas être intégrés derrière le parement de doublage et devront soit rester apparents, soit être cachés dans de nouveaux caissons, doublages, soffites ou faux-plafonds qui représentent des travaux de plâtrerie supplémentaires qui auraient pu être optimisés en traitant tout en une seule étape.

3. Quels parcours de rénovation pour atteindre la performance à terme ?

Pour qu'une rénovation soit performante, il est nécessaire de mobiliser **6 postes** de travaux (murs, toitures, planchers bas, menuiseries, ventilation, chauffage/ECS) et de traiter les **interfaces et interactions** entre lots. Ces rénovations limitent ainsi les **ponts thermiques**, améliorent l'**étanchéité à l'air** et gèrent la **migration de vapeur d'eau** en accord avec la définition d'une rénovation performante : niveau de consommation BBC rénovation ou équivalent, préservation de la santé des occupants et du bâti et confortable pour les occupants (voir partie 1 de l'étude).

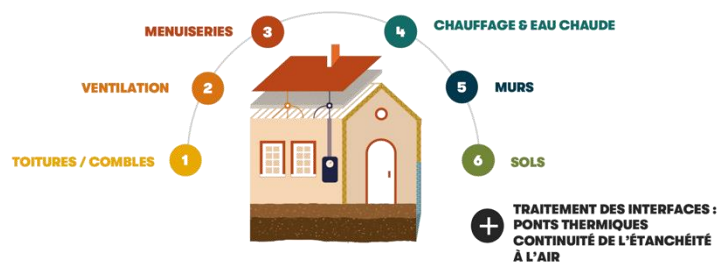


Figure 49 : Schéma des 6 postes de travaux nécessaires à la performance thermique (source : Dorémi).

La présente partie apporte des éléments calculatoires pour quantifier l'impact de différents paramètres sur la consommation énergétique (chauffage + ECS) après rénovation pour répondre aux questions suivantes : **quels sont les parcours susceptibles de conduire à un niveau de performance BBC rénovation ou équivalent à terme, en moyenne nationale, et pour quelles conditions ?** », ainsi qu'aux questions qui en découlent :

- Quelle est l'influence du nombre de postes traités ?
- Est-il envisageable de ne pas traiter la totalité des 6 postes ?
- Quelle est l'influence du nombre d'étapes dans le parcours de rénovation (entre 1 et 6 étapes) ?
- Quelle est l'influence d'un traitement plus ou moins qualitatif des interfaces et interactions lorsque les postes de travaux sont regroupés dans une même étape / lorsque les postes sont réalisés dans deux étapes dissociées ?

Pour les **besoins de cette modélisation**, **5 parcours de rénovation** sont décrits, chacun étant basé sur un ensemble d'hypothèses reflétant des pratiques existantes, plus ou moins répandues : la rénovation partielle, la rénovation partielle renforcée, la rénovation semi-globale, la rénovation quasi-complète (RQC) et la rénovation complète et performante (RCP). Chacun de ces parcours est décliné et adapté à **10 typologies de maisons** individuelles présentant des caractéristiques architecturales et techniques diverses, **représentatives de la diversité du parc bâti d'avant 1982** (TABULA Episcopo, 2015).

Des calculs dits « physiques », au plus près des consommations réelles²⁸, permettent d'évaluer la consommation **énergétique (chauffage + ECS) après chaque étape de rénovation** (cf. représentation schématique ci-dessous), pour chaque parcours et pour chaque typologie de maison ainsi qu'à l'échelle du parc <1982 (moyenne basée sur les statistiques régionales de construction et de densité de population).

²⁸ Voir détails des hypothèses de calcul détaillées dans l'annexe 2 page 162.

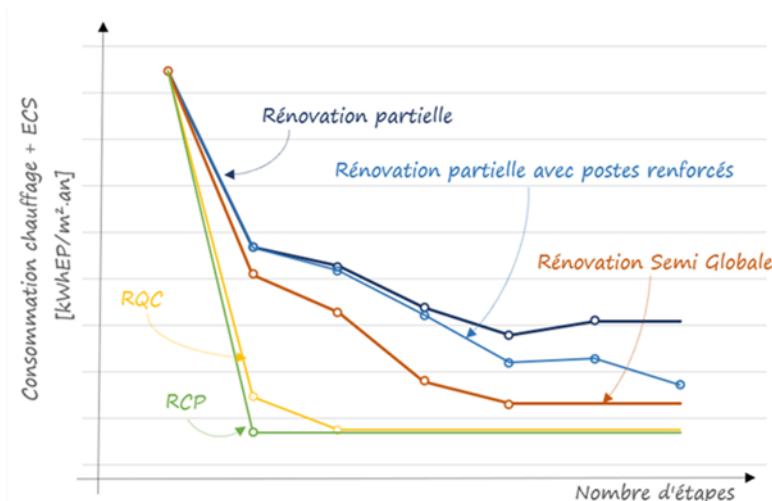


Figure 50 : Exemple de représentation des consommations (chauffage et production d'ECS) à chaque étape, pour les 5 parcours de rénovation sur une typologie de maison.
Ce type de graphique est présenté en annexe 3 pour les 10 typologies.

Cette partie comprend :

- les principales hypothèses de calcul pour chaque parcours ;
- les principaux résultats de calcul assortis d'une analyse qualitative portant sur les risques générés (cf. partie 1) et la complexité de réalisation des interfaces (cf. partie 2) ;
- l'analyse sur les regroupements de travaux souhaitables ;
- une conclusion permettant de discriminer les parcours au regard de leur capacité à atteindre un objectif BBC rénovation en moyenne nationale, et synthétisant les conditions nécessaires pour y parvenir le cas échéant.

3.1. Les principales hypothèses de modélisation

Consommation du parc existant et objectif de consommation à terme

Les maisons individuelles analysées dans cette étude, s'appuient sur les typologies recensées dans le rapport Tabula (TABULA Episcopo, 2015) et construites avant 1982. L'état initial de ces logements a été recalculé pour se rapprocher de la consommation moyenne constatée sur l'ensemble du territoire métropolitain des constructions d'avant 1982 (base DPE). En appliquant le climat moyen de Rennes, la consommation moyenne pour le chauffage et la production d'ECS s'élève à **455 kWh_{EP}/m²_{shab}.an** pour ce parc. **Cette valeur reste cependant une valeur probablement pessimiste en comparaison avec différentes sources**, dont l'enquête Phébus qui indique une consommation chauffage et ECS du parc de maisons d'avant 1975 de 319 kWh_{EP}/m²_{SHAB} (cf. annexe 1). Une part de l'écart s'explique par le fait que la méthode de calcul DPE, sur laquelle s'appuie l'enquête Phébus, peut sous-estimer les besoins de chauffage²⁹. Cependant, même après ajustements des paramètres d'entrée pour recalculer cet état initial (températures alignées sur celles du DPE notamment), l'écart ne s'est que légèrement réduit. Autre source d'écart, les rénovations partielles menées depuis la construction ne sont pas prises en compte dans le point initial de consommation du parc de l'étude, ce qui renforce l'écart avec la consommation constatée par l'enquête Phébus. Enfin, pour les ménages les plus modestes, une consommation initiale de 455 kWh_{EP}/m²_{shab}.an ne sera jamais atteinte car ils arrêteront probablement de se chauffer avant car impactant trop leur budget. Ce point initial est donc possiblement pessimiste, mais justifié techniquement avec les hypothèses de simulation.

²⁹ Les principales raisons sont le scénario conventionnel qui suppose que les logements sont chauffés à 19°C avec un ralenti à 16°C, la modélisation imprécise des apports gratuits, le fait de négliger l'effet du vent sur les infiltrations, et la surestimation dans le calcul du gain permis par la ventilation hygroréglable. Ces points ont été identifiés dans les travaux en cours d'évolution du DPE.

Les objectifs de rénovation énergétique de la France sont définis dans la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte du 17/08/2015, dite LTECV, qui fixe l'objectif de la rénovation de l'ensemble du parc de logements au **niveau BBC rénovation ou assimilé** d'ici 2050 (article 1.3.7), repris également par la SNBC (version du 25 mars 2020, p 90).

L'objectif du label BBC rénovation a été défini par le collectif Effinergie et repris dans la loi. Il est défini par un objectif de consommation de $80 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SRT}$ sur un périmètre de 5 usages, en énergie primaire (coefficient de 2,58 pour l'électricité et 0,6 pour le bois), en surface SRT³⁰, modulé selon la zone climatique et calculé avec la méthode ThCE-ex (RT2005-rénovation).

Il est a priori difficile de comparer cette valeur aux calculs réalisés dans cette étude, qui sont rapportés à la surface habitable (SHAB), sur méthode de calcul « physique » basé sur la STD et sur des rendements de génération issus de retours de terrain mesurés. Hypothèses retenues pour une équivalence entre les valeurs :

- L'objectif de $80 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SRT}$ du label BBC rénovation se décompose en moyenne³¹ en 53% pour le chauffage, 27% pour l'ECS, 10% pour l'éclairage et 10% pour VMC et auxiliaires.
- Ramenés à la surface habitable, avec une hypothèse classique de ratio SHAB / SRT de 0,9, les consommations de chauffage et ECS atteignent respectivement $47 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$ et $24 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$.
- En considérant que la consommation de chauffage en calcul physique est supérieure de 20% au calcul réglementaire³², les consommations de chauffage et d'ECS sont ramenées respectivement aux valeurs de $56 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$ et $24 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$, soit un total de **$80 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$ sur les deux usages chauffage et ECS.**

La valeur de **$80 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$ sur les deux usages chauffage et ECS** est retenue pour cette étude comme équivalente au niveau BBC rénovation pour les besoins de cette étude.

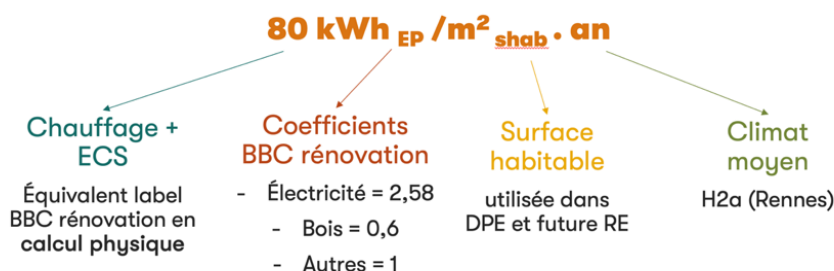


Figure 51 : Définition de l'objectif de consommation équivalent BBC rénovation dans l'étude.

Afin d'atteindre le facteur 4 sur le parc de maisons individuelles³³, l'étude s'appuie sur les Solutions Techniques de Rénovation, « STR » (Enertech STR, 2015) pour dimensionner chaque poste de travaux (résistances thermiques, rendements...) de l'ensemble des parcours (excepté parcours reflétant les pratiques actuelles).

Les consommations calculées à chaque étape des parcours sont issues d'un outil de calcul physique simplifié, développé par Enertech, pour approcher les consommations réelles du parc et les mettre en regard des objectifs de consommation visé.

La température de consigne utilisée pour les calculs se base sur 19°C avec ralenti à 17°C avant rénovation. Une augmentation de la consigne est intégrée après rénovation à 20°C avec ralenti à 18°C (pour les 2 dernières étapes de chaque parcours). Cette hypothèse permet de prendre en compte l'inconfort thermique avant rénovation, en particulier pour les ménages en situation de précarité énergétique. Après rénovation, les ménages aspirent à un

³⁰ Surface thermique au sens de la réglementation thermique (RT).

³¹ Source : Effinergie, Observatoire des rénovations BBC, octobre 2019, pour les maisons individuelles rénovées.

³² A dire d'expert d'Enertech, sur la base de nombreux retours de campagne de mesure, présentant une forte dispersion des résultats, 20% est plutôt une hypothèse basse, cf. **Annexe 1 – partie sur le calcul RT 2005-réno.**

³³ Sur la base des consommations du parc d'avant 1975 de $328 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$ pour le chauffage (source : Observatoire de l'énergie de 1975) et du parc construit depuis (autour de 80 à $100 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$), la consommation du parc de logement a été établie en 2007 lors de la création des premières STR (voir rapport Renaissance d'août 2007³³) à $210 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{SHAB}$. Le facteur 4 appliqué à cette valeur conduit à l'objectif arrondi à $50 \text{ kWh}/\text{m}^2$.

meilleur confort, qui se réalise par l'homogénéité des températures (pas de parois froides) et une consigne un peu plus élevée.

L'ensemble des hypothèses de calcul est placé en Annexe 2 (page 151).

Les 5 parcours de rénovation étudiés

La méthodologie du volet calculatoire de l'étude consiste à **modéliser des parcours représentatifs** des rénovations menées par les ménages tout en mettant en avant des interfaces et interactions sensibles. Pour chaque typologie, la technique de rénovation retenue pour chaque poste de travaux a été définie en fonction de critères multiples repris des pratiques observées en 2019 :

- État initial du logement et priorités de travaux à réaliser (chauffage vétuste par exemple),
- Travaux privilégiés par les ménages comme les menuiseries, ou les isolations à 1€, d'après (ADEME TREMI, 2018) et retours d'expérience Dorémi,
- Mise en avant des difficultés pouvant être rencontrées.

Cette étude s'appuie sur 5 parcours : la rénovation complète et performante (RCP) en une seule étape et **4 parcours de rénovation « par étapes »**. Ces parcours structurants sont définis ci-dessous en fonction que chaque parcours intègre ou non :

- Un **dimensionnement adéquat** des performances intrinsèques de chaque poste de rénovation ;
- Une **vision globale** permettant d'atteindre la performance à terme³⁴, c'est-à-dire une **feuille de route** indiquant les travaux à réaliser, en établissant un ordre de travaux résultant du souhait du ménage et prenant aussi en compte des contraintes techniques d'interfaces entre postes de travaux ;
- Un ensemble de **préconisations techniques** permettant l'anticipation des **interfaces**, afin de ne pas créer ni pathologie ni inconfort ni défaut de performance rédhibitoire.

Ces parcours alimentent la réflexion de l'étude pour définir ce qu'est, ou ce que n'est pas, une rénovation par étapes performante à terme.

Ils s'inspirent également de pratiques observées sur le territoire ou en cours de développement (passeports P2E, Méthodologie B2C2, dispositif Dorémi, enquête TREMI).

Pour tous les parcours, **la mise en œuvre des solutions techniques est considérée bien réalisée**, selon les règles professionnelles de chaque lot (DTU, règles RAGE, ...). Les résultats des calculs pour chaque parcours, et leur analyse, permettent de définir les conditions pour mener une rénovation par étapes performante à terme.

▪ Rénovation complète et performante (RCP)

La **rénovation complète et performante** est une rénovation qui permet d'atteindre le niveau BBC rénovation, en moyenne du parc, en une seule étape de travaux et par conséquent, qui intègre également les objectifs de santé (QAI notamment), confort et de qualité du bâti après rénovation.

La notion de performance est associée à ce parcours en amont de l'analyse des résultats car il sert de référentiel pour répondre à la question suivante : quels sont les écarts de performance lorsqu'on met en œuvre en plusieurs étapes un programme de travaux menant à la performance en un seule fois ?

Cette rénovation est parfois appelée « rénovation BBC », ou plus souvent encore « rénovation globale ». Le terme « global » renvoie à la nécessaire approche globale qu'il faut mettre en œuvre pour atteindre la performance (**enveloppe, systèmes et interfaces**). Ce terme n'a pas été retenu car il est moins lisible que la notion de rénovation « complète et performante », qui fait référence à la fois à l'atteinte de la performance (comprenant les notions de performance énergétique mais également de préservation du bâti, de la santé et du confort des occupants) et au chemin pour l'atteindre (« complète »). Par ailleurs, il est nécessaire de mettre en

³⁴ Cf. rapport d'Effinergie (Effinergie BBC par étapes, 2018), qui esquisse une distinction entre des *travaux* « BBC-compatibles » et une *démarche* « BBC par étapes ».

œuvre une **approche globale** pour tous les parcours par étapes également, pour espérer atteindre la performance à terme.

En rénovation complète et performante, **l'attention particulière qu'il est nécessaire de prêter aux interfaces entre corps de métier** pour atteindre la performance est facilitée par l'intervention simultanée et coordonnée de l'ensemble des corps de métier.

Ce parcours s'inspire de la démarche Dorémi et utilise des combinaisons de travaux, les Solutions Techniques de Rénovation (Enertech STR, 2015), pour définir les caractéristiques des postes de travaux. Ces STR³⁵ appliquées au parc de maisons individuelles, permettent d'atteindre les objectifs énergétiques du label BBC rénovation et répondent à l'objectif de consommation visé par l'étude. Le tableau ci-dessous présente les STR associées à un système de chauffage par chaudière, PAC et poêle à bois³⁶. Chaque typologie de logement amène à choisir une STR en particulier, toutes ne sont donc pas utilisées ici. Selon les premières analyses des rénovations Dorémi, certaines STR sont effectivement plus fréquemment retenues comme les STR 6 (la plus souvent mise en œuvre), 9 et 4.

N° Solution	Isolation Int / Ext	Etanchéité air n ₅₀ (vol/h)	Résist. additionnelles [m².K/W]			U _w [W/m².K]	Ventilation
			Murs	Plancher bas	Toiture		
1	Int	3,0	6,0	4,5	10	1,1	Double Flux
2	Int	3,0	4,5	4,5	10	0,8	Double Flux
3	Int	1,0	4,5	4,5	10	1,7	Double Flux
4	Int	1,0	4,5	3,0	7,5	1,4	Double Flux
5	Ext	3,0	4,5	4,5	7,5	1,7	Double Flux
6	Ext	3,0	4,5	3,0	7,5	1,4	Double Flux
7	Ext	3,0	6,0	4,5	10	0,8	Hygro
8	Ext	1,0	4,5	3,0	7,5	1,7	Double Flux
9	Ext	1,0	3,7	3,0	7,5	1,4	Double Flux
10	Ext	1,0	4,5	3,0	7,5	1,1	Hygro

→ 1-SFH
→ 5-SFH
→ 1 et 2-TH
→ 5-TH
→ 2,3 et 4-SFH + 4-TH
→ 3-TH

Figure 52 : Tableau descriptif des STR (Enertech) et solutions retenues pour chacune des 10 typologies de l'étude. Ces associations STR-typologies sont ensuite déclinées et adaptées dans les 4 parcours en plusieurs étapes.

■ Rénovation partielle

A l'opposé, la **rénovation partielle** se limite à une juxtaposition d'un ou de quelques gestes de travaux énergétiques qui ne prennent pas en compte l'objectif de performance à terme, n'anticipe pas les interfaces et interactions entre lots de travaux actuels et futurs, ni le financement des travaux ultérieurs. C'est l'approche quasi-exclusivement mise en œuvre aujourd'hui.

Très souvent, ce type de travaux est pensé par le ménage dans une logique d'entretien ou de maintenance (remplacement de chaudière, ravalement de façade, réfection de toiture), d'amélioration fonctionnelle ou esthétique (menuiseries), et donc pas directement dans une finalité énergétique. L'approche qui consiste à **« embarquer l'énergie dans les travaux »** conduit généralement à ce type de rénovation, en misant sur **l'opportunité des dispositifs d'incitation** divers (éco-PTZ, primes CEE, MaPrimeRénov, autres aides de l'ANAH, aides locales ou régionales, ...). La performance des postes est alignée avec le seuil des aides financières actuelles et peuvent cependant ne pas présenter des performances optimales pour ce parcours (ponts thermiques structurels qui dégradent l'isolation, générateurs peu modulants, etc.).

Ce parcours se compose de **5 étapes successives de travaux unitaires** (ce qui est déjà « très ambitieux » étant donné les constats de l'enquête TREMI, voir Introduction page 26) et ne permet donc pas de réaliser l'ensemble des 6 postes de rénovation énergétique (le 6^e poste sera certainement traité mais sans amélioration énergétique, comme la réfection d'une toiture sans ajout d'isolant). Sans feuille de route, ce parcours à un risque de générer des pathologies, de mener à des difficultés techniques nécessitant des reprises des travaux précédents

³⁵ Expérience P2E (Passport Efficacité Énergétique) se base également sur les STR, sur une version légèrement dégradée (besoins à 2050 supérieur de 10% environ aux STR originelles, utilisées par Dorémi).

³⁶ L'ensemble des STR et les adaptations possibles sont présentées en Annexe 2.

(augmentant le coût) et il délaisse les aspects transversaux de la rénovation comme la gestion des ponts thermiques ou encore le traitement de l'étanchéité à l'air.

▪ **Rénovation partielle renforcée**

La **rénovation partielle renforcée** est une rénovation partielle telle que définie ci-dessus, mais pour laquelle chaque poste de travaux énergétiques atteint une performance compatible avec une rénovation de niveau BBC rénovation (résistance thermique de l'isolant ou de la menuiserie renforcée, rendement de la chaudière plus élevé...) et qui comprend les 6 postes de travaux.

Il s'agit donc simplement ici d'améliorer la pratique usuelle de rénovation partielle en relevant les critères de performance individuelle de chaque composant à un niveau dit « BBC-compatible ».

Pour autant, la feuille de route est souvent inexistante ou insuffisante, car elle n'intègre pas les contraintes techniques ou financières liées à la réalisation des travaux ultérieurs, et ne permet pas de se projeter pour atteindre une performance BBC rénovation ou équivalente à terme.

Cette pratique, poussée par certaines des incitations financières en faveur de la rénovation énergétique et par la logique des « Passeports Rénovation », s'inscrit souvent dans une approche déclarative. Comme pour la rénovation partielle, ce parcours à un risque très élevé de générer des pathologies, de mener à des difficultés techniques nécessitant des reprises des travaux précédents (augmentant le coût) et il délaisse les aspects transversaux de la rénovation comme la gestion des ponts thermiques ou encore le traitement de l'étanchéité à l'air.

▪ **Rénovation dite « semi-globale »**

La **rénovation semi-globale** est une rénovation en plusieurs étapes mettant en œuvre des ensembles de travaux énergétiques s'inscrivant dans une **feuille de route** et visant le niveau BBC rénovation ou équivalent à terme, en moyenne du parc.

Ce concept de rénovation est repris des **travaux d'Effinergie** (Effinergie BBC par étapes, 2018). L'étude menée est un retour d'expérience des programmes existants de rénovation par étapes portée par des programmes nationaux et régionaux. L'étude en question a été complétée dans le projet Rénovation B2C2 au niveau infrarégional (APR Ademe en cours). Dans le cadre de l'étude initiale d'Effinergie, le retour d'expérience sur les programmes nationaux ou régionaux de rénovation par étapes montre que le nombre d'étapes maximum ne fait pas consensus³⁷, cependant une première étape conséquente est souvent préconisée, associant des travaux coordonnés sur l'enveloppe et la ventilation.

La présente étude prend comme hypothèse un parcours en **3 ou 4 étapes maximum** avec le regroupement, lorsque c'est possible, des actions permettant de ne pas générer de pathologies (problématiques anticipées, interfaces en attente...). La première étape regroupe le plus de postes de rénovation traités, repoussant sur les étapes suivantes 1 poste par étape (étape 1 : plancher bas + murs + menuiseries + ventilation ; étape 2 : chaudière gaz ; étape 3 : combles). Si la rénovation est techniquement faisable, elle peut en revanche nécessiter un investissement supplémentaire pour reprendre des interfaces entre lots d'une étape à l'autre. Le niveau de performance des travaux (résistance thermique, dimensionnement des systèmes) est basé sur le même bouquet de travaux que la rénovation complète et performante (STR), afin de pouvoir quantifier l'impact de l'approche par étapes par rapport à la rénovation complète. Cependant, le traitement des interfaces est pénalisé dans le calcul, car considéré peu maîtrisé en raison du faible accompagnement des artisans sur le terrain au moment de l'écriture de l'étude.

³⁷ Donnée 2019. A la publication de la présente étude, l'APR B2C2 (en cours de rédaction) proposait une définition de la rénovation BBC par étapes en limitant à 3 le nombre d'étapes.

▪ Rénovation quasi-complète (RQC)

La **rénovation quasi-complète** vise la performance à terme en 2 étapes, en reportant en général un seul poste de travaux énergétique (ou exceptionnellement 2 postes si la gestion des interfaces l'impose).

Il s'agit donc d'une approche « soustractive » par rapport à la rénovation complète et performante (RCP), qui consiste à reporter dans le temps un seul poste de travaux, sous certaines conditions, selon une feuille de route précise et sur la base de préconisations techniques détaillées permettant d'anticiper le traitement des interfaces entre lots à plusieurs années d'intervalle. Les interfaces et interactions entre lots sont considérés correctement traités, même lorsque les postes de travaux concernés ne sont pas réalisés dans une même étape. Ce parcours de rénovation peut en revanche nécessiter un investissement supplémentaire (en comparaison avec la RCP) pour reprendre des interfaces entre lots pendant la deuxième étape.

La définition des parcours utilisés pour les simulations est vouée à évoluer en fonction des résultats calculés et des analyses des points sensibles.

Hypothèses prises pour la production d'eau chaude sanitaire

L'amélioration de la production d'ECS est réalisée en même temps que le remplacement des équipements de chauffage dans cette étude. Cependant, des hypothèses différentes ont été retenues selon le parcours de rénovation simulé afin de mettre en valeur leur impact :

- Les ballons neufs sont supposés sur-isolés dans tous les parcours sauf la rénovation partielle où ce point ne fait pas partie des critères des aides financières.
- Les ballons ECS électrique conservés sont sur-isolés uniquement dans les parcours de rénovation Quasi-complète et complète.
- L'installation de limiteurs de débits sur les points de puisages est prévue uniquement pour ces mêmes parcours Quasi-complet et Complet.

Cette distinction entre les parcours s'explique par :

- Une sensibilité à ces pratiques uniquement par les professionnels (chauffagistes) pour les parcours RCP et RQC (formation à la rénovation performante inspiré de la démarche Dorémi), ainsi que les ménages par leur intermédiaire.
- L'absence de critères techniques sur l'ECS dans les autres dispositifs d'accompagnement qui ont inspirés les parcours utilisés pour cette étude, dont les parcours de rénovation en 3 étapes ou plus actuellement accompagnés ;
- Un calcul réglementaire qui ne permet pas d'intégrer une réduction des débits de puisage : cette action n'est donc pas valorisée (pas d'information ni d'aide financière) et n'incite donc pas les professionnels et les ménages à les intégrer à leur projet.
- Les résultats de l'enquête TREMI qui révèle une attractivité du remplacement du chauffe-eau électrique pour les ménages (ADEME TREMI, 2018), généralement faiblement calorifugé.

Généraliser ces bonnes pratiques est un premier levier de réduction des consommations identifié par cette étude pour améliorer le bilan énergétique à terme du parcours semi-global.

Une notion de complexité est associée aux 5 parcours présentés ici. Elle sous-entend une complexité pour atteindre les 4 critères définissant la rénovation performante : saine, préservant le bâti, confortable et visant une consommation BBC rénovation ou équivalente, en moyenne nationale. Elle est donc à relier à la difficulté de traitement des interfaces (ponts thermiques limités, continuité de l'isolation et continuité de la limite d'étanchéité à l'air) et aux études techniques et/ou financières à réaliser à chaque étape de travaux. Les rénovations par étape augmentent le nombre d'interfaces à traiter, notamment lorsqu'il n'existe pas de feuille de route (cas des parcours de rénovation Partielle et Partielle renforcée), et par conséquent augmente la complexité du parcours de rénovation pour obtenir une rénovation performante.

La Figure 53 synthétise les caractéristiques retenues pour chaque parcours de rénovation et fait référence aux études qui ont inspiré leur définition. Seule la RQC est un parcours défini pour les besoins de l'étude.

- Partielle - Rénovation partielle	- Partielle + - Rénovation partielle renforcées	- SG - Rénovation Semi-Globale	- RQC - Rénovation Quasi- Complète	- RCP - Rénovation Complète et performante
- 5 étapes - 5 postes - Gestes de travaux ✗ Interfaces - Niveau aides financières	- 6 étapes - 6 postes - Gestes de travaux ✗ Interfaces - STR	- 3/4 étapes - 6 postes - Feuille de route ✗ Interfaces - STR	- 2 étapes - 6 postes - Feuille de route ✓ Interfaces - STR - ECS +	- 1 étape - 6 postes - Globale ✓ Interfaces - STR - ECS +

Figure 53 : Comparaison des 5 parcours de rénovation étudiés.

La démarche **EnergieSprong** (ES), déployée aux Pays-Bas, fait également partie du paysage de la rénovation énergétique des maisons individuelles en France. Elle reprend les principes du parcours RCP (une étape de travaux, le travail sur la consommation d'ECS, la qualité de l'air...) et **va au-delà** (bilan à énergie positive tous usages, travaux en seulement 10 jours sur site, garantie de performance notamment).

Les 10 typologies étudiées

10 des 20 typologies du rapport (TABULA Episcopo, 2015) ont servi de base pour cette étude, à savoir les 5 typologies de maisons individuelles « isolées » au sens de « pavillonnaires » (1-SFH à 5-SFH) et 5 maisons individuelles mitoyennes (1-TH à 5-TH) datant **d'avant 1982**.

Au-delà de cette date, les rénovations ne sont pas prioritaires en terme énergétique, car ayant déjà fait l'objet d'une isolation par réglementation thermique. Ces 10 typologies représentent **62% du parc** des maisons individuelles d'après les statistiques de TABULA, soit **10 millions de logements environ**.



Figure 54 : Typologies des maisons individuelles étudiées (photos : rapport Tabula (TABULA Episcopo, 2015))

Pour chacune de ces 10 typologies, les 5 parcours présentés précédemment sont précisés en tenant compte de l'état initial de chaque maison (contraintes architecturales et techniques) et d'un ordonnancement d'étapes probable et réaliste au vu de ces contraintes et des pratiques actuelles. **Il est certain que d'autres successions de travaux seraient applicables aux typologies, avec d'autres sources d'énergies ou d'autres matériaux.** Il s'agit ici de définir une base illustrant la diversité des parcours envisageables et traitant le plus d'interfaces et interactions différentes.

Exemple : la typologie 1-SFH est une maison individuelle en pierre non isolée thermiquement (uniquement 2 cm dans les rampants de combles perdus) et munie de fenêtres bois en simple vitrage. Plusieurs poêles fiouls chauffent les différentes pièces occupées (rez-de-chaussée et étage) et un chauffe-eau électrique assure la

production d'ECS. Le tableau ci-dessous présente les choix techniques retenus pour les 5 parcours de rénovation, ainsi que leur ordonnancement.

Tableau 1 : Tableau de synthèse des 5 parcours de rénovation pour la typologie 1-SFH

Etapes	1	2	3	4	5	6
Partielle	Chaudière bois	Menuiseries double vitrage	Plancher bas	ITI	Ventilation hygroréglable	Rampants
Partielle +	Chaudière bois	Menuiseries triple vitrage	Plancher bas	ITI	Ventilation double flux	Rampants
SG	Chaudière bois + Menuiseries extérieures triple vitrage + ventilation double flux	Plancher bas	ITI	Rampants		
RQC	poêle à granulés + Menuiseries extérieures triple vitrage + ventilation double flux + Plancher bas + ITI	Rampants				
RCP	STR 2 : ITI, isolation des rampants, isolation du plancher bas en sous-face, remplacement des menuiseries extérieures en triple vitrage, installation d'une ventilation double-flux, installation d'un poêle à granulés					

Légende : **en vert** : les équipements spécifiques aux rénovation RQC et RCP (ici : le poêle à granulés pour assurer le chauffage de l'ensemble du logement) / **en jaune** : les solutions avec une niveau de performance aligné sur les dispositifs d'aides à la rénovation, performance plus faible que les STR appliquées aux autres parcours / **en rouge** : les équipements spécifiques à la rénovation Partielle (ici : menuiseries double vitrage et ventilation hygroréglable) / **barré** : poste de travaux non traité dans le parcours (ici les rampants pour la rénovation Partielle).

Le poêle à granulés ne peut pas être mis en place dans les premières étapes des parcours SG, Partielle + et Partielle car la puissance et le mode de diffusion de chaleur de la solution n'est pas adapté au niveau d'isolation du logement (trop peu isolé).

Les énergies

Les énergies retenues sont issues de l'étude TABULA (TABULA Episcopo, 2015) et recoupées avec les pratiques majoritaires en rénovation BBC telles que recensées par Effinergie dans le cadre de l'Observatoire BBC (Effinergie Observatoire BBC réno, 2019), à savoir :

- la majorité (61%) des projets initialement chauffés au fioul changent d'énergie, le plus souvent pour un poêle à bois (9 sur 19),
- la majorité (72%) des logements chauffés à l'électricité restent à l'électricité,
- la majorité (94%) des logements chauffés au gaz restent sur cette énergie.

Ainsi, pour cette étude, un seul projet conserve son énergie fioul (2-TH) alors que c'était l'énergie majoritaire à l'état initial (6/10) et 3 projets passent au bois-énergie.

	CHAUFFAGE (initial → rénové)	ECS (initial → rénové)
1-SFH	Poêles fioul Poêles fioul → Chaudière bois / Poêle Bois (pour RQP et RCP)	CE électrique → CE Électrique surisolé
2-SFH	Chaudière fioul → Chaudière Gaz	Chaudière fioul → Chaudière Gaz
3-SFH	Chaudière fioul → PAC air-eau	CE électrique → PAC air-eau
4-SFH	Chaudière fioul → Chaudière Bois	CE électrique → Chaudière Bois
5-SFH	Chaudière fioul → PAC air-eau	CE électrique → PAC air-eau
1-TH	Radiateurs électriques → Poêle Bois + radiateur. élec.	CE électrique → CE Électrique surisolé
2-TH	Chaudière fioul → Chaudière Fioul	CE électrique → Chaudière Fioul
3-TH	Chaudière gaz → Chaudière Gaz	CE électrique → Chaudière Gaz
4-TH	Chaudière gaz → Chaudière Gaz	Chaudière gaz → Chaudière Gaz
5-TH	Chaudière gaz → Chaudière Gaz	Chaudière gaz → Chaudière Gaz

Figure 55 : Énergies retenues pour les 10 typologies et énergies de l'état initial.

En moyenne nationale, ces hypothèses donnent un avantage au bois (chaudière et poêle) et limitent l'implantation du gaz en faveur des PAC. L'Observatoire BBC d'Effinergie révèle cependant une préférence pour le gaz dans les maisons individuelles rénovées (59% de logements au gaz sur 295 maisons analysées). A l'inverse,

les PAC représentent moins de 10% sur les maisons saisies dans cet Observatoire BBC. Cette différence est à relier aux typologies retenues qui limite à un cas l'étendue des variantes observable sur le territoire. Ainsi, la typologie 1-SFH, avec le plus fort taux de représentativité, est rénové avec un poêle à granulés en l'absence d'émetteurs à eau chaude. Si cette typologie est à l'état initial chauffé par une chaudière gaz ou fioul, l'énergie après travaux aurait pu être une PAC ou une chaudière gaz.

REPRÉSENTATIVITÉ DES ÉNERGIES APRÈS TRAVAUX DE RÉNOVATION

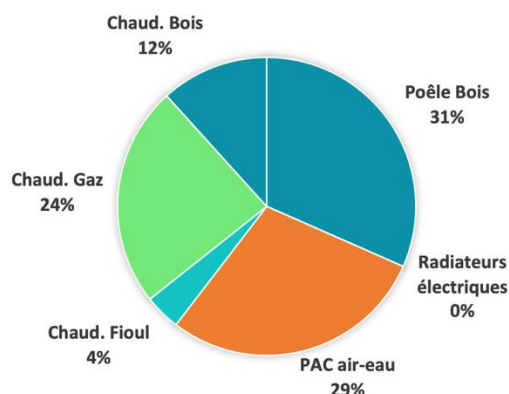


Figure 56 : Répartition des énergies de chauffage simulées pour les 10 typologies, en moyenne nationale, pour le parcours en une seule étape. Taux de représentativité des typologies selon les données Tabula.

Les hypothèses retenues pour les systèmes sont présentées en Annexe 2 page 151.

3.2. Les principaux résultats

A l'échelle du parc de maisons <1982³⁸

Avant d'entrer dans les détails des résultats par parcours, il semble intéressant de regarder la consommation moyenne à terme pour les différents parcours de rénovation car c'est à l'échelle du parc que l'objectif de 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an} est calculé.

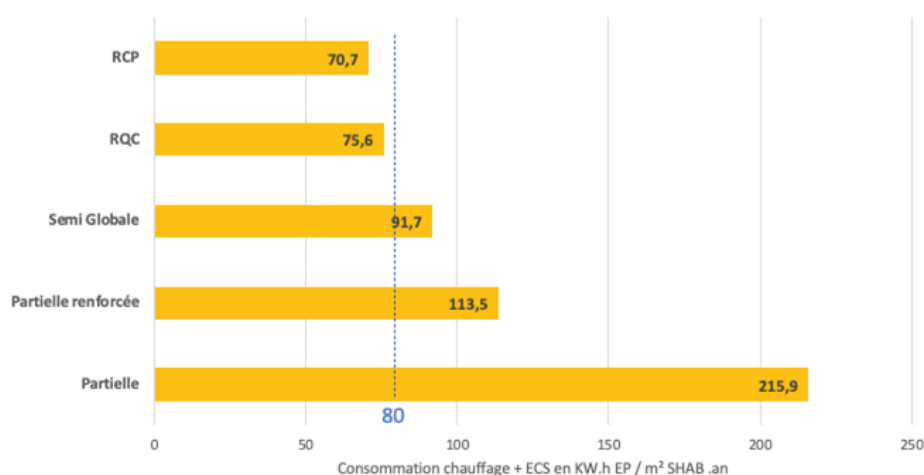


Figure 57 : Consommation moyenne à terme des 5 parcours de rénovation. Moyenne du parc construit avant 1982. Consommation de chauffage et production d'ECS, en énergie primaire, rapportées à la surface habitable.

³⁸ Parc d'avant 1982 = moyenne pondérée des 10 typologies étudiées, pour chaque parcours de rénovation, selon leur représentativité en nombre de logement au niveau national.

Ce graphique permet **d'écarter les rénovations partielles, même renforcées, du spectre des parcours permettant d'atteindre l'objectif de 80 kWh/m².an à terme** : les consommations atteintes en fin de parcours sont trop éloignées de l'objectif. Pourtant, l'étude a retenu des hypothèses ambitieuses, plus performantes que celles actuellement mise en œuvre, en considérant que ces parcours comptabilisent 5 ou 6 postes de travaux, en étapes distinctes, alors que ce n'est pas actuellement ce qui est constaté dans les pratiques actuelles (cf. encadré Tremi page 26).

Seuls deux parcours permettent d'aller au-delà de l'objectif national BBC rénovation, en moyenne sur le parc de maisons individuelles : la Rénovation Complète et Performante (RCP) et la Rénovation Quasi-Complète (RQC). Pour ces deux parcours, l'accompagnement des artisans et du ménage (notamment financier) font partie de la réussite des projets. La marge de 10% entre l'objectif de 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an} et les résultats calculés pour ces deux parcours (théorique) laisse une place pour les projets aux contraintes architecturales non prises en compte dans cette étude (maisons en secteurs sauvegardés qui modifient les postes de travaux et limitent la performance par exemple). Cette marge permet également de laisser du temps nécessaire pour faire monter en puissance ces rénovations complètes, pour faire monter en compétences les professionnels.

A titre d'illustration, ces résultats sont exprimés en énergie finale sur le graphique ci-dessous et comparés à la valeur de 60 kWh_{EF}/m².an qui a été proposée comme redéfinition du niveau BBC rénovation.

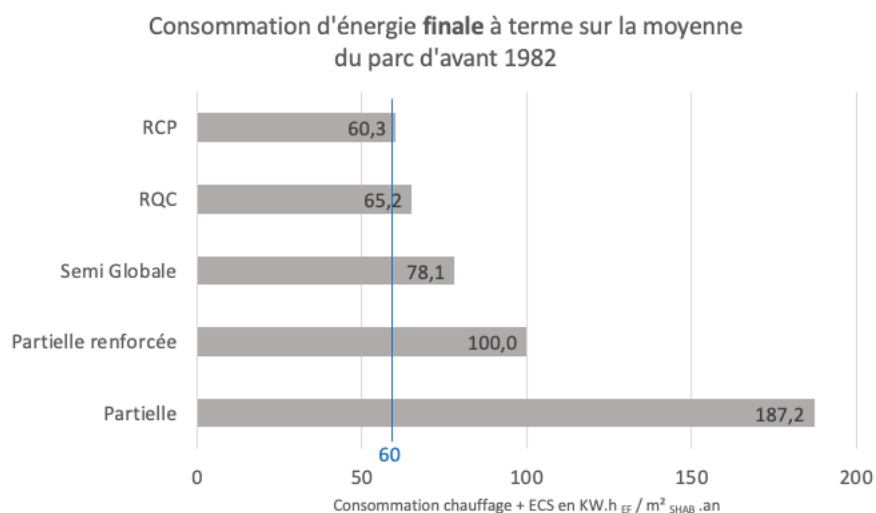


Figure 58 : Consommation moyenne à terme des 5 parcours de rénovation et consommation du parc actuel. Moyenne du parc construit avant 1982. Consommation de chauffage et production d'ECS, en énergie **finale**, rapportées à la surface habitable.

Les enseignements de l'étude sont robustes à cette proposition de modification. Cependant, ce dernier graphique cache une grande disparité entre l'énergie électrique, très favorisée, les combustibles fossiles, non affectés par le passage en énergie finale, et l'énergie bois fortement défavorisée par le passage en énergie finale (ne bénéficie plus du coefficient d'énergie primaire de 0,6 du label BBC rénovation).

En première conclusion, et afin d'assurer une consommation moyenne nationale de 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an}, les résultats incitent à développer l'offre de **rénovation complète et performante (RCP)** et **écarter l'accompagnement des rénovations partielles**. La rénovation performante par étapes pourra s'intégrer dans le paysage de la rénovation en cas de contraintes techniques, psychologique (repandre des travaux récents) et/ou architecturales fortes.

Une grande dispersion des résultats

Les valeurs moyennes à l'échelle du parc masquent une grande dispersion des résultats : certaines RCP appliquées à des typologies dépassent l'objectif de 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (cas d'impossibilité de rénover un poste, voir paragraphe dédié RCP), mais, à l'inverse, quelques rénovations Semi-Globales ont des consommations à terme inférieures à cet objectif.

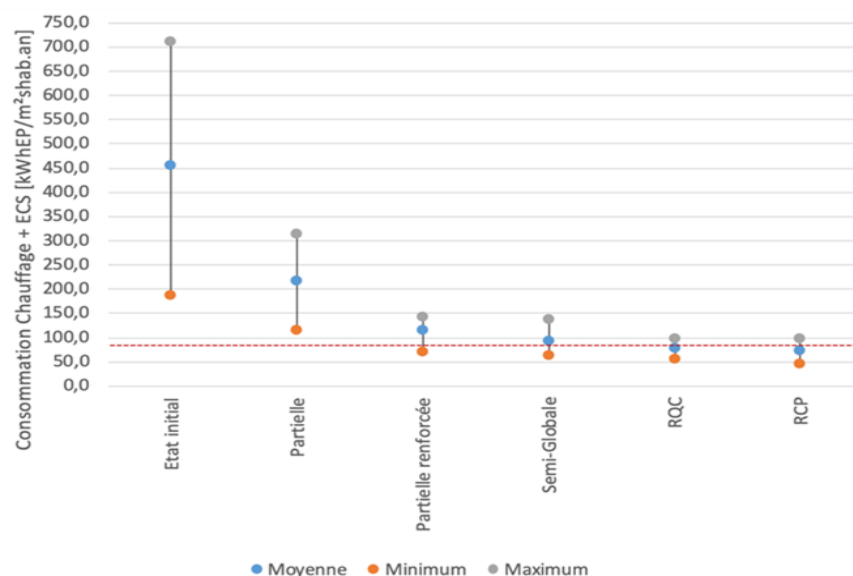


Figure 59 : Consommations minimales, maximales et moyennes pour les productions de chauffage et d'ECS, à l'échelle du parc, obtenues par calcul pour les 5 parcours de rénovation.

Ses résultats sont détaillés ensuite, parcours par parcours, pour expliciter l'origine de cette dispersion. Les origines proviennent pour certains des consommations avant travaux plus faibles que pour les constructions post 1975, car faiblement isolées. C'est le cas des typologie 5-TH et 5-SFH (cf. Figure 60), ou de contraintes de rénovation propre à chaque typologie mais aussi en fonction des systèmes utilisés (bois-énergie, PAC).

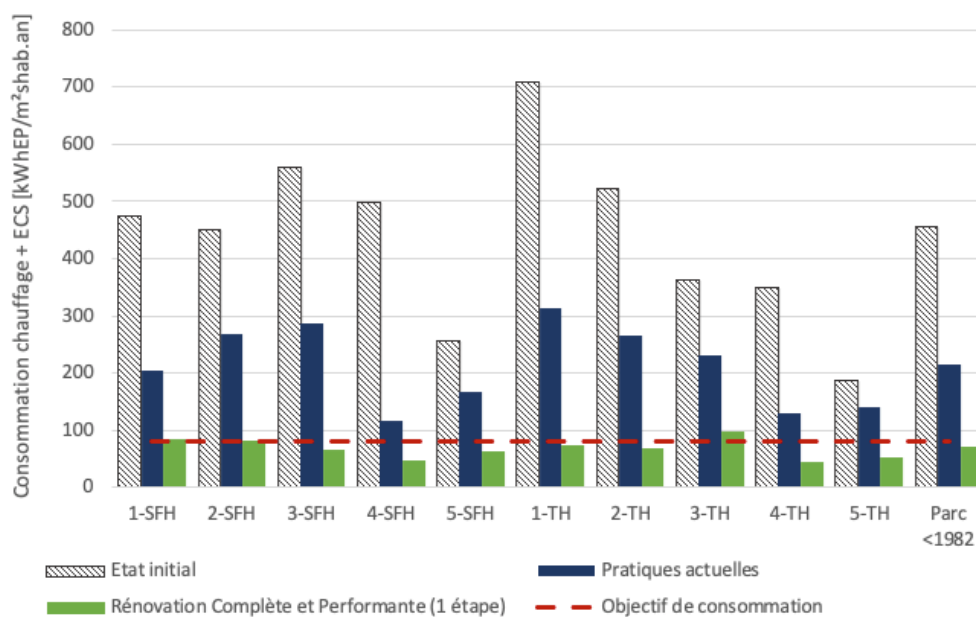


Figure 60 : Comparaison des consommations de chauffage et d'ECS avant et après rénovation pour les parcours rénovation Partielle et RCP.

Les consommations de l'état initial ne sont pas reportées sur les graphiques suivants par soucis de lisibilité du graphique : les consommations élevées de l'état initial ne permettraient pas de distinguer les cinq parcours de rénovation entre eux. L'objectif de consommation correspond à 80kWh_{EP}/m²_{SRT}.an.

La perte de performance entre les 5 parcours

Si l'analyse à l'échelle du parc est intéressante pour définir les parcours à privilégier, l'étude des résultats pour chaque typologie de logement permet de comparer les consommations des différents parcours et de définir (ou tenter de définir) un lien entre les postes reportés et les écarts de consommation constatés.

Figure 61 présente l'ensemble des résultats de l'étude. En toute logique, la consommation du parcours RCP est toujours la plus faible (une seule étape, STR pour caractériser les postes de travaux, interfaces et interactions bien traitées). Les hypothèses de calcul retenues conduisent toujours à une consommation croissante entre les 5 parcours, dans l'ordre suivant : RCP, RQC, SG, Partielle + et Partielle

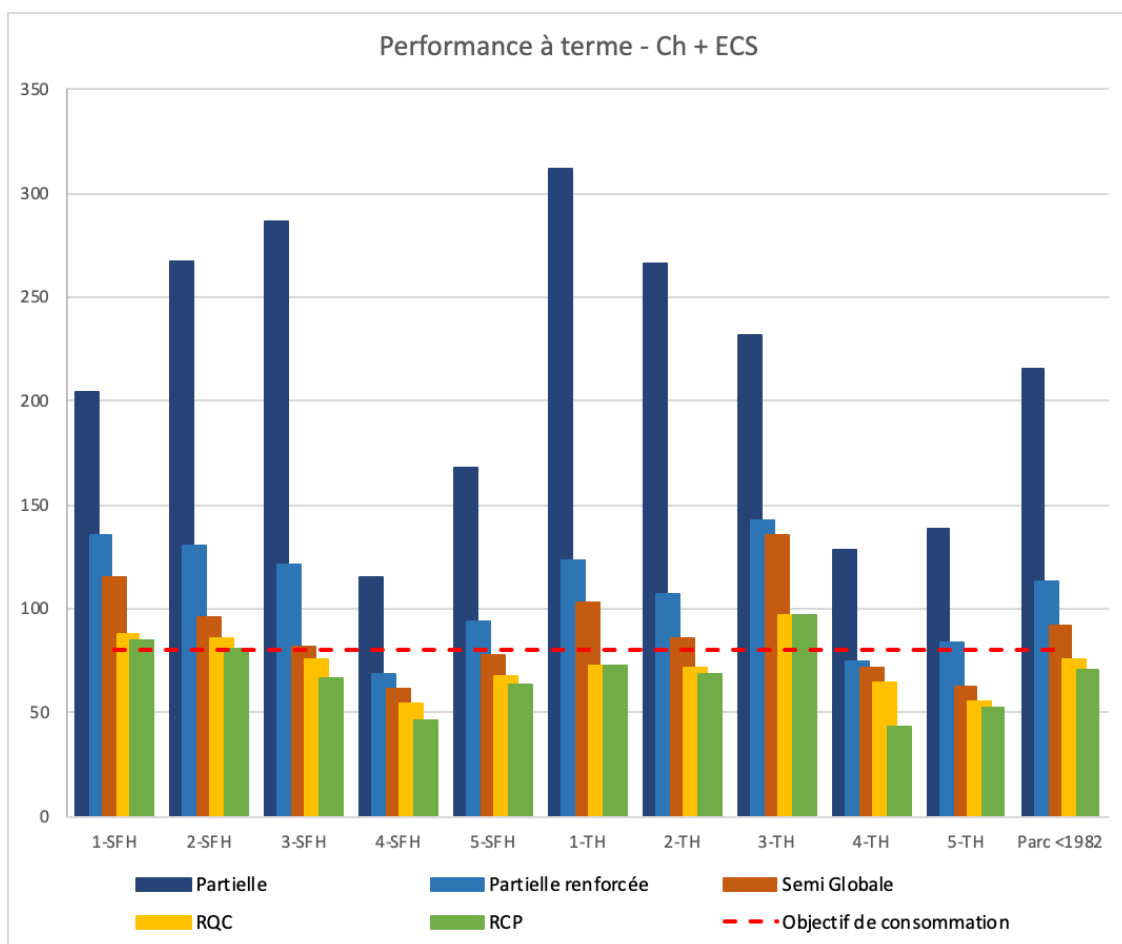


Figure 61 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) pour chaque parcours de rénovation des 10 typologies. Objectif de consommation : 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an} pour le chauffage et la production d'ECS.

Chaque parcours mène à des valeurs de consommation très variables selon les typologies et les hypothèses retenues pour les rénovations :

- les améliorations des équipements au fil des années et les premières réglementations de 1974 permettent d'améliorer le bilan des rénovations partielles pour les typologies d'après 1974 (4-SFH, 5-SFH, 4-TH et 5-TH) grâce à un état initial plus faible.
- des solutions de chauffage performantes comme le bois-énergie³⁹ et la PAC retenus pour la production de chauffage et d'ECS, participent fortement aux bons résultats des typologies 4-SFH et 5-SFH pour tous les parcours.
- la très bonne compacité des typologies 4-TH et 5-TH explique leur performance sur l'ensemble des parcours de rénovation.

³⁹ Rappel : coefficient d'énergie primaire retenu pour le bois = 0,6 conformément aux valeurs de la démarche BBC rénovation.

L'écart de consommation entre les parcours dépend également des typologies et des postes reportés. Cependant, en comparaison avec le parcours RCP (vert), le **report d'un seul poste de travaux (RQC) augmente peu les consommations pour la majorité des typologies. L'écart se creuse bien souvent dès que 2 ou 3 postes de travaux sont reportés.** L'origine de ces écarts est présentée dans les paragraphes suivants, parcours par parcours.

Enfin, la variation de consommation de chaque parcours selon les typologies rappelle qu'il est nécessaire de **maintenir les niveaux de performance utilisés pour les calculs (STR)** sur l'ensemble du parc construit avant 1982. Effectivement, la variation de compacité des maisons individuelles (qui ne se résument pas à 10 typologies à l'échelle nationale, malgré leur représentativité), ou des contraintes architecturales (impossibilité d'isoler le plancher bas) peuvent rendre plus difficile l'atteinte des 80 kWh_{EP}/m²_{hab.an.}

NB : la partie 4 de cette étude propose quelques variantes pour les parcours de rénovations semi-globales avec intégrations d'énergie renouvelable sur les 10 typologies.

L'importance de la production d'eau chaude sanitaire

Le choix des systèmes est également très impactant dans le bilan énergétique des rénovations, notamment pour les logements initialement chauffés par solutions décentralisées (pièce par pièce avec des radiateurs électriques ou des poêles fioul). Ces équipements sont remplacés par un poêle bois placé au centre du logement pour éviter le coût d'installation d'un réseau de radiateurs hydrauliques (1-SFH et 1-TH). La production d'eau chaude sanitaire associée est le ballon électrique. Bien que fortement calorifugé, le bilan énergétique total (chauffage + ECS) est pénalisé par une production ECS prédominante (voir Figure 62).

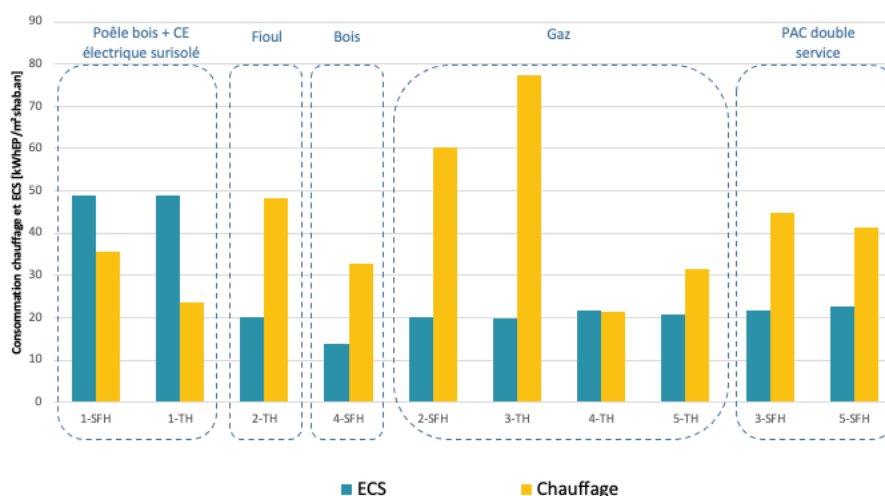


Figure 62 : Consommation en énergie primaire de chauffage et d'ECS pour le parcours RCP, appliqué aux 10 typologies. Regroupement des typologies par équipement de production de chaleur.

Des solutions de production d'ECS avec source d'énergie renouvelable sont étudiées dans la partie 4 de la présente étude.

La Rénovation Complète et Performante (RCP)

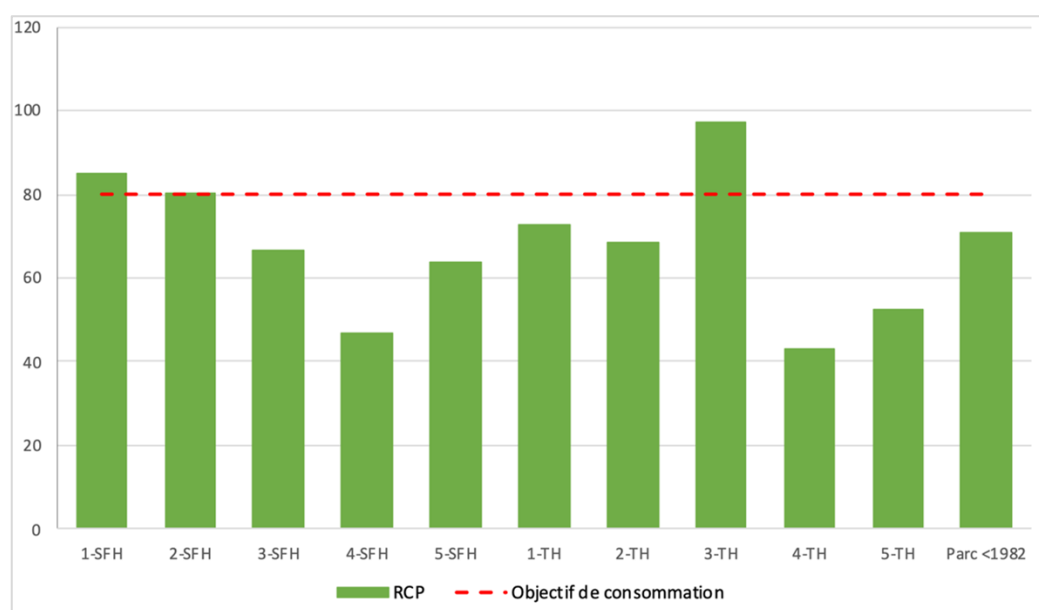


Figure 63 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) pour le parcours RCP et pour les 10 typologies.

Valeur minimale : 43 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (4-TH)
 Valeur maximale : 97 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (3-TH)
 Moyenne sur le parc <1982 : 71 kWh_{EP}/m²_{shab.an}

La rénovation complète et performante apparaît comme le parcours de rénovation permettant de passer sous la barre-objectif des 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an}. L'écart entre la consommation minimale et maximale sur les 10 typologies est certes élevé (coefficient 2,3) mais il est le reflet des possibilités de rénovation offertes par le parc de maisons individuelles. L'enjeu pour le climat est bien d'atteindre le **niveau BBC rénovation ou équivalent en moyenne nationale, et non pour chaque logement**, ce qui laisse un peu de souplesse dans la déclinaison de cet objectif (voir sur ce sujet le « Focus : la logique des bouquets de travaux face aux écarts de performance à terme »).

La typologie 4-TH est avantagée par sa forme très compacte car de petite surface, mitoyenne pour un coefficient de forme le plus bas des 10 cas étudiés (coefficient de forme $C_f = 0,42 \text{ m}^{-1}$, cf. Annexe 3). Cette configuration avantage toutes les stratégies de rénovation, y compris la RCP. La STR 6⁴⁰ a été appliquée sur ce logement muni d'une toiture terrasse. Le traitement conjoint de l'ITE et de l'isolation de la toiture terrasse permet de traiter le pont thermique et participe à la réduction des consommations de ce logement, les plus faibles de l'étude.

A l'inverse, la typologie 3-TH est peu compacte, car mitoyenne sur le rez-de-chaussée uniquement, et le plancher bas ne peut pas être isolé car sur terre-plein. Ce cas multiplie les contraintes et illustre que lorsqu'un poste de rénovation ne peut pas être réalisé, la consommation à terme en est fortement pénalisée, malgré les efforts menés par ailleurs⁴¹, comme une étanchéité de 1 vol/h et l'isolation de façade prolongée jusqu'aux fondations. Cette adaptation aurait également pu être réalisée en cas d'ITI (voir schémas en

⁴⁰ ITE, Toiture terrasse isolée par l'extérieur, n50 = 3 vol/h, menuiseries double vitrage, isolation du plancher bas en plafond de sous-sol, chaudière gaz modulante double service.

⁴¹ L'absence d'isolation du plancher bas pour les logements construits sur terre-plein impacte la consommation du logement mais ces cas ont été pris en compte pour la définition des STR et le bilan national de 50kWh/m².an pour les consommations de chauffage. Une isolation périphérique est préconisée, ainsi qu'un renforcement de l'isolation des murs de 1 m².K/W.

Annexe 2 - Hypothèses de calcul pour exemples d'isolations périphériques en ITE et en ITI).

La RCP reste la stratégie qui permet d'abaisser le plus les consommations des logements. Leurs consommations atteignent $80\text{kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2.\text{an}$ ou moins dans la grande majorité des cas, si tous les postes sont réalisés, y compris isolation du plancher bas et l'amélioration du poste ECS. La réalité est plus complexe et les possibilités de rénovation également : la compacité des logements peut pénaliser ou avantager des rénovations et la possibilité ou non d'isolation du plancher bas est très impactante sur le bilan final.

Globalement, la consommation moyenne du parc rénové en parcours RCP, intégrant donc les 10 typologies et leurs possibilités de rénovation, passe sous le seuil des $80\text{kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2.\text{an}$ ce qui correspond à l'objectif national.

La Rénovation Quasi-Complète (RQC)

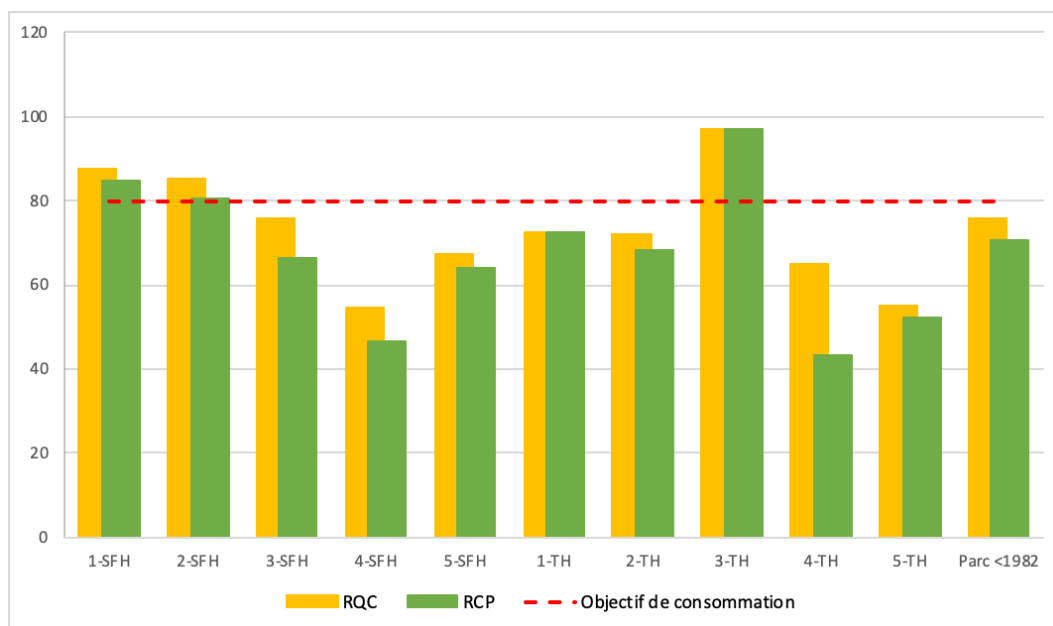


Figure 64 : Consommation d'énergie primaire (chauffage + ECS) pour les parcours RQC et RCP.

Valeur minimale : 54,5 kWhEP/m².shab.an (4-SFH)
 Valeur maximale : 97,2 kWhEP/m².shab.an (**3-TH**)
 Moyenne sur le parc <1982 : 75,6 kWhEP/m².shab.an

Le graphique ci-dessus montre que les parcours RQC permettent de maintenir les consommations sous l'objectif de 80 kWhEP/m².an pour la majorité des typologies et également à l'échelle du parc. Les typologies qui dépassent cette cible en RQC la dépassaient déjà pour la RCP (voir les raisons au paragraphe précédent). Cependant, la réussite de ce parcours (faible complexité et absence de pathologie) est conditionnée au bon choix du poste reporté, voir ci-après.

Lors d'une rénovation quasi-complète, le ménage choisit une RCP à l'exception d'un lot qu'elle repousse de quelques années, soit parce que ce poste a été traité récemment (menuiseries extérieures), soit pour des contraintes organisationnelles (isolation des façades impactant l'aménagement intérieur / extérieur), soit pour des raisons financières. Dans tous les cas, la réalisation de ce dernier lot est anticipée lors de la première étape (par exemple : anticipation des raccordements de membranes d'étanchéité à l'air, cadres de menuiseries permettant d'accueillir une isolation ultérieure, ...)

Cela sous-entend que les professionnels sont formés à cette démarche d'anticipation, outillés pour faire les bons choix techniques, et de le faire savoir aux professionnels qui interviendront plus tard.

Cependant, ces anticipations ne permettent pas toujours d'atteindre le même niveau de besoins de chauffage qu'une RCP (voir Figure 65), car les interfaces restent difficiles à traiter dans certains cas :

- Les objectifs d'étanchéité à l'air des STR ne sont pas toujours atteints : difficulté de réalisation de l'interface malgré les meilleures pratiques pouvant être mises en œuvre (voir exemples d'interfaces en Partie 2 page 47) ;
- Les fuites d'air sur des travaux réalisés dans la première phase ne peuvent pas être améliorées en fin de parcours (pas de test d'étanchéité à l'air possible en fin de 1^{ère} phase, dans l'essentiel des cas) ;
- Les ponts thermiques ne peuvent pas toujours être traités de manière optimale lorsque certains travaux sont dissociés, voir analyse ci-dessous.

Les plus grands écarts de besoins de chauffage sont observés lorsque les postes menuiseries extérieures et ITE ou ITI sont réalisés séparément (3-SFH, 4-SFH, 2-TH et 4-TH) : les retours d'isolant en allège des fenêtres ne sont

pas toujours réalisables et l'étanchéité à l'air de la rénovation est moins performante (estimée ici à $n_{50}=3,6$ vol/h contre 3 vol/h visé en STR). Le report de l'ITI, de l'ITE ou du remplacement des menuiseries peut augmenter les besoins de chauffage de +15% à +100% (voir Figure 65). La typologie 4-TH étant très compacte et mitoyenne, la difficulté de traitement pour l'interface murs-menuiseries est très impactante sur les besoins de chauffage.

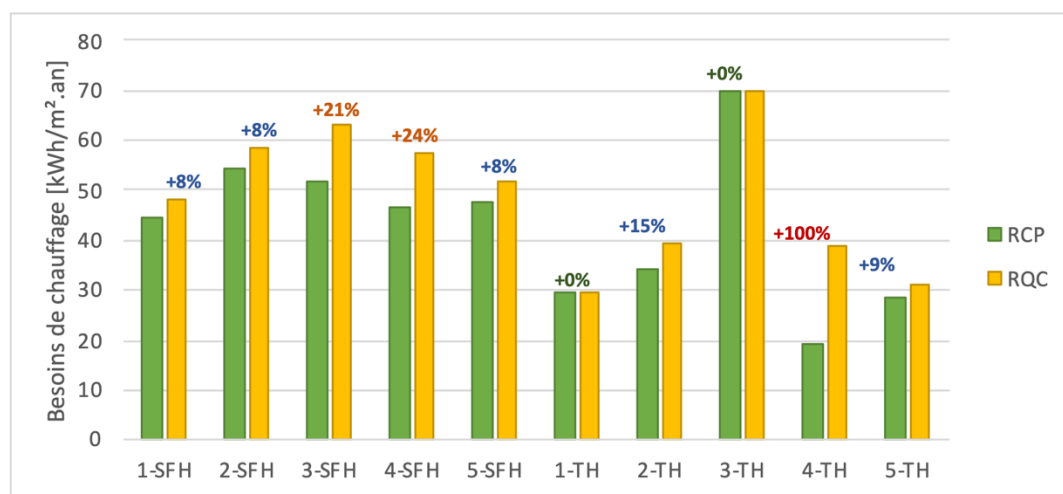


Figure 65 : Comparaison des besoins de chauffage pour les parcours RCP et RQC

A l'inverse, certains postes reportés en 2nde étape n'impactent pas du tout les consommations en fin de parcours. C'est le cas de l'isolation des planchers bas sur cave ou local non chauffé (1-TH) ou du remplacement de la chaudière (3-TH). Dans ces deux cas, les objectifs d'étanchéité à l'air sont atteints en RQC et les ponts thermiques sont identiques à ceux du parcours RCP.

En cas de report de l'isolation des toitures à une 2nde étape, les pertes de performances sont moins impactantes : de l'ordre de 8% sur les besoins de chauffage et 5% sur les consommations totales (chauffage et ECS). Les interfaces avec ce poste de travaux sont supposées bien anticipées, limitant ainsi les ponts thermiques et les fuites d'air, quelle que soit la technique d'isolation des toitures (Sarking pour 2 et 5 SFH, rampants pour 1-SFH et combles perdus pour 5-TH).

Le report de la ventilation en 2nde étape n'a pas été étudié car aucune typologie de l'étude n'était équipée d'un système de renouvellement d'air à l'état initial. Or, la ventilation étant indispensable pour assurer la qualité d'air d'un logement et préserver le bâti, ce poste ne peut pas être reporté sans générer de désordres et pathologies.

Selon la typologie de la maison et le poste de travaux reporté, la RQC peut être un parcours de rénovation performante ou s'en écarter fortement, comme l'illustrent ici les calculs en cas de dissociation de l'isolation des façades (ITI et ITE) et des menuiseries sur 2 étapes distinctes. D'autres interfaces peuvent être plus ou moins problématiques à dissocier dans certaines configurations de parois. Dans tous les cas, l'atteinte des objectifs de performance en RQC impose les mêmes exigences et la même rigueur dans la conception et la mise en œuvre que pour la RCP (bonne coordination des travaux, entreprises formées, ...), et même plus encore compte tenu de l'anticipation que représente le report d'une étape.

La rénovation semi-globale

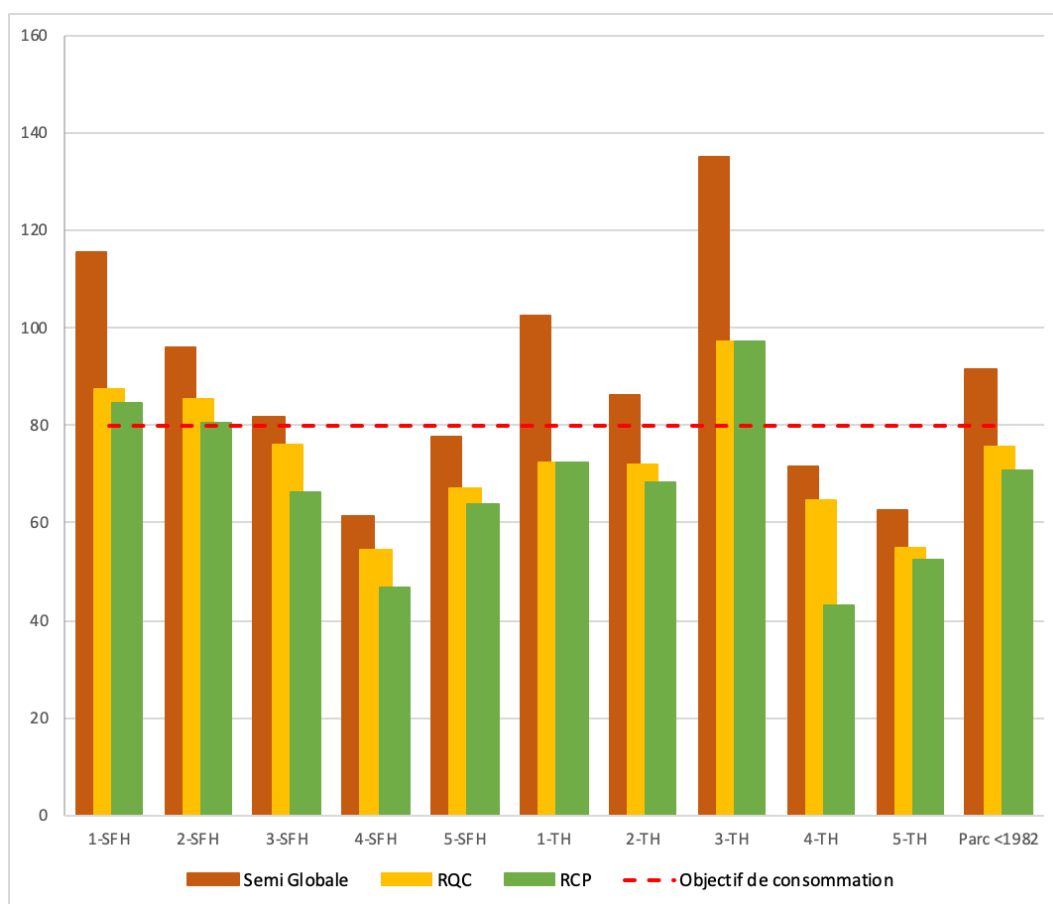


Figure 66 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) des 10 typologies pour les parcours RCP, RQC et SG.

Valeur minimale : 61,5 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (4-SFH)
 Valeur maximale : 135 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (3-TH)
 Moyenne sur le parc <1982 : 91,7 kWh_{EP}/m²_{shab.an}

Les rénovations semi-globales calculées ici rassemblent au maximum 4 étapes, privilégiant les travaux mis en avant par les ménages dans diverses études, dont TREMI (ADEME TREMI, 2018), puis en ajoutant des postes limitant les pathologies sur le bâti ou l'inconfort pour les occupants. Par exemple, la ventilation est proposée avant le remplacement des menuiseries et l'isolation des murs.

Dans tous les cas, un regroupement significatif de travaux est proposé en première étape afin d'abaisser fortement les besoins de chauffage et permettant la mise en œuvre d'un système de chauffage qui sera adapté aux déperditions en fin de parcours (cf. partie 4).

Ainsi, pour des niveaux de performance équivalents par poste, **la séparation des travaux en 3 à 4 étapes augmente de 30% en moyenne les consommations des logements rénovés** par rapport à la RCP (de +20% à +43% selon les cas), et 20% par rapport à la RQC, chauffage et productions d'ECS.

A l'échelle du parc, la consommation totale (chauffage + ECS) dépasse le seuil des 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an}, et ce de façon significative puisque la moyenne monte à 92 kWh_{EP}/m²_{shab.an}, soit un dépassement de +15% de l'objectif BBC rénovation.

Le graphique Figure 66 fait ainsi apparaître des niveaux de consommation inférieurs à la cible pour 4-SFH, 5-SFH, 4-TH et 5-TH. Pour 4-SFH et 4-TH, les critères avantageux présentés précédemment sont toujours applicables ici : bois-énergie dans le bilan énergie primaire pour la première, compacité avec des solutions d'isolation par l'extérieur pour la seconde. 5-TH bénéficie également d'une bonne compacité avec les façades alignées entre

tous les logements mitoyens. Pour 5-SFH, le besoin de chauffage après rénovation semi-globale est dans la moyenne des 10 typologies et c'est la PAC double service qui lui permet de rester sous $80 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{\text{shab.an}}$.

Au-delà de ces quelques cas favorables, la différence principale avec la RCP et la RQC tient au fait que **les interfaces sont considérées moins bien traitées** : les pertes par infiltration et les ponts thermiques augmentent donc pour tous les postes dans ce parcours. Différents facteurs conduisent à ce constat :

- Un nombre d'interfaces plus nombreuses qu'il faut gérer à des années d'intervalle ;
- L'absence de préconisations et d'outils mis à disposition des professionnels pour les traiter convenablement, notamment en anticipant et en assurant la traçabilité des choix réalisés.

C'est en cela, par exemple, que le report de l'isolation des toitures (sarking et combles notamment) est plus pénalisant dans ce parcours qu'en RQC.

Sur le poste ECS, les pratiques courantes en rénovation semi-globale (absence de surisolation des ballons électriques et absence de limiteurs de débits, voir paragraphe 3.1) contribuent également à creuser l'écart avec les mesures prises en compte dans la RQC et la RCP (consommations primaires d'ECS supérieures de 30% dans le parcours Semi-Globale). Cependant, **l'écart de consommation pour le chauffage seul atteint 27% entre SG et RCP** : les hypothèses sur l'ECS sont un levier d'économies à activer pour atteindre les objectifs de consommation en 3 étapes, mais ne résolvent pas tout le problème (interfaces à traiter pour réduire ponts thermiques et améliorer l'étanchéité à l'air).

Enfin, il est important de noter que si la mise en œuvre d'une RQC, à savoir l'ajout d'une étape au parcours RCP, augmente faiblement les consommations du projet (voir paragraphe RCP), **l'ajout d'une troisième voire d'une quatrième étape ne devient plus du tout négligeable**. Toutefois, le nombre d'étapes total (3 ou 4) n'est pas le déterminant pour atteindre la cible de $80 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{\text{shab.an}}$ en rénovation semi-globale, c'est plutôt le choix des postes reportés qui est prépondérant : les lots pouvant être indépendants sont à privilégier, comme l'isolation des planchers bas sur cave ou encore le remplacement de l'équipement de production de chauffage.

En l'état, la rénovation semi-globale ne permet pas d'atteindre les objectifs de performance requis pour la rénovation du parc d'avant 1982. La réalisation des travaux en 3 ou 4 étapes multiplie de façon exponentielle la difficulté des interfaces à traiter, ce qui dégrade la performance de l'enveloppe. **Limiter à 3 le nombre d'étapes de ce parcours semble nécessaire**. Par ailleurs d'autres inconvénients d'ordre pathologique (cf. partie 2), économiques et financiers (cf. partie 5), et également humains (désagrément de vivre plusieurs fois dans les travaux) s'ajoutent à cette approche énergétique.

La rénovation partielle « renforcée »

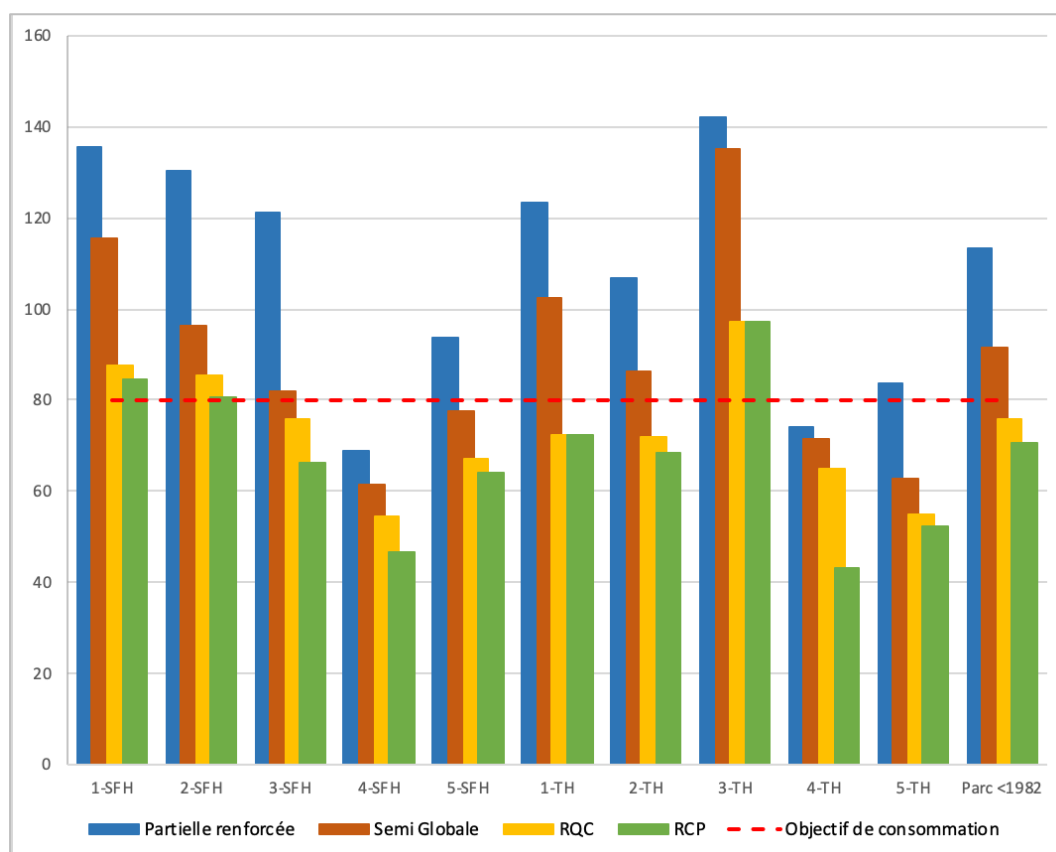


Figure 67 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) des 10 typologies pour les parcours RCP, RQC, SG et Partielle renforcée.

Valeur minimale : 68,9 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (4-SFH)

Valeur maximale : 142,1 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (3-TH)

Moyenne sur le parc <1982 : 113,5 kWh_{EP}/m²_{shab.an}

Ce parcours permet de quantifier la dégradation de performance entre deux parcours mettant en œuvre les mêmes postes de travaux : la RCP en une seule étape, et les mêmes postes dissociés en 6 étapes sans feuille de route. Peut-on considérer la rénovation partielle « renforcée » comme un parcours à retenir pour rénover les logements ? Avec l'objectif de 80 kWh_{EP}/m².an, la réponse est clairement non car seules 2 typologies sur 11 passent sous ce seuil et le bilan à l'échelle du parc est nettement supérieur. Même lorsque les consommations initiales sont les plus basses (5-TH et 5-SFH construites avec la première RT donc partiellement isolées), l'objectif n'est pas atteint.

Le parcours de rénovation en 6 étapes augmente de 50% à 130% les consommations finales, +61% sur la moyenne du parc, en comparaison avec une RCP, pour des postes de travaux équivalents (mêmes résistances thermiques, mêmes rendements, ...).

A l'échelle du parc, la consommation totale (chauffage + ECS) dépasse fortement le seuil des 80 kWh_{EP}/m²_{shab.an}, et ce de façon très nette puisque la moyenne monte à 113,5 kWh_{EP}/m²_{shab.an}, soit un dépassement de +42% de l'objectif.

Plusieurs raisons à cela : tout d'abord, les interfaces ne sont pas anticipées et, par conséquent, non traitées, ce qui implique que les ponts thermiques sont accentués, que l'étanchéité à l'air n'est pas gérée à l'échelle du logement complet et que, par conséquent, les consommations d'énergie restent élevées.

Comme le montre la figure ci-dessus, certains parcours de rénovation partielle « renforcée » ont toutefois des résultats qui s'approchent de la rénovation semi-globale. C'est notamment le cas de la typologie 4-TH où des actions « quasi-indépendantes » sont réalisées en première étape (plancher bas) et pour laquelle l'étanchéité à l'air est gérée par les murs existants (mur béton et toiture terrasse isolés par l'extérieur). Cependant, la ventilation est reportée tardivement laissant apparaître des pathologies⁴² : les consommations augmentent donc après ajout d'un système de ventilation en « urgence ». Cet exemple souligne qu'il est nécessaire de s'intéresser au comportement du bâti partiellement rénové en complément des analyses de calcul.

En outre, le travail en plusieurs étapes dissociées ne permet pas d'assurer la pérennité du bâti et des pathologies apparaissent dans tous les parcours de rénovation partielle (cf. partie 1). Le report de la ventilation est une cause importante d'apparition de pathologie, car ce poste est rarement réalisé par les ménages sans accompagnement.

La rénovation partielle renforcée ne permet donc pas d'atteindre les objectifs ni en termes de consommation, ni en termes de confort pour les occupants⁴³, avec le risque élevé de générer des pathologies dans les parois (non-anticipation des interfaces, ponts thermiques, non-continuité de l'étanchéité à l'air, mauvaise ventilation, ...).

⁴² Le choix de reporter la ventilation à des étapes de fin de parcours se base sur les pratiques constatées (ADEME TREMI, 2018). L'apparition de pathologie accélère la mise en place d'une solution de ventilation avant la fin du parcours de rénovation.

⁴³ Ou alors le confort est observé avec une augmentation des températures de consigne, augmentant encore la consommation énergétique du logement.

La rénovation partielle

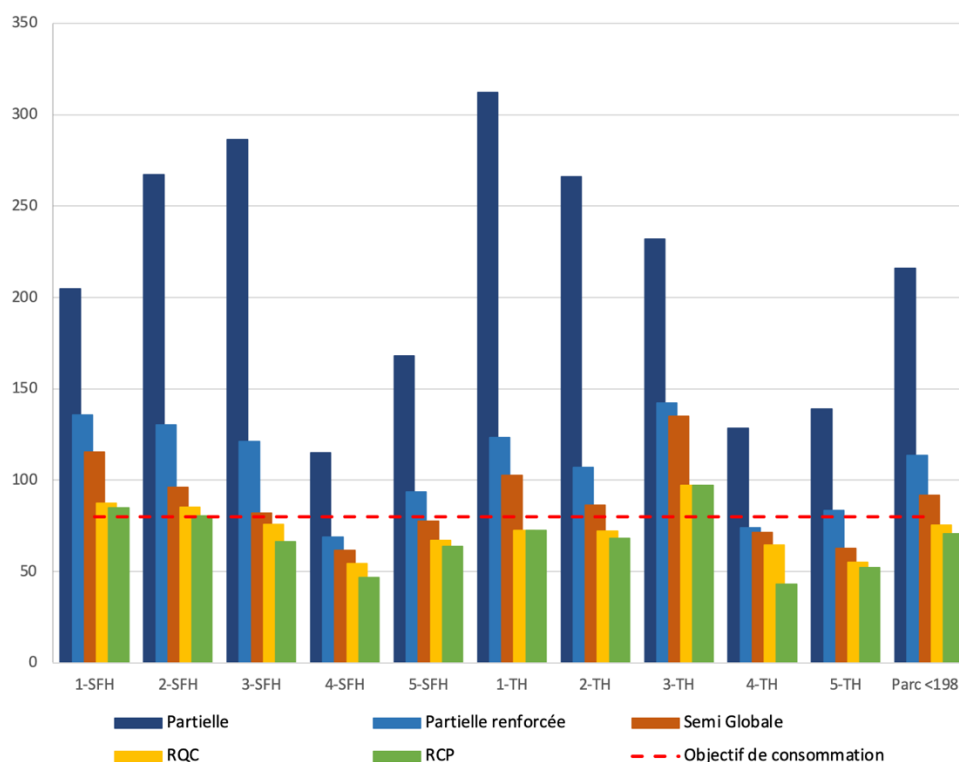


Figure 68 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) des 10 typologies pour les 5 parcours.

Valeur minimale : 115 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (4-SFH)

Valeur maximale : 312,1 kWh_{EP}/m²_{shab.an} (1-TH)

Moyenne sur le parc <1982 : 215,9 kWh_{EP}/m²_{shab.an}

Ce parcours, reflet des pratiques usuelles en matière de rénovation énergétique, amène à un niveau de consommation moyen du parc de **215,9 kWh_{EP}/m²_{shab.an}** et s'écarte nettement de l'objectif de consommation BBC rénovation ou équivalent. Comme évoqué précédemment, ceci est principalement dû :

- A l'absence de réalisation du dernier poste de travaux (absence d'incitation, non rentabilité de la dernière étape, abandon du ménage par manque de sensibilisation, appréciation erronée que la rénovation est déjà performante, saturation à cause des travaux successifs et des pathologies engendrées... Cf. hypothèses issues de l'enquête TREMI (ADEME TREMI, 2018) ;
- A un sous-dimensionnement de chaque poste de travaux (seuils de performance basé sur les incitations financières actuelles) ;
- A une approche opportuniste sans vision globale des travaux à réaliser ;
- A l'absence de traitement des interfaces (nombreux ponts thermiques, mauvaise étanchéité à l'air) et interactions.

De plus, ce type de rénovation est intrinsèquement pathogène (cf. partie 1).

Conclusion intermédiaire des calculs

Au regard de ces résultats de calcul sur les différents parcours de rénovation, et **pour le parc construit avant 1982**, plusieurs grandes conclusions émergent :

- **Les rénovations partielles et partielles renforcées ne permettent pas d'atteindre les objectifs BBC rénovation**, sont par ailleurs pathogènes et ont très peu de chances d'être menées à terme. Elles sont à écarter car peuvent créer des impasses de rénovation.
- **La rénovation complète et performante (RCP) atteint un niveau de consommation nettement inférieur à l'objectif BBC rénovation** sur la moyenne du parc (-12%), et limite fortement toute apparition de pathologie. **Ce parcours doit être privilégié.**
- **Les rénovations quasi-complète (RQC) et Semi-Globales (SG) peuvent atteindre l'objectif de consommation BBC rénovation sur la moyenne du parc, sous conditions et en limitant à 3 le nombre d'étapes du parcours.** Ce résultat nécessite cependant quelques précautions particulières pour gérer la complexité supplémentaire lié au report d'un poste de travaux (ou 2) dans le temps. **Dans la suite de l'étude, ces deux parcours sont fusionnés et remplacés par le terme Rénovation Performante par Étape.**
- **Dans tous les cas, la rénovation de tous les postes est indispensable** pour atteindre la performance BBC rénovation.

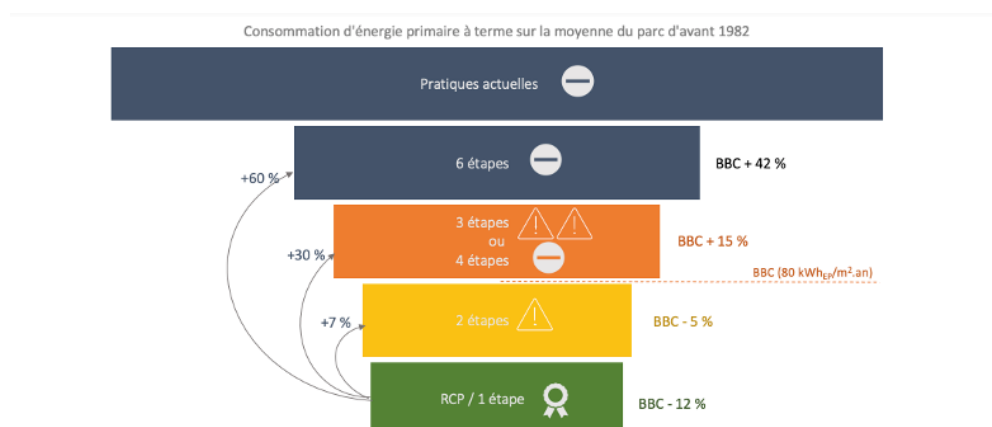


Figure C : Écarts de consommation sur la moyenne du parc construit avant 1982 entre les différents parcours de rénovation selon le nombre d'étapes, et écart à l'objectif BBC rénovation ou équivalent.

Légende : RCP = Rénovation Complète et Performante ;

- ⊖ : parcours ne permettant pas d'atteindre les objectifs de consommation BBC ni le confort pour les occupants, leur santé, la préservation du bâti et pouvant générer des impasses de rénovation ;
- ⚠ : parcours comportant des risques pour le confort, la santé et/ou la préservation du bâti mais pouvant parfois atteindre les objectifs de consommation BBC sous conditions fortes ;
- ⚠ : parcours pouvant atteindre le niveau BBC rénovation sous conditions et préservant santé et confort pour les occupants et préservation du bâti ;
- 🏆 : parcours permettant d'atteindre les objectifs de consommation, de confort et santé pour les occupants et la préservation du bâti.

Figure 69 : Synthèse des consommations moyenne sur le parc d'avant 1982 pour les différents parcours de rénovation, écart de consommation entre les parcours et écart à la consommation cible BBC rénovation.

Légende : RCP = Rénovation Complète et Performante ;

- ⊖ = parcours ne permettant pas d'atteindre les objectifs de consommation BBC rénovation ni le confort pour les occupants, leur santé, la préservation du bâti et pouvant générer des impasses de rénovation ;
- ⚠ = parcours comportant des risques pour le confort, la santé et/ou la préservation du bâti mais pouvant atteindre les objectifs pour 3 étapes sous conditions fortes ;
- ⚠ : parcours pouvant atteindre le niveau BBC rénovation sous conditions et préservant santé et confort pour les occupants et préservation du bâti ;
- 🏆 : parcours permettant d'atteindre les objectifs de consommation, de confort et santé pour les occupants et la préservation du bâti.

Les dispositifs d'accompagnement des parcours de rénovation performante par étapes doivent s'assurer que toutes les conditions sont réunies pour que le parcours de rénovation soit mené à son terme : à la fois les conditions techniques (anticipation des interfaces), économique (toutes les étapes doivent être rentables et finançables) et humaines (accompagnement des ménages dans la durée).

Un dernier point qu'il est important de mentionner : les calculs font l'hypothèse d'une mise en œuvre des parcours de rénovation (RCP, RQC, ...) sur l'ensemble du parc considéré, soit les maisons individuelles construites avant 1982. Or, en réalité, il n'y aura pas de conversion immédiate entre la rénovation partielle pratiquée actuellement et la RCP : il faudra plusieurs années pour qu'un parcours de travaux différents de la rénovation partielle devienne la norme et la pratique (montée en compétences les professionnels, adaptation des aides et des accompagnements...). En attendant, dans la phase intermédiaire qui durera plusieurs années, un « panachage » entre parcours de rénovation sera constaté. Par ailleurs, sur certaines maisons s'appliquent des contraintes non prises en compte dans ces calculs (maisons en secteurs sauvegardés qui modifient les postes de travaux et limitent la performance par exemple). Si, en théorie, la généralisation de la RCP à l'ensemble du parc conduit à des consommations inférieures à l'objectif fixé par la loi, (71 kWhEP/m².an versus 80), en réalité **cette marge de manœuvre identifiée sera largement absorbée par la gestion des contraintes de déploiement du parcours.**

3.3. Quels sont les regroupements de travaux pertinents ?

Les calculs font ressortir deux parcours de rénovation performante par étapes des maisons individuelles construites avant 1982 qui pourraient permettre d'atteindre les 4 critères définissant la performance à terme : il s'agit des parcours de rénovation appelés « semi-globale » (3 à 4 étapes) et « quasi-complète » (report d'un poste de travaux en 2^e étape), voir paragraphe précédent. Pour autant, l'atteinte de ces objectifs qualitatifs, dont la préservation du bâti, dépend de **conditions techniques explorées ici.**

Comme évoqué précédemment, **une première condition est autant que possible de limiter le nombre d'étapes du parcours** : l'augmentation des consommations (chauffage et ECS) est raisonnablement faible (voire nulle en fonction des combinaisons de travaux) entre RCP et RQC, donc en reportant un poste de travaux dans la 2^e étape (+7% en moyenne). Cependant, elle est nettement plus élevée avec la rénovation semi-globale en 3 à 4 étapes (+30% en moyenne). Ceci est principalement dû à la multiplication d'interfaces qu'il est toujours plus délicat de traiter à des années d'intervalle que lorsque les différents corps de métier sont présents simultanément sur le chantier.

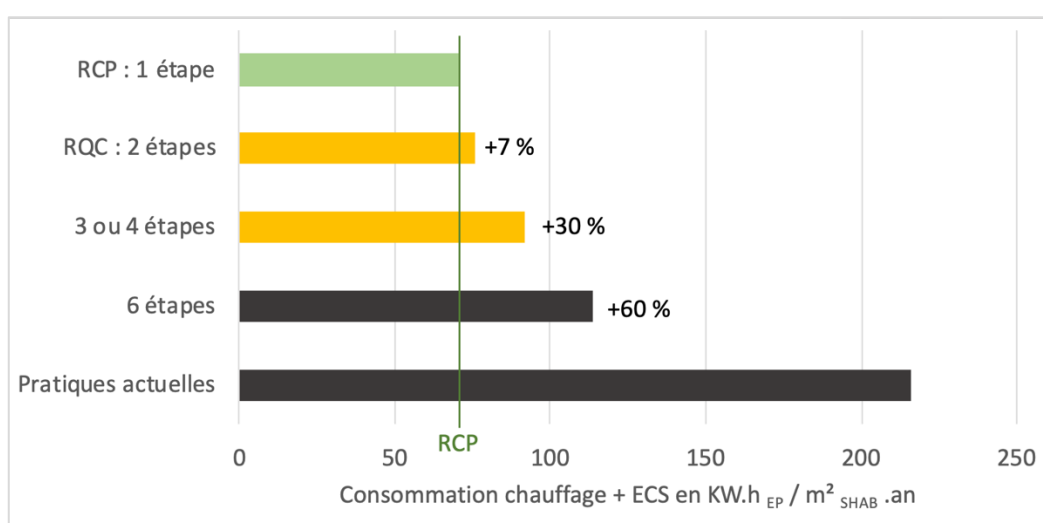


Figure 70 : Consommation chauffage et ECS par sur la moyenne du parc d'avant 1982, pour 5 parcours de rénovation. En gris : les parcours ne respectant pas les objectifs d'une rénovation performante, en vert le parcours RCP en une étape à viser, en jaune les parcours de rénovation par étape pouvant mener à une rénovation performante sous conditions.

Au-delà de ce premier constat « quantitatif », la nature des interfaces traitées en 2 étapes distinctes, donc des postes dissociés, est d'une importance majeure :

- En RQC, reporter l'isolation des planchers bas sur cave ou local non chauffé (1-TH) ou le remplacement de la chaudière (3-TH) n'impacte pas du tout la consommation finale, tandis que reporter l'isolation des toitures conduit à des écarts faibles, de l'ordre de 8 à 15% de besoin de chauffage ;
- A l'inverse, reporter l'isolation des murs ou le remplacement de menuiseries (c'est-à-dire traiter ces 2 postes séparément) conduit à des écarts plus significatifs (+21 à +100% de besoin de chauffage) ;
- Constat partagé également pour les rénovations semi-globales : les 2 parcours étudiés (2-SFH et 5-TH) qui regroupent ces 2 postes (murs/menuiseries) présentent les écarts les plus faibles avec la RCP (+20% contre +30% en moyenne) ;
- Enfin, les écarts les plus forts (>20%) entre RQC et rénovation semi-globale, concerne les 3 typologies pour lesquelles la RQC regroupe les postes murs/menuiseries tandis que la rénovation semi-globale les dissocie.

En première approche, cette analyse tendrait à faire émerger une notion de **travaux indissociables** (isolation des murs et remplacement des menuiseries, auxquels il faut ajouter la ventilation pour éviter les désordres et les pathologies) **et de travaux quasi-indépendants** (intervention sur les systèmes de chauffage et production d'ECS dans certaines configurations, et isolation de certain types de planchers bas ou de toiture), les travaux pouvant se révéler indissociables pour des raisons diverses :

- **Faisabilité technique.** Exemple : isolation périphérique du plancher décorrélée de l'ITE,
- **Risque de pathologie.** Exemple : l'isolation de murs anciens en absence de systèmes de renouvellement d'air augmente fortement les risques de développement d'humidité dans les murs,
- **Augmentation des « coûts » financiers ou psychologiques.** Exemple : le remplacement des fenêtres de toit avant sarking nécessitera leur déplacement et les reprises associées au moment du sarking,
- **Dimensionnement.** Exemple : remplacement de systèmes de chauffage avant amélioration de plusieurs postes de l'enveloppe et diminution des besoins.

Cette approche « par postes » reste toutefois à manier avec une immense précaution, **car les configurations⁴⁴ sont diverses** :

- Le poste « isolation des murs » rassemble plusieurs solutions techniques, ITE ou ITI, ce qui implique de juger de la possibilité de traiter les retours en tableau et en allège,
- Le poste « menuiseries » recouvre les types de pose en applique, au nu intérieur ou extérieur, en tunnel, en feuillure, pose en « rénovation », présence ou non de dormant élargis, de volets roulants, ...
- Le poste « isolation des toitures » comprend l'isolation de combles, rampants, sarking, toiture-terrasse, ... avec des caractéristiques constructives régionales impactantes (génoises et débords de toit en bas de pente notamment),
- Le poste « isolation des planchers bas » recouvre les isolations sous chape, en sous-face de plancher ou encore en périphérie.

La partie 2 avait permis de prendre conscience de la diversité et de la complexité de ces configurations par 3 exemples détaillés, mais pour faire le tour de l'ensemble des cas, et prendre en compte le maximum de configurations, **il faut étendre cette analyse au traitement de plus de 100 interfaces couramment rencontrées en maison individuelle.**

Plutôt que par poste, il faudrait donc raisonner par **combinaisons de catégories de travaux** pour pouvoir expliciter les travaux indissociables et les travaux « indépendants » (**non pas seulement « isolation des murs et remplacements des menuiseries » par exemple, mais « ITI et remplacement des menuiseries en applique »**). **Cela fait augmenter exponentiellement le nombre de combinaisons à prendre en compte, et conduit donc à ne plus pouvoir formuler de cas généraux de combinaisons de postes constituant le « cœur de rénovation ».**

⁴⁴ Voir glossaire.

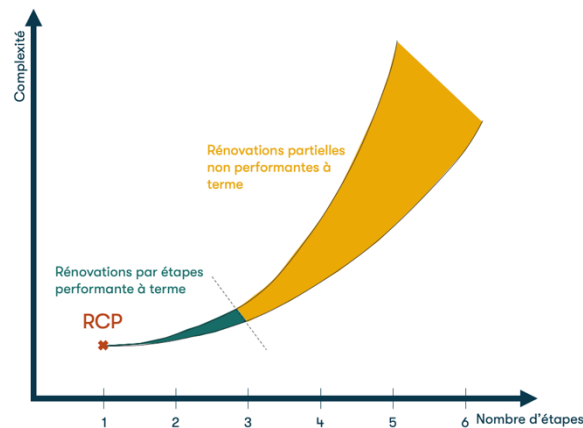


Figure 71 : Schématisation de l'augmentation de la complexité avec le nombre d'étapes d'un projet de rénovation

A chaque fois, **les interfaces entre ces multiples configurations présentent une complexité particulière** qui amène donc à reconsidérer cette distinction « en première approche » entre « travaux indissociables » vs. « travaux quasi-indépendants ». Plutôt que des cas généraux, il est nécessaire de créer des outils détaillant ces différentes configurations (**cahiers de détails pour le traitement des interfaces notamment**) et **former les professionnels (artisans, maîtres d'œuvre...) aux solutions techniques appropriées comme aux impasses**. Ces outils pédagogiques et techniques en faveur des ménages et des professionnels dépassent le cadre de cette étude mais sont indispensables pour espérer pouvoir mettre en œuvre des rénovations performantes par étapes.

L'étude s'est principalement focalisée sur le traitement de l'enveloppe, car la question des systèmes de chauffage et production ECS reste assez indépendante des autres travaux réalisés, à 2 conditions expresses :

- que les traversées de réseaux préservent l'étanchéité à l'air de l'enveloppe,
- et que le changement du système intervienne suffisamment tard dans le parcours de rénovation afin d'être cohérent avec les besoins en puissance.

La partie suivante étudie la place des équipements de chauffage et les énergies renouvelables dans ces rénovations par étapes performantes à terme.

4. Le choix de systèmes adaptés à la rénovation performante par étapes

Cette partie est dédiée aux équipements de chauffage et de production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) et leurs interactions avec la rénovation de l'enveloppe :

- Quels sont les équipements adaptés à la rénovation performante par étapes ?
- En quoi une surpuissance diminue-t-elle la performance énergétique ?
- Quelle est la place des énergies renouvelables dans une rénovation performante ?

Comme évoqué précédemment, une des difficultés techniques de la rénovation par étapes est **l'adaptation de la puissance de chauffage aux besoins de la maison**, qui sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que la qualité de l'enveloppe et de la ventilation est améliorée. En effet, un système de chauffage de puissance trop importante par rapport au besoin va **fonctionner de manière dégradée**, avec des courts-cycles qui abaissent son rendement effectif et réduisent la durée de vie de l'appareil.

L'une des clés de l'adaptation des systèmes de chauffage à un parcours de rénovation par étapes est donc la capacité des générateurs (chaudières, pompes à chaleur, poêles, etc.) à adapter leur puissance en fonction des besoins de la maison. En termes techniques, on parle de **modulation de la puissance**. Certains générateurs peuvent moduler leur puissance, d'autres ne le peuvent pas, ou pas assez pour suivre le parcours de rénovation de la maison.

Ce chapitre fait le point sur les appareils disponibles actuellement sur le marché français, leur plage de puissance et de modulation. Un **benchmark** a été réalisé pour les besoins de l'étude en septembre 2019, actualisé en avril 2020. Les hypothèses retenues pour **modéliser la perte de rendement** due à la surpuissance au cours des rénovations par étapes seront présentées et illustrées avec quelques cas d'étude.

4.1. Benchmark des systèmes de chauffage

Chaudières gaz

Le marché des chaudières gaz a longtemps été structuré par la puissance demandée par certains labels pour la production d'eau chaude sanitaire. C'est pourquoi on trouve encore aujourd'hui beaucoup de chaudière de 24 kW. Or, d'une part le besoin d'ECS était largement surévalué dans ces labels⁴⁵, et d'autre part les logements neufs performants et rénovations performantes nécessitent des puissances de chauffage beaucoup plus faibles, de l'ordre de 2 kW.

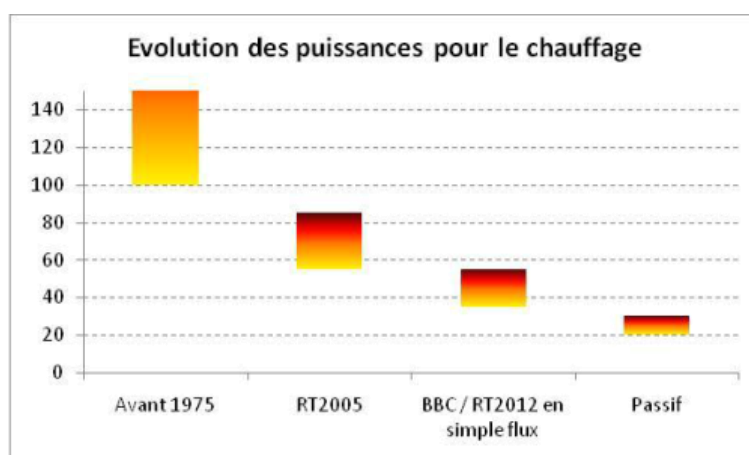


Figure 72 : Illustration de la baisse des puissances surfaciques depuis les bâtiments d'avant 1975 à aujourd'hui.
Source : Enertech, rapport de synthèse de l'AMO Bourgogne⁴⁶

⁴⁵ Cf. publications ADEME et COSTIC sur les consommations d'eau chaude en habitat individuel et collectif.

⁴⁶ <https://www.enertech.fr/rubrique/rubrique-238-2/>

En réponse à ces besoins du marché, et globalement pour améliorer les rendements, l'ensemble des fabricants a conçu des chaudières gaz modulantes. Certains ont même réussi à concevoir des chaudières pouvant être qualifiées de très modulantes, c'est-à-dire dont la puissance peut varier d'un facteur 10.

Les chaudières prises en compte dans le benchmark sont toutes des chaudières à condensation (voir Figure 73). Toutes peuvent assurer la production d'ECS, en instantané, en micro-accumulation ou avec un ballon externe.

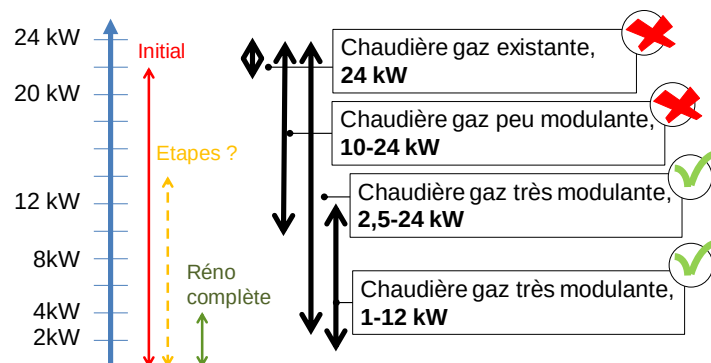


Figure 73 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les chaudières gaz à condensation

Les chaudières existantes sont généralement non modulantes, donc il sera nécessaire de les remplacer pendant le parcours de rénovation, ce qui permettra d'installer des chaudières à condensation.

Les chaudières actuellement les plus courantes sont des chaudières peu modulantes et de puissance nominale 24kW. Elles ne peuvent pas moduler en-dessous de 10 kW, ce qui les rend inadaptées aux dernières étapes du parcours de rénovation performante.

Il existe en revanche des chaudières très modulantes : certains ont une puissance nominale de 24 kW et peuvent descendre à 2,5 kW environ. Elles sont adaptées à l'ensemble du parcours de rénovation, même si elles seront surpuissantes en mi-saison en fin de parcours de rénovation. D'autres sont modulantes de 1 à 12 kW, ce qui les rend idéales pour la fin de parcours de rénovation, et installables dès que l'enveloppe est bien isolée.

En conclusion,

- Il **existe des modèles très modulants de chaudières gaz à condensation qui peuvent s'adapter au parcours de rénovation** (puissance variant d'un facteur 10). Ces chaudières ne sont cependant pas majoritaires sur le marché actuel, il convient donc de préconiser explicitement ce type de chaudière pour tout parcours de rénovation par étapes.
- La **meilleure performance à terme est atteinte avec les chaudières très modulantes et à faible puissance** (modulant d'environ 1kW à environ 12 kW). Cette puissance n'est suffisante que si l'enveloppe est déjà bien isolée, ou lorsque la chaudière est installée en même temps qu'un bouquet de travaux traitant bien l'enveloppe (division par deux des déperditions).

Chaudières fioul

Pour des raisons techniques, il est plus difficile de rendre les chaudières fioul aussi modulantes que les chaudières gaz (voir Figure 74).

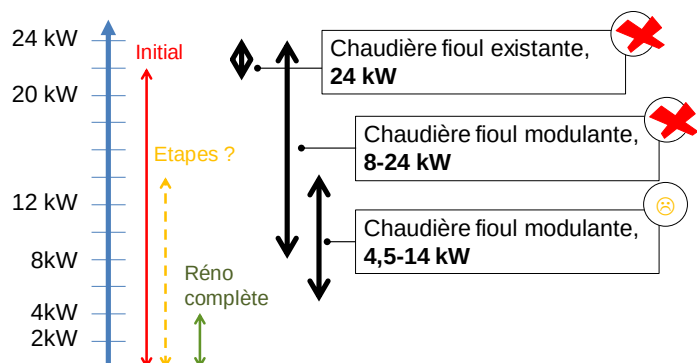


Figure 74 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les chaudières fioul à condensation

Les chaudières prises en compte dans le benchmark sont toutes des chaudières à condensation. Toutes peuvent assurer la production d'ECS, en instantané, en micro-accumulation ou avec un ballon externe.

Comme pour le gaz, la chaudière existante n'est généralement pas modulante, et ne sera donc pas adaptée au parcours de rénovation. Pour le remplacement d'une chaudière fioul dès la première étape avant d'avoir isolé l'enveloppe, il faudra une puissance nominale d'environ 24 kW. Or il n'existe que des chaudières modulantes au mieux jusqu'à 8 kW, ce qui est beaucoup trop pour les besoins de la maison à terme. **Il n'existe pas à ce jour de chaudière fioul permettant de couvrir l'ensemble du parcours de rénovation par étapes.**

Dans le cas d'un remplacement de chaudière fioul après ou en même temps que des travaux d'isolation, une solution modulante de 4,5 kW à 14 kW pourra être sélectionnée. La puissance minimale reste trop importante pour la performance à terme, notamment en mi-saison, mais c'est ce qu'il y a de mieux sur le marché actuellement pour ce combustible.

Conclusion pour les chaudières fioul :

- Même à condensation, **il n'existe pas à ce jour de modèles très modulants** (puissance variant d'un facteur 10) pouvant s'adapter à l'ensemble des parcours de rénovation.
- Il convient de **proscrire le remplacement des chaudières fioul comme première étape de rénovation** avant isolation.
- **La meilleure solution technique** est atteinte avec les chaudières modulantes et à faible puissance (modulantes de 4 à 14 kW environ). Leur puissance n'est suffisante que si l'enveloppe est déjà bien isolée, ou qu'elles sont posées en même temps qu'un bouquet de travaux traitant bien l'enveloppe (division par deux des déperditions).

Pompes à chaleur air-eau

De même, pour des raisons techniques, la plage de modulation des pompes à chaleur (PAC) est relativement limitée. Certains fabricants proposent des PAC à deux compresseurs pour atteindre des niveaux de modulation plus importants, mais ce segment du marché est plutôt axé sur des puissances trop élevées pour la rénovation performante.

Les PAC prises en compte dans le benchmark (voir Figure 75) sont toutes à niveau de COP élevé (COP annuel normalisé – « SCOP » - supérieur à 3,2 pour la production de chaleur à 55°C). Certaines peuvent assurer la production d'ECS avec un ballon externe, mais pour d'autres une production ECS indépendante doit être trouvée (le cas échéant, un ballon thermodynamique est pris en compte).

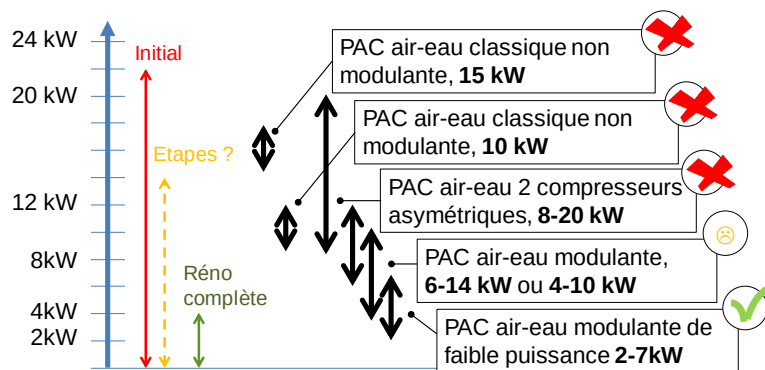


Figure 75 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les pompes à chaleur air-eau

Des pompes à chaleur non modulantes sont présentes sur le marché. Elles ne sont pas adaptées à un parcours de rénovation par étapes. De plus, elles sont généralement trop puissantes par rapport au niveau d'isolation à terme.

Le modèle le plus modulant identifié permet de couvrir la plage de 8 à 20 kW. La puissance minimale reste trop importante pour la performance à terme.

Les modèles les plus adaptés au niveau d'isolation à terme sont des PAC modulantes de faible puissance, pouvant adapter leur puissance de 2 à 7 kW par exemple.

Conclusion pour les pompes à chaleur air-eau :

- Il n'existe pas à ce jour de modèles très modulant de PAC (puissance variant d'un facteur 10) pouvant s'adapter à l'ensemble des parcours de rénovation.
- La PAC n'apparaît pas comme une bonne solution pour la **première étape de rénovation** avant isolation⁴⁷.
- La meilleure solution technique est l'installation de **PAC modulante et à faible puissance** (modulant de 2 à 7 kW environ) dans un parcours de rénovation où le système de chauffage est traité après ou en même temps que l'isolation de l'enveloppe (isolation quasi-complète du logement).

Chaudières bois

Les chaudières à bois déchiqueté ou à bûches sur le marché ne sont (actuellement en tout cas) pas adaptées aux rénovations performantes (trop puissantes et/ou pas assez modulantes), l'étude s'est concentrée sur les chaudières à granulés. Ces chaudières sont à haut rendement et basses émissions de particules, et peuvent assurer la production d'ECS avec un ballon externe. Elles sont capables de moduler leur puissance, dans une certaine mesure (voir Figure 76).

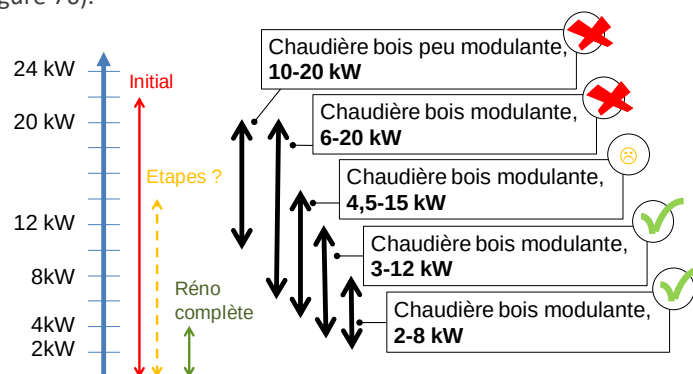


Figure 76 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les chaudières à granulés

⁴⁷ La solution avec ballon tampon peut cependant être envisagée ; voir paragraphe dédié.

Les chaudières bois modulantes de forte puissance sont inadaptées à la performance à terme. Seules les chaudières de faible puissance permettent d'atteindre le niveau de modulation minimal nécessaire pour l'isolation à terme.

Conclusion sur les chaudières bois :

- En l'état actuel du marché, **les chaudières à bois déchiqueté et à bûches ne sont pas adaptées à la rénovation performante** (trop puissantes et/ou pas assez modulantes).
- **Il n'existe pas, à ce jour, de modèles de chaudières à granulés très modulant** (puissance variant d'un facteur 10) pouvant s'adapter à l'ensemble des parcours de rénovation.
- Il est fortement déconseillé d'installer une chaudière bois granulé comme première étape de rénovation avant isolation⁴⁸.
- La meilleure solution technique est l'installation de chaudière à granulés modulante et à faible puissance (modulant de 2 ou 3 kW environ à 8 à 12 kW environ). Leur puissance n'est suffisante que si l'enveloppe est déjà bien isolée, ou qu'elles sont posées en même temps qu'un bouquet de travaux traitant bien l'enveloppe (division par deux des déperditions).

La solution du ballon tampon

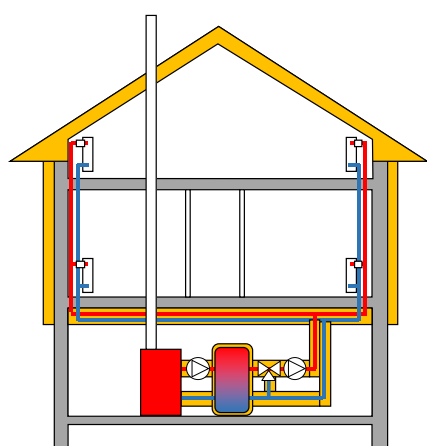


Figure 77 : Schéma de l'ajout d'un ballon tampon à une chaudière surpuissante

Si la modulation des équipements jusqu'à la puissance à terme d'un parcours de rénovation est une solution à étudier (voir paragraphes précédents), une autre possibilité est d'ajouter un ballon tampon entre le générateur surpuissant et le circuit d'émetteurs. Cette installation évite également les courts-cycles et la dégradation des performances du système.

Cette solution nécessite un volume tampon important (compter environ 500 litres), qu'il convient de fortement isoler. Une régulation, une vanne trois voies et une pompe sont également à ajouter.

L'ensemble est donc très encombrant et coûte généralement aussi cher qu'une chaudière neuve, sans les avantages d'une chaudière neuve (notamment être étanche à l'air avec alimentation d'air extérieur dédiée, et pouvoir ainsi être intégrée sans danger au volume chauffé et étanche à l'air).

Conclusion : le **ballon tampon** est une solution technique possible pour compenser un générateur trop puissant. Cette solution reste cependant chère et encombrante. Elle ne peut donc constituer qu'une **stratégie de compensation ponctuelle dans des cas particuliers**, et non une stratégie généralisable d'adaptation de la puissance.

Poêles à bois (granulés et bûches)

L'analyse se concentre sur les poêles de faible puissance, car ce sont les seuls susceptibles d'être performants à terme. Les poêles pris en compte sont à haut rendement et basses émissions de particules, étanches et avec amenée d'air extérieur dédiée (et isolée). Certains peuvent être des poêles bouilleurs et peuvent assurer la production d'ECS avec un ballon externe ; les autres sont de simples poêles nécessitant une production d'ECS distincte.

La plage de modulation est explicite dans la documentation des poêles à granulés. Pour les poêles à bois bûche, en revanche, ce n'est pas toujours clair. L'utilisation des poêles à bûches à charge partielle est fortement déconseillée pour des raisons d'encrassement et d'émissions accrues de particules fines. Globalement les poêles disponibles sur le marché sont peu modulants (voir Figure 78 et Figure 79).

⁴⁸ La solution avec ballon tampon peut cependant être envisagée ; voir paragraphe dédié.

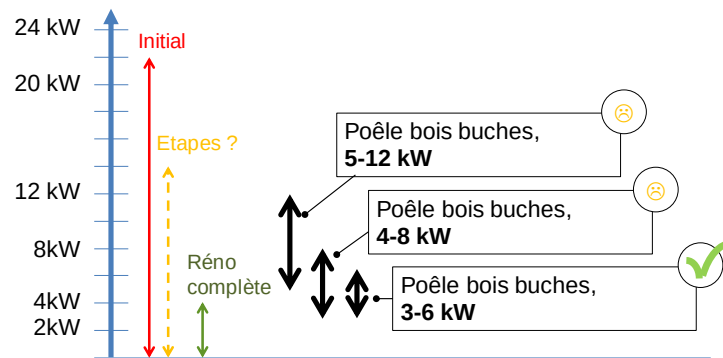


Figure 78 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les poêles à bûches de faible puissance

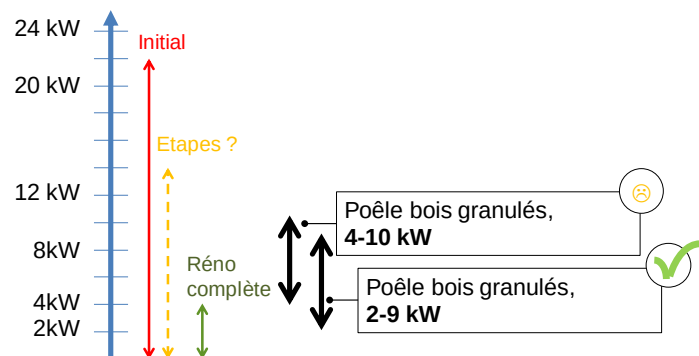


Figure 79 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les poêles à granulés de faible puissance

Globalement, la plage de modulation des poêles ne permet pas d'accompagner plusieurs étapes de rénovation.

Une stratégie possible pour un parcours de rénovation par étapes, notamment si l'existant est chauffé par des radiateurs électriques, est de **conserver ces radiateurs électriques en appoint d'un poêle dimensionné en anticipant la performance à terme**. En début de parcours de rénovation, l'appoint électrique assurera une part importante du chauffage, qui tendra vers 0 lorsque la performance à terme sera atteinte. Les radiateurs électriques devenus inutiles pourront alors être déconnectés au tableau électrique, voire déposés.

Conclusion pour les poêles à bois :

- En l'état actuel du marché, **il n'existe pas de poêle à bûches ou à granulés suffisamment modulants** pour pouvoir s'adapter à plusieurs étapes d'un parcours de rénovation.
- **Le dimensionnement des poêles à bois doit être adapté à la puissance nécessaire à terme** (fin de parcours de rénovation performante). Un appoint doit être apporté pour assurer la puissance nécessaire aux premières étapes de rénovation : il peut s'agir notamment de radiateurs électriques existants. Leur utilisation comme appoint deviendra inutile à terme et ils pourront alors être déconnectés.

Synthèse technique

Type de chauffage	Solution technique disponible	Préconisations pour la rénovation par étapes
Chaudière gaz à condensation	Oui	Préconiser une chaudière fortement modulante (environ 2 à 24 kW). Idéalement remplacer la chaudière après bonne isolation (déperdition divisée par 2) et préconiser une chaudière fortement modulante et à basse puissance (environ 1 à 12 kW).
Chaudière fioul à condensation	Seulement à partir d'un bon niveau d'isolation.	Préconiser une chaudière modulante et de faible puissance (moins de 14 kW nominal, modulant jusqu'à moins de 4 kW) après bonne isolation (déperdition divisée par 2) ou simultanément.
Chaudière bois à granulés		
PAC air-eau	Seulement à partir d'un très bon niveau d'isolation.	Préconiser une PAC modulante et de faible puissance (environ 2 à 7 kW) après très bonne isolation (isolation quasi-complète de l'enveloppe) ou simultanément.
Poêles	Seulement à partir d'un très bon niveau d'isolation.	Préconiser le dimensionnement sur la performance à terme de la maison. Pour les étapes intermédiaires, conserver un appoint, par exemple les radiateurs électriques existants. Déconnecter l'appoint quand la performance à terme est atteinte.

Par ailleurs, il reste la possibilité de mettre en œuvre un ballon tampon. Cependant cette solution chère et encombrante ne peut que résoudre des cas particuliers et ne semble pas généralisable.

Cette synthèse technique présente les conclusions à la date de réalisation du benchmark : **il apparaît essentiel que les industriels proposant des systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire travaille à l'optimisation de leurs systèmes pour qu'ils puissent s'adapter à la rénovation énergétique des logements.**

4.2. Impact d'une surpuissance sur le rendement

Modélisation de la perte de rendement

L'impact de la surpuissance sur les rendements d'exploitation (rendement chaudière et pertes de distribution) est un phénomène constaté par plusieurs campagnes de mesures, notamment (mais pas seulement) dans le cadre du PREBAT.

L'illustration la plus nette en maison individuelle est présentée sur le graphique ci-dessous, qui présente une même chaudière utilisée dans des niveaux de consommations, et donc de puissance, différents. En effet il s'agit de petits collectifs de 2 à 5 logements, tous équipés de la même chaudière gaz à condensation. Cette chaudière est donc plus ou moins sollicitée en fonction de la demande des logements qu'elle alimente. La campagne de mesure qui a été réalisée a permis de mettre en évidence que moins ces chaudières sont sollicitées, moins bon est leur rendement.

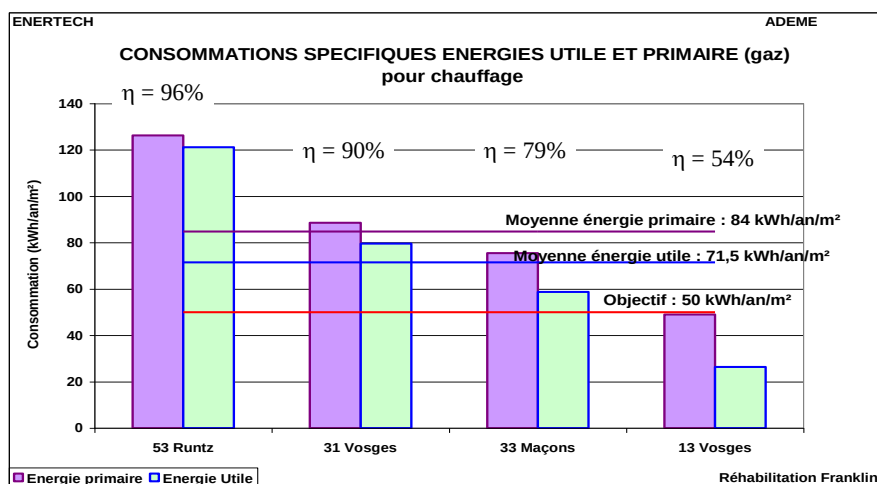


Figure 80 : Dégradation du rendement d'un même modèle de chaudière gaz dans différentes utilisations faisant appel à tout ou partie de sa puissance. Source : Enertech pour ADEME, campagne de mesure sur les rénovations du Quartier Franklin à Mulhouse.

Sur le graphique ci-dessus, le rendement passe de 96%, pour une chaudière utilisée à pleine charge, à 54% (soit 60% du rendement nominal) pour une chaudière utilisée à 50% de sa puissance minimale. Pour expliciter ce phénomène, le modèle de rendement de la chaudière étudiée a été extrapolé (voir Figure 81) puis appliqué à l'ensemble des générateurs (absence de données spécifiques à chacun). Cette façon d'exprimer la dégradation du rendement permet bien de valoriser le fait que plus une chaudière est modulante, plus la puissance minimale (P_{min}) est faible, donc moins vite on arrive à une utilisation où le rendement est dégradé.

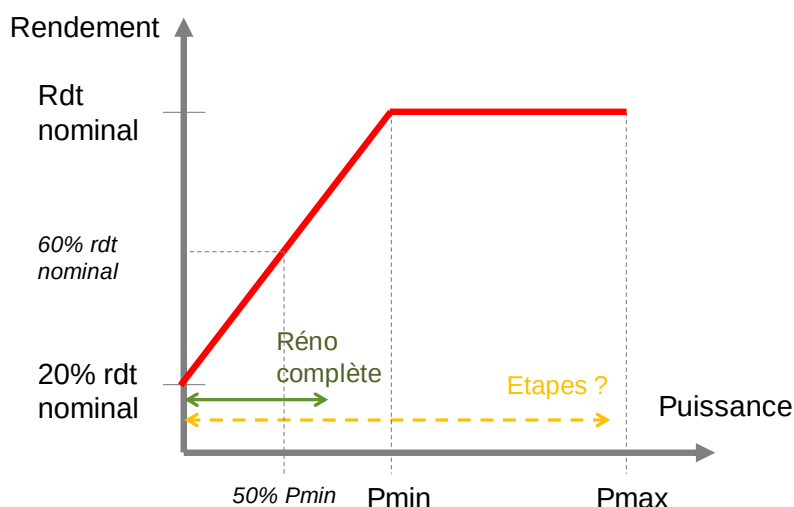


Figure 81 : Modèle de rendement utilisé dans l'étude. P_{min} et P_{max} sont les limites de modulation de la chaudière.

Pour les calculs de la Partie 3 de ce rapport, les hypothèses suivantes ont été appliquées :

- Rénovation partielle et Partielle renforcée : le générateur installé est de type le plus vendu actuellement (chaudière peu modulante, PAC pas ou peu modulante) et de puissance adapté à l'étape où le générateur est installé.
- Autres parcours de rénovation : le générateur installé est conforme aux meilleures pratiques citées précédemment, en respectant la puissance nécessaire au moment où le générateur est installé (donc si l'installation arrive trop tôt le générateur ne sera pas optimal à terme).
- Cas échéant : les poêles sont dimensionnés pour la puissance à terme, et un appoint électrique est pris en compte, dont la part est calculé au prorata de la puissance nécessaire.
- Le rendement est calculé avec la relation illustrée Figure 81, en utilisant la puissance minimale du générateur installé et la déperdition calculée à chaque étape.

Illustration des résultats

Les différents parcours de rénovation et typologies de l'étude ont permis d'illustrer plusieurs phénomènes de pertes de rendement au cours des étapes. Voici quelques exemples.

Étude de cas 1 : chaudière gaz (exemple de la typologie 3-TH)

Dans le parcours de ***rénovation partielle***, le remplacement de la chaudière gaz existante par une chaudière à condensation est réalisé en étape 4, après isolation des combles, ITE, VMC hygro. Une chaudière classique est mise en œuvre, modulant de 10 à 24 kW, suivant un raisonnement encore fréquent de « qui peut le plus peut le moins » ... Alors que la déperdition réelle n'est que de 9,2 kW, inférieure à la puissance minimale, le rendement est abaissé de 90% (rendement nominal) à respectivement 84% puis 78%.

Dans le parcours de ***rénovation partielle renforcée***, c'est une chaudière très modulante qui est installée en étape 4. Sa puissance peut varier de 2,5 à 24 kW. La déperdition à terme est de 7,1 kW, ce qui reste supérieur à la puissance minimale de la chaudière, donc il n'y a pas de dégradation du rendement.

Dans les ***autres parcours***, le niveau d'isolation au moment de remplacer la chaudière permet d'installer directement une chaudière très modulante de faible puissance (1 à 12 kW). La déperdition à terme en rénovation complète est de 4 kW, ce qui reste supérieur à la puissance minimale de la chaudière, il n'y a donc pas de perte de rendement non plus.

Étude de cas 2 : passage du fioul à une PAC (exemple de la typologie 3-SFH)

Dans le parcours de ***rénovation partielle***, le remplacement de la chaudière fioul existante par une PAC air-eau est réalisé en étape 1. Une PAC classique est mise en œuvre, de 20 kW et non modulante. Son COP de 3 se dégrade ainsi pendant les étapes suivantes pour atteindre 1,8 en étape 5 (déperdition de 9,9 kW).

Dans le parcours de ***rénovation partielle renforcée***, c'est une PAC modulante qui est installée en étape 1. Sa puissance peut varier de 8 à 20 kW. La déperdition à terme est de 5,9 kW, ce qui provoque une dégradation du COP de 3 à 2,4 en étape 6.

Dans les ***autres parcours***, le niveau d'isolation au moment de remplacer la chaudière permet d'installer directement une PAC modulante de faible puissance (4 à 10 kW). La déperdition à terme en rénovation complète est de 4,4 kW, ce qui reste supérieur à la puissance minimale de la PAC, il n'y a donc pas de perte de COP pour ces parcours.

Étude de cas 3 : passage du chauffage électrique à poêle à bois (exemple de la typologie 1-TH)

Dans les parcours de ***rénovation partielle*** et ***rénovation partielle renforcée***, l'installation d'un poêle à bois intervient en étape 5. Conformément aux préconisations proposées, c'est un poêle dimensionné pour la performance à terme qui est posé, soit une puissance de 5 à 12 kW. Les radiateurs électriques, conservés, sont nécessaires en étape 5 à hauteur respectivement de 38% et 27% du besoin de chauffage. En étape 6, cet appoint n'est plus nécessaire.

Dans le parcours de ***rénovation semi-globale***, le poêle est installé en étape 3. Compte tenu de la déperdition à terme, c'est également un poêle de puissance 5 à 12 kW qui est choisi. L'appoint électrique est mobilisé en étape 3 et couvre 15% du besoin de chauffage, puis il devient inutile à terme.

Dans les ***parcours quasi-complet et complet***, le niveau d'isolation à terme permet d'installer un poêle plus petit (de 3 à 6 kW). L'appoint est nécessaire en étape 1 de la rénovation quasi-complète (pour 10% du besoin), et devient inutile à terme.

4.3. L'intégration d'énergies renouvelables dans les projets de rénovation BBC

L'objectif de ce dernier chapitre concernant les équipements est de regarder quelle est la place des énergies renouvelables dans les projets de rénovation performante par étapes, et d'évaluer l'opportunité de compenser une rénovation qui n'atteindrait pas un niveau de consommation BBC rénovation ou équivalent (cas de certains parcours de rénovation semi-globale) par une production d'énergie renouvelable, thermique (bois, solaire thermique) ou électrique (solaire photovoltaïque). Les calculs sont menés sur quelques typologies.

L'exercice est proposé à titre indicatif, il est important de garder en tête que **la transition énergétique mise simultanément sur la maîtrise des consommations ET sur le développement des énergies renouvelables**. Il y a donc un risque de déplacer le problème de surconsommation énergétique vers d'autres secteurs (l'accessibilité des gisements renouvelables en biomasse, solaire ou éolien). Il convient également de rappeler que **toutes les rénovations, en une ou plusieurs étapes, avec ou sans énergies renouvelables, doivent assurer l'atteinte de la performante : santé, préservation du bâti et confort à chaque étape et un niveau BBC rénovation à terme, en moyenne nationale**.

Pour le chauffage et la production d'ECS

Pour rappel, le choix d'un système de chauffage dépend de nombreux paramètres comme le système existant (génération, réseau de distribution, émetteurs), la disponibilité des énergies (réseau de gaz à proximité par exemple), le niveau de performance énergétique, mais également la compacité de la maison, la facilité d'usage (accès, stockage, manipulation de bûches, granulés...) et autres contraintes architecturales et techniques.

Comme évoqué dans la Partie 3 de l'étude, les parcours de rénovation des différentes typologies se basent sur les retours de terrain, ce qui conduit à ce que 3 typologies sur les 10 étudiées (1-SFH, 4-SFH et 1-TH) soient chauffées au bois (poêle ou chaudière), et 2 typologies par une PAC air-eau (3-SFH et 5-SFH).

La méthode de calcul utilisée ici valorise le bois-énergie par le biais d'un coefficient d'énergie primaire de 0,6 (voir Annexe 1). Par ailleurs, les PAC air-eau sont calculées avec un COP moyen annuel de 3. Ainsi, les résultats présentés dans la partie 3 de cette étude tiennent déjà compte de l'intégration d'énergies renouvelables dans le parcours de rénovation pour ces 5 typologies, soit une représentativité de 72% de logements utilisant le bois-énergie ou une PAC pour le chauffage (cf. Figure 56 page 84). **L'intégration d'énergies renouvelables pour le chauffage de maisons rénovées au niveau BBC rénovation est une pratique déjà courante, à généraliser en l'absence de contraintes techniques ou économiques. C'est souvent le meilleur choix pour remplacer le fioul, le propane ou des usages thermiques de l'électricité moins-efficients (par effet Joule ou par PAC avec COP<3).**

Lorsqu'un réseau de gaz existe, cette énergie est souvent utilisée avant comme après la rénovation. Est-il intéressant d'intégrer une chaudière bois dans un parcours de rénovation semi-globale ? Comment se situe cette solution en regard d'une RCP ? Le Tableau 2 présente les résultats des calculs pour ces 3 parcours de rénovation appliqué à la typologie TH-3.

Étude de cas Typologie 3-TH	Rénovation semi-globale « base » <i>Chaudière gaz (CH+ECS)</i>	Rénovation semi-globale « EnR » <i>Chaudière bois (CH+ECS)</i>	Rénovation complète et performante <i>Chaudière gaz (CH+ECS)</i>
Consommation (chauffage + ECS)	135 kWh _{EP} /m ² .an	85,8 kWh _{EP} /m ² .an	97,2 kWh _{EP} /m ² .an
Coût des travaux	41 900 €	49 000 €	42 000 €
Coût des travaux (aides déduites)	31 800 €	32 300 € (si cumul CITE) 36 300 € (plafond CITE)	31 900 €

Tableau 2 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie TH-3 (3 étapes de travaux).

Dans ce cas de figure, la **chaudière bois** améliore considérablement la performance de la rénovation semi-globale (-37%) sans toutefois atteindre le niveau BBC rénovation (comme la RCP, cf. partie 3 pour les explications de ce constat pour cette typologie : isolation du plancher bas impossible). Par ailleurs, la solution bois-énergie améliore le bilan carbone du projet.

En termes de coût, l'option « EnR » pourrait s'avérer aussi accessible que la version « gaz » ou même la RCP, à la condition expresse de pouvoir mobiliser à nouveau le crédit d'impôts (déjà mobilisé sur les étapes précédentes), qui s'élève à 4000€ pour une chaudière bois. **Théoriquement possible en réalisant les travaux à plus de 5 ans d'intervalle**, cette option reste risquée étant donné le manque de visibilité sur le renouvellement de ce niveau d'aides chaque année via la loi de finances⁴⁹. Globalement, le temps de retour brut de la stratégie semi-globale compensée par EnR reste **moins bon que celui de la rénovation complète** (29 ans contre 25 ans sur ce cas d'étude), et ce même avec l'hypothèse optimiste sur le crédit d'impôts.

Second cas étudié : beaucoup de **maisons chauffées au fioul** ne disposent pas d'un réseau de gaz à proximité, et la rénovation est souvent l'occasion de passer au bois ou à une PAC. Cependant, rarement (5% des cas selon l'Observatoire BBC d'Effinergie), l'énergie fioul est conservée avec une chaudière à condensation, c'est ce cas qui est représenté dans le Tableau 3 pour la typologie 2-TH. L'opportunité de remplacer cette chaudière fioul par une **PAC double-service** (chauffage + ECS) lors d'une rénovation semi-globale, plutôt que d'envisager une rénovation complète et performante est étudiée ici.

Étude de cas Typologie 2-TH	Rénovation semi-globale « base » <i>Chaudière fioul (CH+ECS)</i>	Rénovation semi-globale « EnR » <i>PAC air-eau (CH+ECS)</i>	RCP <i>Chaudière fioul (CH+ECS)</i>
Consommation (chauffage + ECS)	86,3 kWh _{EP} /m ² .an	72,4 kWh _{EP} /m ² .an	68,4 kWh _{EP} /m ² .an
Coût des travaux	34 200 €	42 000 €	34 300 €
Coût des travaux (aides déduites)	23 400 €	29 200 € (si cumul CITE) 30 200 € (plafond CITE)	23 500 €

Tableau 3 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie TH-2 (3 étapes de travaux).

Dans ce cas de figure, la PAC améliore notablement la consommation de chauffage et ECS (-16%), sans toutefois atteindre la performance d'une rénovation complète. Le coût de l'opération est plus élevé, même avec l'hypothèse risquée d'un cumul possible des crédits d'impôts sur le parcours de rénovation. Le temps de retour brut de la trajectoire semi-globale compensée par EnR est moins bon que celui de la RCP (11 ans contre 9 sur ce cas).

En conclusion, et toute chose égale par ailleurs, il reste préférable d'investir dans l'enveloppe – plus pérenne – que dans les systèmes avec EnR, dont la durée de vie est moindre.

Production ECS seule

Le système de chauffage intègre parfois la production d'ECS, c'est notamment le cas des chaudières (gaz, fioul, bois) et aussi parfois des PAC, qui représentent 8 des 10 typologies étudiées ici, et dont 3 font déjà appel à une énergie renouvelable (1 chaudière bois et 2 PAC, cf. ci-dessus).

2 autres possibilités d'intégration d'EnR sont étudiées ici, sans lien avec le système de chauffage :

- une variante **CESI (chauffe-eau solaire individuel)** couplé au **gaz** sur la typologie 2-SFH, équipée en base d'une chaudière gaz double-service (chauffage + ECS)
- une variante **CET (chauffe-eau thermodynamique)** avec **poêle bois** sur la typologie 1TH, équipée en base d'un poêle bois + chauffe-eau électrique

⁴⁹ Le crédit d'impôts étant remplacé par MaPrimeRénov en 2020, ce calcul est typiquement remis en cause, au moins pour certaines catégories de ménages.

La méthode de calcul utilisée ici valorise le CESI avec un taux de couverture moyen annuel de 60%, et le CET par un COP moyen annuel de 2,0.

Étude de cas Typologie 2-SFH	Rénovation semi-globale « base » <i>Chaudière gaz (CH+ECS)</i>	Rénovation semi-globale « EnR » <i>Idem + CESI appoint gaz</i>	Rénovation complète et performante <i>Chaudière gaz (CH+ECS)</i>
Consommation (chauffage + ECS)	96,1 kWh _{EP} /m ² .an	79,5 kWh _{EP} /m ² .an	80,4 kWh _{EP} /m ² .an
Coût des travaux	66 550 €	74 100 €	66 600 €
Coût des travaux (aides déduites)	51 500 €	55 800 € (si cumul CITE) 57 800 € (plafond CITE)	52 600 €

Tableau 4 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie 2-SFH (4 étapes).

Ici, le **CESI** permet de gagner 17% sur les consommations de chauffage et d'ECS, et d'amener la rénovation semi-globale au niveau BBC rénovation (voir Tableau 4). Cette option reste toutefois **plus onéreuse** que la RCP (+10%), avec un temps de retour brut dégradé (28 ans contre 26 pour la RCP sur ce cas d'étude), et présente les mêmes risques liés au crédit d'impôts. Par ailleurs, ce parcours en 4 étapes n'assure pas l'atteinte d'une rénovation performante (l'intégration d'un CESI ne limite pas les risques pour le bâti liés à la complexité du traitement des interfaces et interactions).

Étude de cas Typologie 1-TH	Rénovation semi-globale « base » <i>Poêle bois + CE</i>	Rénovation semi-globale « EnR » <i>Poêle bois + CET</i>	Rénovation complète et performante <i>Poêle bois + CE surisolé</i>
Consommation (chauffage + ECS)	102,5 kWh _{EP} /m ² .an	67,9 kWh _{EP} /m ² .an	72,6 kWh _{EP} /m ² .an
Coût des travaux	48 200 €	51 900 €	47 700 €
Coût des travaux (aides déduites)	35 300 €	38 500 €	35 400 €

Tableau 5 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie TH-1 (4 étapes).

Dans ce cas de figure (Tableau 5), l'ajout d'un **chauffe-eau thermodynamique** (CET) amène la rénovation semi-globale à un niveau de performance BBC rénovation, pour un coût de l'opération toutefois supérieur à celui d'une RCP (+9%) et avec un temps de retour brut légèrement dégradé (11 ans contre 10 pour la RCP sur ce cas d'étude). Par ailleurs, ce parcours en 4 étapes n'assure pas l'atteinte d'une rénovation performante (l'intégration d'un CET ne limite pas les risques pour le bâti liés à la complexité du traitement des interfaces et interactions).

Consommations électriques

Les panneaux photovoltaïques sont fréquemment utilisés en maison individuelle. Leur vocation est de produire de l'électricité renouvelable de manière décentralisée. Le potentiel de production avec un kit standard de 3kWc est de l'ordre de 2 700kWh_{EF}/an à 3 300 kWh_{EF}/an, voire plus selon les régions.

Il pourrait sembler intéressant d'utiliser cette production renouvelable pour compenser une moindre performance des usages thermiques du bâtiment, cependant il convient d'encadrer cette pratique pour éviter de disposer d'un parc de « passoires thermiques photovoltaïques ». C'est d'ailleurs l'approche retenue par

Effinergie qui limite le recours au photovoltaïque dans le label BBC-Effinergie Rénovation⁵⁰ entre 12 kWh_{EP}/m²_{SRT.an} et 35 kWh_{EP}/m²_{SRT.an}, soit 500 à 1 500 kWh_{EP}/an environ pour une maison.

Les besoins électriques d'un logement sont les suivants :

- Ventilation : de l'ordre de 70 à 500 kWh_{EP}/an selon le type de ventilation
- Auxiliaires : de l'ordre de 100 kWh_{EP}/an pour un circulateur de chauffage
- Électricité spécifique : de 1 000 à 3 000 kWh_{EP}/an selon la sobriété des usagers

Avec un kit 3kWc, le taux de couverture des consommations électriques domestiques par la production photovoltaïque est donc souvent proche de 100%, et la production PV peut même s'avérer insuffisante⁵¹.

Par ailleurs, en prenant l'hypothèse qu'un logement équipé d'un kit 3kWc dédie la moitié de sa production PV à l'ECS (soit 1 500 kWh_{EP}/m², conformément au seuil du label BBC-Effinergie, le reste pour les usages électriques), 54% des besoins d'ECS sont couverts (sensiblement comme avec un CESI). La typologie retenue est la même que précédemment (1-TH). Le coût de la moitié du kit (1,5 kWc, moitié dédiée aux usages thermiques chauffage et ECS, l'autre moitié étant dédiée aux usages d'électricité spécifique) est légèrement supérieur à celui d'un CET (4 000€ HT contre 3 500 €HT).

Étude de cas Typologie 1-TH	Rénovation semi-globale « base » <i>Poêle bois + CE</i>	Rénovation semi-globale « EnR » <i>Poêle bois + CET</i>	Rénovation semi-globale « EnR » <i>Poêle bois + PV</i>	Rénovation complète et performante <i>Poêle bois + CE surisolé</i>
Consommation (chauffage + ECS)	102,5 kWh _{EP} /m ² .an	67,9 kWh _{EP} /m ² .an	65,2 kWh _{EP} /m ² .an	72,6 kWh _{EP} /m ² .an
Coût des travaux	48 200 €	51 900 €	52 400 €	47 700 €
Coût des travaux (aides déduites)	35 300 €	38 500 €	39 500 €	35 400 €

Tableau 6 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie TH-1 (4 étapes).

Dans ce cas de figure, la **production PV excédentaire** permet, comme le ferait un CET, d'amener la rénovation semi-globale à un niveau de performance BBC rénovation, pour un coût de l'opération équivalent, mais toujours supérieur à celui d'une RCP (+10%). Par ailleurs, ce parcours en 4 étapes conserve les mêmes risques de développement de pathologies avec ou sans PV et n'améliore pas le confort pour les occupants.

⁵⁰ <https://www.effinergie.org/web/index.php/les-labels-effinergie/effinergie-renovation>

⁵¹ La vente éventuelle du surplus a surtout vocation à éviter le stockage (injection/soutirage à l'échelle quotidienne et saisonnière, selon des profils spécifiques à chaque usager) et/ou à optimiser l'équilibre économique de l'installation.

En conclusion de cette partie, il semble :

- **Souhaitable et même nécessaire d'intégrer aussi souvent que possible une EnR pour le chauffage** des maisons rénovées en une ou deux étapes (poêle ou chaudière à bois, PAC) ;
- **Parfois possible** d'amener une rénovation en 3 ou 4 étapes au niveau de performance BBC rénovation avec **une production ECS** partiellement renouvelable (CESI, CET, système PV) bien que cela coûte systématiquement **plus cher que de se réaliser directement une RCP** ;
- Mais il est important de viser l'objectif BBC rénovation tout en assurant la préservation du confort, de la santé et du bâti. Or, **une rénovation en 4 étapes ou plus risque de générer de l'inconfort pour l'occupant et des risques de pathologies dans les parois (points froids, ponts thermiques, ...).** En conséquence, l'occupant va augmenter la température de consigne pour compenser cet inconfort et sur-consommer : le bilan énergétique sera donc dégradé même en présence d'énergies renouvelables.

5. L'accompagnement des ménages dans la durée, jusqu'à la performance

Il ressort de la lecture des chapitres précédents que le **projet de rénovation** doit évidemment être accompagné **sur le plan technique**, de la conception à la mise en œuvre, afin d'établir la feuille de route initiale et les préconisations techniques propres à assurer la qualité de la rénovation, dans le détail. Différentes options s'offrent au ménage : s'entourer des services d'un maître d'œuvre ou traiter directement avec des entreprises, le cas échéant une entreprise générale, une coopérative ou un groupement formel ou informel d'artisans, qui, dans tous les cas, doivent être formés techniquement et savoir se coordonner pour assurer la qualité de réalisation.

Pour autant, il est nécessaire d'**accompagner également le ménage tout au long du processus qui doit l'emmener vers la réalisation d'une rénovation performante**, en plusieurs étapes le cas échéant. Cet « accompagnement » n'est pas exclusivement technique, il s'inscrit dans un **temps long** et devrait intégrer les aspects suivants :

- Une action de **communication nationale**, afin de faire évoluer le(s) discours formant le « bruit de fond » autour de la rénovation énergétique, dans lequel le ménage « baigne » au moment d'engager son projet, et qui doit être précédée et complétée d'un ciblage marketing des ménages enclins à mener ce type de rénovations (persona),
- Une action d'incitation, par la mise en place d'un **système d'aides financières** favorisant les rénovations performantes, saines et confortables, complètes ou par étapes,
- Une action de **sensibilisation** des ménages aux enjeux de la rénovation énergétique, de **conseil** et d'**aide à la décision** intégrant les points de vigilance liés à la complexité technique (notamment les interfaces entre lots, la hiérarchisation et l'ordonnancement des travaux), et préfigurant l'accompagnement technique approfondi mentionné précédemment,
- Un suivi dans la durée, au-delà d'une 1^{ère} étape de travaux, qui implique de mettre au point **des process et outils** permettant de suivre le projet et de stimuler le ménage, jusqu'à la réalisation effective de la dernière étape de travaux menant à la performance, en intégrant la programmation des investissements nécessaires.

5.1. Communication nationale et « bruit de fond »

Dans ce domaine, les sciences humaines et sociales permettent d'appréhender les phénomènes sociaux qui influencent le comportement des ménages. Par exemple, les travaux menés conjointement par Viviane Hamon Conseil, Batitrend et Gaëtan Briseperre dans le cadre du CeDRe permettent d'éclairer la notion d'**écosystème de prescripteurs** autour des ménages, comme l'illustre la Figure 82.

La rénovation peut être perçue comme anxiogène pour les ménages, qui reçoivent et cherchent beaucoup d'informations préalables. Les différents messages reçus sont généralement très discordants, avec :

- des discours très « émotionnels » via les **mass-media** et le **bouche-à-oreille**, qui s'appuie sur une expérience client souvent unique (« mon beau-frère a installé une PAC il en est très satisfait »...),
- et des discours plus « rationnels » (experts, neutres, indépendants...) : ceux des **institutions, services publics, signes de reconnaissance**, qui sont plus confidentiels ou pas du tout à la hauteur des enjeux portés par la loi TECV.

ORGANIGRAMME FONCTIONNEL :

LES ACTEURS AVEC LESQUELS LE PROPRIÉTAIRE-OCCUPANT EST SUSCEPTIBLE D'ÊTRE EN RELATION DANS LE CADRE D'UN PROJET D'AMÉLIORATION DE L'HABITAT

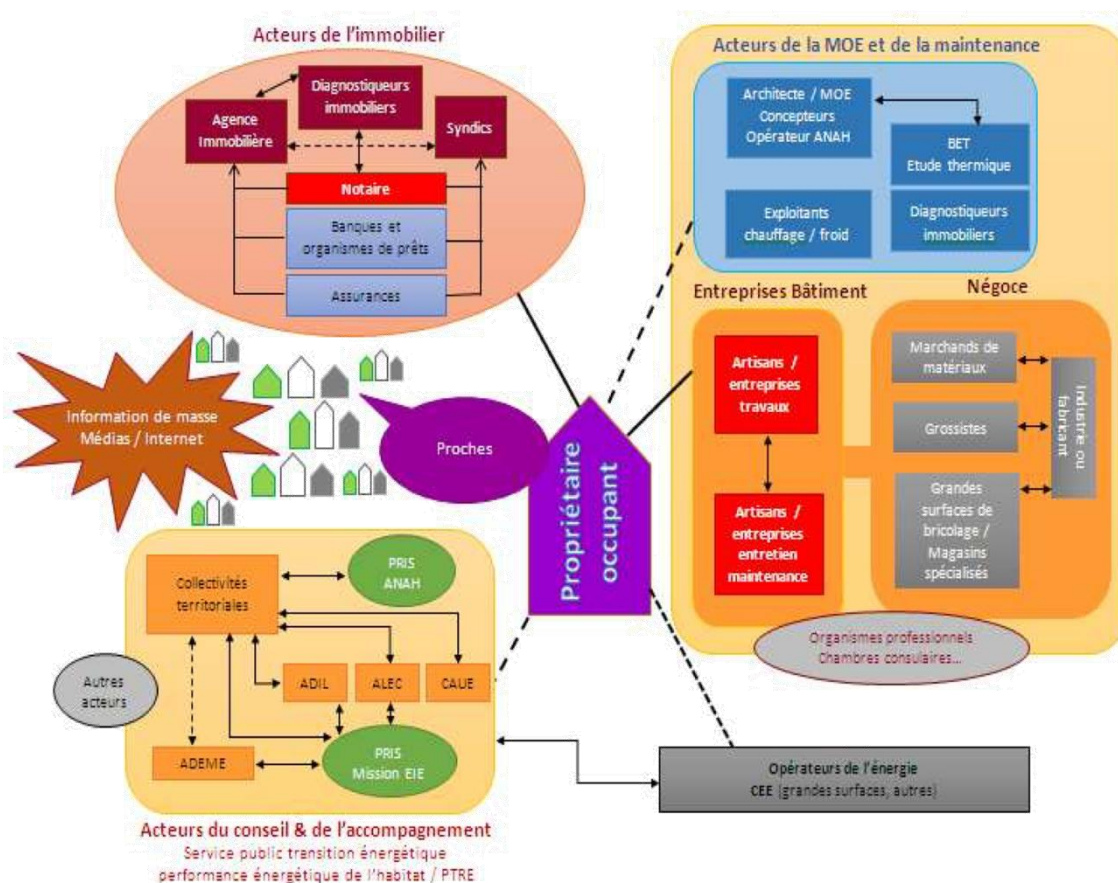


Figure 82 : Un écosystème de prescripteurs. Source : Bourgogne Bâtiment Durable.

Quant aux **artisans**, qui sont souvent les premiers consultés par un ménage pour un projet de rénovation (cf. Figure 83), ils ont généralement un discours commercial qui « suit le marché » et les tendances, naturellement centré sur leur propre corps de métier, plutôt que sur l'intérêt et les enjeux multi-métiers de la rénovation performante (sauf quelques exceptions qui se positionnent à l'avant-garde et cherchent à se démarquer en se regroupant avec d'autres professionnels afin de proposer une offre globale).

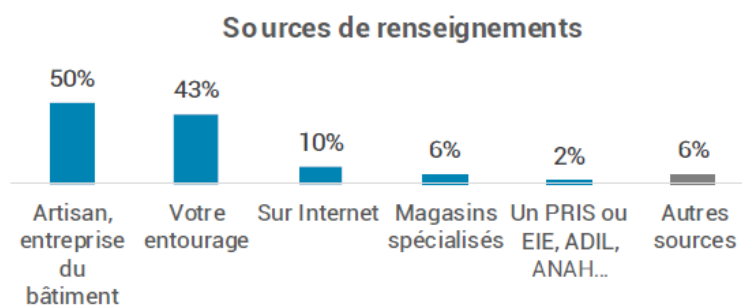


Figure 83 : Les sources de renseignements préalables à tout projet de rénovation pour les particuliers⁵².
Source : Diagnostic initial de la rénovation énergétique du logement privé – Consolidation Rhône-Alpes, CERA, 2015.

A partir de ce tableau assez pessimiste, voici quelques propositions sur l'accompagnement :

- **Au niveau national**, décliner opérationnellement l'objectif programmatique de la loi TECV implique en premier lieu d'infléchir le discours sur la rénovation énergétique pour bien **ancrer dans les esprits l'objectif de rénovation performante** de tous les bâtiments à horizon 2050 plutôt que le « business as usual ». Les réseaux sociaux notamment, sont de nature à faire évoluer progressivement le « bruit de fond » et par là-même les normes sociales. Bien entendu ceci n'est possible que par une **cohérence de l'action publique**, qui doit en parallèle se décliner en termes de formation des professionnels, de soutien aux services publics d'accompagnements (conseillers FAIRE, SARE...), d'incitations financières adaptées (cf. §5.2) et d'une obligation progressive de rénovation.
- **A l'échelle locale**, la mise en cohérence des discours entre acteurs de divers services publics (conseillers FAIRE et opérateurs ANAH, ADIL, CAUE, etc.) par des formations communes, des temps d'échanges et d'harmonisation des pratiques, de manière à **produire de la lisibilité pour les ménages bénéficiaires** du service. Parmi ces pratiques, la posture d'accompagnement aux changements permet, par une véritable écoute de leurs besoins, de rassurer les ménages et de positionner chaque accompagnant(e) en véritable *interlocuteur* de confiance, pour aller plus loin que le positionnement institutionnel de *tiers* de confiance.
- Enfin, il semble intéressant d'**emmener les artisans** eux-mêmes, qui sont les premiers prescripteurs, dans l'aventure. Il faut accompagner leur montée en compétence technique et organisationnelle (travail en groupements) pour leur permettre de constituer une véritable stratégie commerciale. A court terme, les artisans doivent **avoir la capacité de porter non seulement une offre pertinente, mais un discours semblable à celui des acteurs des services publics** (Espaces Conseil FAIRE). Le dispositif Dorémi en est un exemple (formation-action, book de réalisations, page web, kit vidéo⁵³...).

⁵² Précisons qu'il existe un biais dans ce type d'enquête : les ménages qui font appels aux services des PRIS, EIE, etc. ne connaissent pas nécessairement ces acronymes et pourraient donc ne pas signaler avoir fait appel à ces services... ce qui ne remet pas en cause le propos : les artisans sont une source de renseignements première, qui pourra être contradictoire ou cohérente avec les autres discours...

⁵³ Par exemple avec les vidéos et articles accessibles sur le blog <https://renovation-performante.fr/>

La précarité énergétique, un enjeu majeur

Le programme « Habiter Mieux Sérénité » de l'ANAH est conçu pour aider les projets de rénovation permettant un gain énergétique de 25% minimum. Ce programme propose des aides financières conséquentes (jusqu'à 19000€, en date de rédaction de ce rapport), ciblant spécifiquement les ménages dits « modestes » et « très modestes », dont les revenus sont inférieurs à un plafond de ressources, et qui ont donc un risque plus grand de se trouver en situation de précarité énergétique.

A climat constant et confort équivalent, l'augmentation des prix de l'énergie conduit mécaniquement à augmenter la facture de chauffage à confort équivalent, et donc accentue chaque année le nombre de ménages en précarité énergétique. L'Institut négaWatt a alerté dans son rapport de 2018 (Institut négaWatt - Résorber la précarité, 2018) sur le risque des rénovations peu performantes, qui « **conduisent à sortir les ménages de la précarité énergétique pour quelques années seulement.** » L'augmentation tendancielle des prix de l'énergie conduit à ce que ces ménages retombent dans la précarité en quelques années seulement, « *sans possibilité d'investir de nouveau dans le logement, les travaux complémentaires qu'il faudrait mener pour atteindre le niveau de performance nécessaire n'étant plus rentables* ».

En effet, si l'on considère une hypothèse de 4%/an d'augmentation des prix de l'énergie, conformément à la moyenne 2005-2016 pour le gaz et l'électricité (source Pégase/MEDDE), un calcul simple montre qu'une facture de chauffage - hors abonnement - retrouve son niveau initial au bout de :

- **9 ans** pour un gain énergétique de 25% (seuil pour l'obtention des aides Habiter Mieux Sérénité)
- **14 ans** pour un gain énergétique de 40% (niveau d'économie demandé par la Banque Européenne d'Investissement par exemple, et niveau fréquemment constaté sur les projets financés par l'ANAH où les rénovations atteignent en général la classe énergétique D sur le DPE)
- contre **37 ans** pour un gain énergétique de 75% (facteur 4, seuil minimum visé en rénovation performante ; pour un facteur 6, régulièrement atteint avec ces rénovations performantes, la période est de 54 ans pour retrouver le même niveau de facture de chauffage).

Par ailleurs, 45% des projets de rénovation complète et performante menés dans le cadre de Dorémi concernent des ménages éligibles à ce programme d'aides, ce qui montre qu'il est possible pour un ménage modeste ou très modeste d'accéder à une rénovation complète et performante, en bénéficiant d'un accompagnement pertinent et d'un plan de financement adapté.

Au-delà du « bruit de fond » qui concerne tout le monde, chaque ménage, chaque personne qui le compose et qui décide in fine d'engager un tel projet, le fait sur la base de motivations particulières.

Le projet de recherches RESSORT⁵⁴, porté par l'Institut négaWatt, ISEA Projects et le laboratoire PACTE de l'Université de Grenoble entre 2016 et 2019, soutenu financièrement par l'ADEME, a permis d'identifier différents profils de ménages dont certains sont plus enclins à réaliser une rénovation complète et performante, et d'autres à engager plutôt une rénovation par étapes, et qu'il faudra accompagner dans la durée.



⁵⁴ En savoir plus et consulter les publications du projet RESSORT : <http://www.institut-negawatt.com/ressort-p23.html>



Figure 84 : Les différents profils de ménages identifiés lors du projet RESSORT

Ce « **ciblage marketing** » pourrait être utilisé à bon escient par des accompagnants mieux outillés en matière de savoir-faire commercial, au sens noble du terme, à savoir être à **l'écoute des besoins** particuliers de chaque ménage, et aboutir à un point de convergence entre leurs motivations propres et l'intérêt général, représenté ici par les objectifs de la politique publique de rénovation performante.

5.2. Incitation financière

Depuis les années 2000, l'État et les collectivités locales misent sur une incitation financière pour emmener les ménages vers la rénovation énergétique. Les dispositifs d'aides sont nombreux (crédits d'impôt, aides de l'ANAH, prêts à taux zéro, TVA réduite, primes CEE, aides locales, MPR, Action Logement, Caisses d'Allocations Familiales, caisses de retraites...), complexes et non coordonnés. Les critères d'attribution, qu'ils soient liés au projet de rénovation (performance technique, accompagnement, suivi, contrôles...) ou au ménage (statut de propriétaire occupant ou bailleur, conditions de ressources, etc.) ne sont pas harmonisés, ce qui contribue à brouiller le discours auprès des ménages bénéficiaires.

De plus, ces dispositifs incitent pour la plupart à la réalisation de « gestes de rénovation », c'est-à-dire de rénovations partielles, potentiellement pathogènes, et qui n'atteignent pas l'objectif de performance à terme (voir Partie 3). De plus, en fléchant les financements publics vers la réalisation des premières étapes de travaux, ces dispositifs mettent en péril la réalisation des dernières étapes de travaux dont l'acceptabilité est déjà difficile (gêne occasionnée par les différentes vagues de travaux précédentes) et dont le temps de retour sur investissement explose, comme le montre l'étude de cas ci-dessous.

Enfin, 39% des gestes de rénovation sont réalisés en auto-rénovation totale ou partielle par les ménages, et même plus de 50% des rénovations des murs et des planchers bas (ADEME TREMI, 2018). Or les actions conduites aujourd'hui en auto-rénovation peuvent être contre-productives pour l'atteinte des objectifs de performance à terme, et souvent pathogènes (exemples : épaisseurs d'isolant trop faibles, absence ou discontinuité de la membrane d'étanchéité à l'air, absence de ventilation dans le logement). Compte tenu du nombre très élevé de gestes de travaux, cette démarche d'auto-rénovation nécessiterait d'être étudiée, soutenue, accompagnée et rigoureusement encadrée pour qu'elle permette d'atteindre les objectifs de performance, en articulation avec les interventions des professionnels.

Étude de cas : les impasses de la rénovation

*Ci-contre : illustration de la typologie 3-SFH utilisée pour cette étude de cas.
Source : (TABULA Episcopo, 2015). Étude de cas inspirée de retours terrain.*



M et Mme X, ménage modeste, habitent une maison individuelle construite dans les années 1960 et chauffée au fioul. Non isolée, cette maison est en classe G du DPE.

Conscients de leur facture élevée (3 450 €/an pour chauffage, ECS, électricité des auxiliaires – chauffage et ventilation, abonnements compris), ils contactent un artisan qui leur propose une **pompe à chaleur air-eau** en remplacement de leur chaudière fioul et du ballon électrique.

L'artisan leur propose une PAC de 20 kW double service non modulante, pour environ 13 000 € TTC. Cette action bénéficiant de MaPrimeRenov, de CEE et de CEE « coup de pouce », il reste environ 6 000 € à payer. Le couple mobilise un éco-prêt à taux zéro pour financer cette somme et n'a pas mobilisé de fonds propres. Leur facture chute à 2 150 € par an, le ménage est satisfait.

Dans les années suivantes, ils sont contactés successivement par deux entreprises qui leur proposent **l'isolation des combles à 1€** puis **l'isolation du plancher bas à 1€**. Ces travaux réalisés, leur facture descend encore à 1 800 € par an, avec un temps de retour instantané.

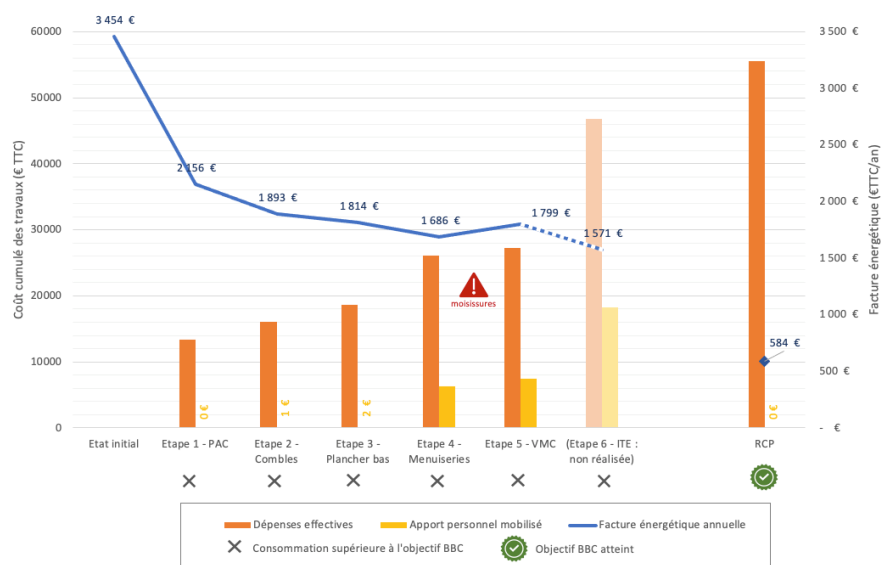
Quelques années après, le couple souhaite **changer les menuiseries** qui sont largement défraîchies. Un artisan leur propose du double vitrage actuel en pose « rénovation » et le changement de la porte d'entrée pour environ 7 400 € TTC. Malgré MaPrimeRenov et les CEE, il reste 6 300 € à financer, or l'éco-PTZ n'est plus disponible car déjà mobilisé plus de 5 ans auparavant. Le couple devra payer de sa poche, ce qu'il fait. De plus, au bout de quelques mois, des moisissures apparaissent au-dessus de la douche. Après avoir questionné un spécialiste, le couple se rend compte que leur maison est à présent plus étanche à l'air et qu'il leur faut une ventilation mécanique. Ils font donc installer une **VMC hygroréglable** en urgence pour 1 200 € TTC, et bénéficient de CEE, soit 1 100 € de plus à financer sur fonds propres. La facture ne baisse qu'un peu mais, comme l'envie de changer les fenêtres était surtout motivé par l'usage, le couple n'en est pas conscient. En revanche, ils sont devenus très méfiants vis-à-vis de la rénovation à la suite de la pathologie qu'ils ont subie.

Pendant ce temps, leurs voisins, M et Mme Y, ménage modeste également, ont réalisé une **rénovation complète et performante** de leur maison, en tous points identique, pour 55 500 €_{TTC} environ. Après déduction de 27 300 € d'aides directes (MaPrimeRenov, CEE et CEE « coup de pouce »), il leur restait 28 200 € environ à financer par un éco-PTZ. **Ils n'ont engagé aucun apport personnel**, pour une opération dont le temps de retour est inférieur à 10 ans. Ils ont quasiment divisé sa facture annuelle par 6 (performance thermique des isolants et menuiseries plus élevées, les 6 postes de travaux traités), **sans pathologies** (bon traitement des interfaces) et **avec un air sain** (VMC double-flux). M et Mme Y se sentent bien dans leur maison, été comme hiver, et dans leur budget mensuel, le **gain sur la facture énergétique** (239€/mois de moins) **compense largement les mensualités de l'éco-PTZ** (167€/mois).

Attirés par les faibles factures énergétiques de la famille Y, M et Mme X **se renseignent pour réaliser une ITE**, dernier poste à améliorer. Mais le devis à environ 19 500€, réduit à 11 000 € grâce à MaPrimeRenov et aux CEE, mais non finançable par un éco-PTZ, leur semble beaucoup trop cher, surtout avec l'argent engagé quelques années auparavant. L'artisan, formé à la rénovation performante, leur indique également que la PAC est déjà surdimensionnée et devra être remplacée.

Par ailleurs, ils n'ont aucune envie de se relancer dans les dérangements que provoquent les travaux ni de risquer à nouveau une pathologie (de fait, les menuiseries n'ont pas de dormants élargis, il y aura un pont thermique en tableaux qui ferait moisir l'ancien dormant bois recouvert par la pose « rénovation » ; et d'autre part, l'isolation des combles à 1€ a été faite sans recouvrir la tête de mur, donc il y aurait un pont thermique important à la jonction plafond - mur).

Le couple décide donc de ne pas réaliser ces travaux et la facture énergétique de la maison reste à 1 800 €/an soit 3 fois plus que leurs voisins.



L'écart de coût de travaux entre les deux parcours correspond à la meilleure performance de chaque poste de travaux pour le parcours RCP (ventilation double flux, épaisseurs d'isolant plus élevées, membranes d'étanchéité à l'air, ...) et au bon traitement des interfaces (bonne étanchéité à l'air du projet, peu de ponts thermiques).

Cette étude de cas illustre comment les subventions actuelles incitent à réaliser certains travaux à temps de retour très court, **rendant non rentables et non finançables les dernières étapes** pourtant nécessaires pour atteindre la performance à terme. Ces pratiques sont des « **impasses** » dans le **parcours de rénovation** et mènent le plus souvent à « **tuer le gisement** » d'économies d'énergie.

Pour éviter cela, une véritable **stratégie de rénovation performante par étapes** doit intégrer une programmation des investissements sur l'ensemble des étapes, en calculant le temps de retour et la trésorerie mobilisée par les ménages à chaque étape. Ce plan de financement viendrait enrichir la feuille de route de rénovation récapitulant le phasage des étapes retenu en prenant en compte à la fois les contraintes techniques et le plan de financement. Il y a donc lieu de **poursuivre l'évolution des aides publiques actuelles en faveur des rénovations performantes**, complètes ou par étapes.

5.3. Sensibilisation, conseil, aide à la décision

Comme la réorganisation des soutiens financiers ou du travail des professionnels, l'accompagnement des ménages doit faire l'objet d'une évolution forte pour faire monter en puissance la performance dans les rénovations énergétiques. Le point prioritaire à prendre en compte est la **nécessité de projeter le ménage dans sa maison « saine, confortable et économe », donc dans sa maison performante à terme**. L'enjeu est que le ménage comprenne l'intérêt d'une maison performante, puis envisage le parcours de travaux non plus à partir de quelques gestes, mais comme un ensemble de 6 postes de travaux avec ses interfaces, l'enlèvement d'un poste conduisant à une grande complexité et à des risques. Cette nouvelle démarche d'accompagnement, expérimentée par Dorémi, si elle ne permet pas toujours d'aboutir à une rénovation complète et performante, permet de faire monter très significativement le nombre de postes de travaux traités par la première étape de rénovation, et donc de minimiser les complexités, les difficultés et les risques de la rénovation.

Pour aller plus loin dans la mise en cohérence des discours sur la rénovation énergétique, il semble indispensable d'outiller les accompagnants et les professionnels afin que ceux-ci puissent mieux asseoir leurs argumentaires, et gagner en puissance d'accompagnement.

Les points de vigilance à avoir en tête avant d'engager un projet de rénovation sont méconnus du grand public. Les publications sur le sujet ne leur sont pas destinées, ni même aux artisans, et restent réservées à un public de « sachants ».

Pour étayer cet argumentaire, au-delà du présent rapport et en attendant le développement d'outils plus directement destinés aux ménages, voici quelques exemples de publications qui pourront être consultées :

- Les fiches techniques « rénovation par étapes » de l'AQC⁵⁵,
- La « guidance wheel » proposée par le CREBA⁵⁶, adaptée d'un projet de recherche britannique,
- Le rapport « Stratégie de rénovation » du PACTE (PACTE Stratégie de rénovation, 2017).

Il est par ailleurs fondamental de pouvoir mettre à la disposition des ménages et des accompagnants un outil d'aide à la décision qui permette de sensibiliser, conseiller et guider le ménage dans ses choix, en toute connaissance de cause. Cet outil devra être très opérationnel, et à cet effet, vulgariser les points de vigilance et préconisations techniques dont quelques exemples sont présentés dans cette étude (cf. partie 2).



⁵⁵ <https://qualiteconstruction.com/wp-content/uploads/2018/12/PT-Renovation-Energetique.pdf>

⁵⁶ <http://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/fr/outils/guidance-wheel>

5.4. Suivi et accompagnement dans la durée

Comment accompagner les rénovations performantes par étapes, qui par définition s'inscrivent dans la durée : sur 5, 10, 15 ans ?

Il apparaît nécessaire de suivre le *projet* de rénovation tout au long d'une feuille de route, et également le *ménage* au moyen d'un process d'accompagnement et vraisemblablement d'un outil numérique dédié (c'est la logique de CRM – Customer Relationship Management – souvent incontournable dans le domaine commercial pour gérer la relation avec un client dans le temps long). Les « passeports rénovation » entrent dans cette logique de définir par anticipation une feuille de route et alimenter un carnet de vie numérique du logement, pour en suivre la réalisation au fur et à mesure.

Sur ce dernier point, un benchmark des **outils numériques** existants (voir Figure 85) réalisé en 2018 par Dorémi, révèle que la plupart d'entre eux sont plutôt centrés sur la phase de conseil avant travaux. Issus pour la plupart de logiques de diagnostic énergétique, ils servent principalement à affiner le projet, définir le programme de travaux, en vue d'engager le ménage à consulter les entreprises. Parfois, un suivi de performance post-travaux est envisagé, sur la base de relevés de factures ou d'index de compteurs. La phase travaux est largement absente, alors que les **enjeux de coordination et de suivi de la qualité des travaux réalisés** sont primordiaux au vu du niveau de performance visé (cf. parties 2, 3 et 4 de cette étude).

De plus, la **traçabilité des travaux réalisés**, au niveau des détails d'interfaces, est essentielle en ce qu'elle permet aux artisans qui interviendront 5, 10 ou 15 ans plus tard, de prendre connaissance des précautions prises lors des étapes précédentes, et des anticipations qui leur permettront de réaliser des interfaces de qualité et à moindre frais. **Un véritable carnet de vie numérique du logement se doit d'aller à ce niveau de détail si l'on souhaite atteindre la performance par étapes.**

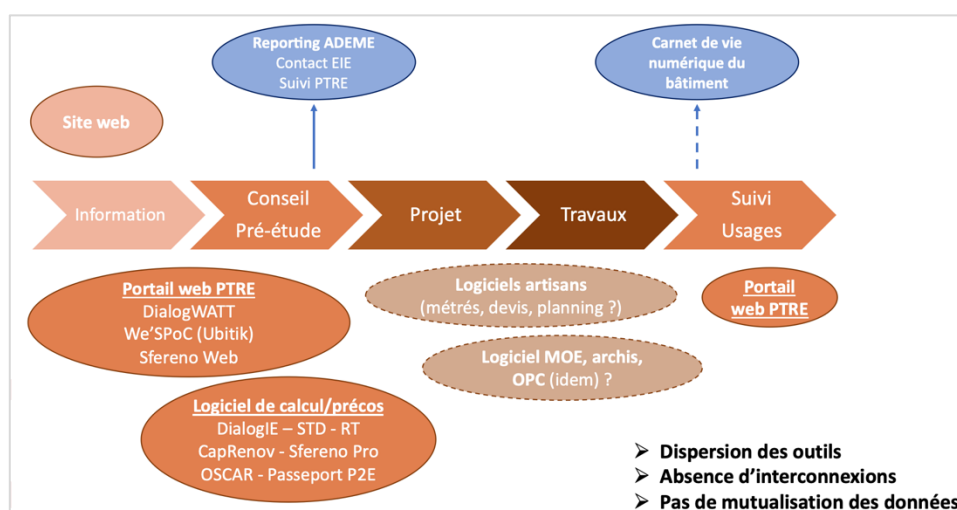


Figure 85 : Benchmark des logiciels d'accompagnement des projets de rénovation énergétique, Dorémi, 2018

Signalons tout de même le **logiciel RenOPT**, réalisé pour la Région Grand Est dans le cadre d'un projet financé par le PACTE⁵⁷, qui a vocation à outiller les artisans pour la réalisation de rénovations performantes en formation-action, avec un **focus particulier sur la phase travaux et la coordination au sein d'un groupement**, autour des interfaces entre corps de métier. Développé en open-source et encadré par une licence logicielle libre, cet outil pédagogique pourrait évoluer et alimenter à l'avenir un carnet de vie numérique du logement, au niveau de détail requis, et être étendu aux rénovations par étapes performantes à terme.

⁵⁷ <https://www.programmepacte.fr/renopt-outil-numerique-oktave>

Par ailleurs, le suivi du bâtiment rénové doit être complété d'une approche envers les **usagers** du bâtiment, par le service accompagnant la rénovation par étapes performante à terme.

Ici encore, c'est une action d'inspiration commerciale qui doit permettre de susciter l'envie d'aller plus loin dans le projet de rénovation, d'enclencher les étapes suivantes, et ultimes, jusqu'à l'atteinte du niveau de performance requis. Un process dédié reste à inventer, en s'appuyant sur les logiques CRM et les outils numériques évoqués ci-dessus, ainsi que sur le précédent des diagnostics immobiliers, qui ont su s'imposer et dont la transmission est assurée lors des mutations.

Ce suivi et sa transmission sont loin d'être anecdotiques sachant qu'un logement change de propriétaires tous les 7 à 10 ans en moyenne, selon la conjoncture.

Enfin, il paraît important **de dynamiser l'offre privée d'accompagnement à la rénovation énergétique et notamment sur les sujets techniques (diagnostic, conception, suivi de chantier, suivi des consommations)** et d'apporter des aides financières dédiées afin de pouvoir accompagner le ménage techniquement sur la conception, la réalisation et le suivi des travaux, mais aussi la coordination des entreprises et des travaux.

Principales conclusions

L'étude « Rénovation performante par étapes » vise à **identifier les conditions de réussite permettant d'atteindre la performance à terme en rénovation par étapes, en moyenne, sur le parc de maisons individuelles**. L'étude s'appuie sur les enseignements issus de 2 approches : qualitative et calculatoire.

En premier lieu, l'étude **définit la notion de performance** : pour être qualifiée de « performante », la **rénovation énergétique se doit en premier lieu d'être saine, non-pathogène et confortable** ; elle doit par ailleurs atteindre un **objectif de consommation énergétique** (voir Figure 86). Une **rénovation performante conduite par étapes** se doit donc d'atteindre un niveau de consommation d'énergie à terme, tout en préservant le bâti, la santé et le confort des occupants **à chacune des étapes de travaux**, puisque l'étape suivante peut n'intervenir que plusieurs années après la précédente.



Figure 86 : Définition de la rénovation performante (Source : Dorémi).

L'étude démontre que, pour l'essentiel, **les rénovations énergétiques actuelles sont des rénovations partielles (donc non performantes à terme)**, même quand elles préconisent des travaux dits « BBC-compatibles », car ces rénovations font généralement **l'impasse sur le traitement des interfaces (liens physiques entre postes de travaux) et des interactions (dimensionnement des systèmes notamment) entre postes de travaux**. La correction ultérieure de ces interfaces, pour permettre à la rénovation de devenir performante, nécessiterait des **travaux supplémentaires complexes et exigeants** dans le soin à y apporter pour ne pas altérer les produits déjà posés, ainsi qu'un **budget supérieur** pour refaire des parties de travaux et/ou réaliser de nouveaux travaux complémentaires. **Les rénovations dites partielles, même celles dites « BBC-compatibles », ne permettent pas d'atteindre les objectifs BBC-rénovation à terme**, induisent par ailleurs des **risques de pathologies** et ont très peu de chances d'être menées à terme. Elles constituent la plupart du temps des « **impasses de rénovation** » pour la performance énergétique.

L'analyse calculatoire conduite dans l'étude⁵⁸ démontre que les écarts relatifs entre les parcours de travaux sont significatifs (cf. Figure 87) : un programme de rénovation composé de travaux dont chacun atteint la performance intrinsèque au niveau BBC rénovation (résistance thermique d'une paroi opaque, conductivité thermique d'une paroi vitrée, rendement d'un système de chauffage, etc.) **permet effectivement d'atteindre un niveau de performance « BBC rénovation ou équivalent » en moyenne sur le parc en 1 ou 2 étapes si les interfaces sont bien traitées. Cependant, la consommation énergétique moyenne du parc augmente de + 30% si le parcours de travaux est mis en œuvre en 3 ou 4 étapes, et à jusqu'à +60% si le parcours de travaux est conduit en 6 étapes.**

⁵⁸ Les hypothèses et la méthodologies sont présentées en détail en annexe au présent rapport.

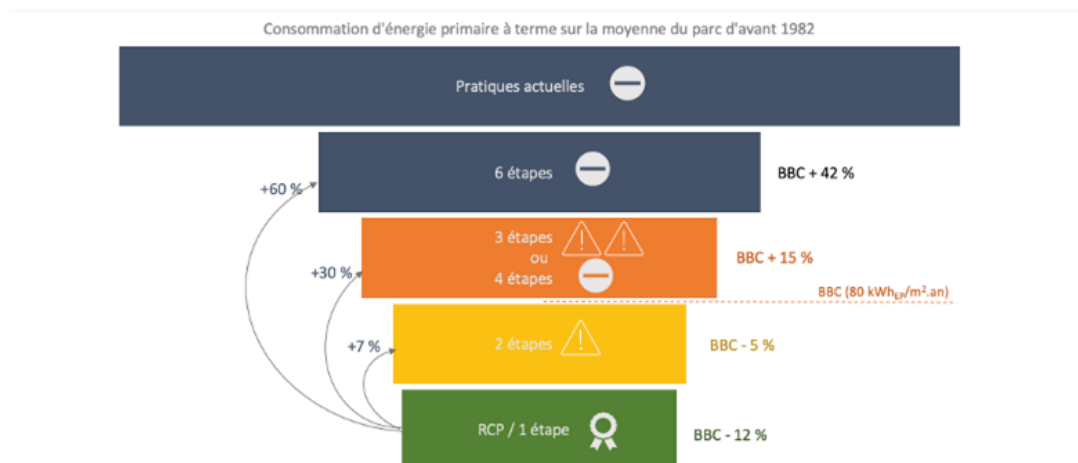


Figure 87 : Écarts de consommation sur la moyenne du parc construit avant 1982 entre les différents parcours de rénovation selon le nombre d'étapes, et écart à l'objectif BBC rénovation ou équivalent.

Légende : RCP = Rénovation Complète et Performante ;

⊖ : parcours ne permettant pas d'atteindre les objectifs de consommation BBC rénovation ni le confort pour les occupants, leur santé, la préservation du bâti et pouvant générer des impasses de rénovation ;

⚠ : parcours comportant des risques pour le confort, la santé et/ou la préservation du bâti mais pouvant parfois atteindre les objectifs de consommation BBC rénovation sous conditions fortes ;

⚠ : parcours pouvant atteindre le niveau BBC rénovation sous conditions et préservant santé et confort pour les occupants et préservation du bâti ;

🏆 : parcours permettant d'atteindre les objectifs de consommation, de confort et santé pour les occupants et la préservation du bâti.

Les retours d'expérience présentés dans l'étude et les calculs réalisés précisent les conditions de réussite d'une rénovation performante par étapes :

- Les **6 postes de travaux énergétiques** doivent être traités (cf. Figure 88) ;
- Les **différentes interfaces et interactions** entre postes doivent être anticipées et traitées, simultanément ou non ;
- L'installation d'un système de **renouvellement d'air suffisant** doit être prévue ;
- Le nombre d'étapes de travaux doit être limité à 3 au maximum, en regroupant **4 à 5 postes de travaux judicieusement choisis dans la première étape**, dont la ventilation.

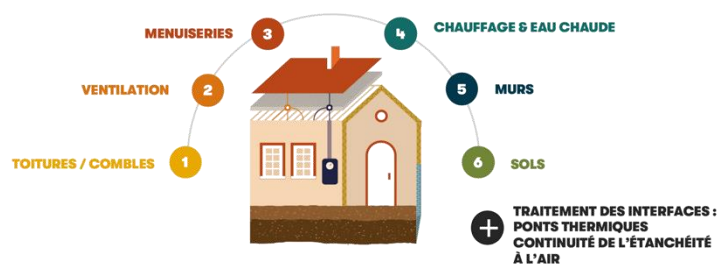


Figure 88 : Schéma des 6 postes de travaux nécessaires à la performance thermique (source : Dorémi).

Le regroupement de postes de travaux doit être réalisé selon une analyse multicritères qui dépend non seulement du (des) poste(s) reporté(s) mais également des techniques de rénovation retenues pour le projet et du mode constructif du logement (général / chéneaux / débord de toit, position de la menuiserie dans mur, nature des planchers...). Ces configurations doivent donc être analysées selon :

- la **faisabilité technique** (isolation périphérique du plancher décorrélée de l'ITE par exemple),
- le **risque de pathologie** (l'isolation de murs anciens en absence de systèmes de renouvellement d'air augmente fortement les risques de développement d'humidité dans les murs, par exemple),

- **l'augmentation des coûts financiers et des freins psychologiques** (le remplacement des fenêtres de toit avant sarking nécessitera leur déplacement et les reprises associées au moment du sarking, par exemple),
- le **dimensionnement des équipements** (remplacement de systèmes de chauffage avant amélioration de plusieurs postes de l'enveloppe et diminution des besoins : court-cycles, perte d'efficacité) ; sur ce sujet, il apparaît essentiel que les industriels proposant des systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire travaillent à l'optimisation de leurs systèmes pour qu'ils puissent mieux s'adapter à la rénovation énergétique des logements.

Les **énergies renouvelables (EnR) pour le chauffage** (poêle bois, chaudières bois, pompes à chaleur, solaire thermique) doivent être intégrées prioritairement sur toutes les maisons pour des parcours en une à trois étapes. Cependant, la **compensation** du moins bon bilan énergétique d'un parcours en quatre étapes ou plus **par une production EnR n'est pas souhaitable** : l'investissement nécessaire dépasse systématiquement le coût d'une rénovation complète (en une seule étape). Par ailleurs, la multiplicité du nombre d'étapes de ces parcours compensés par énergies renouvelables risque de générer une mauvaise qualité d'air intérieur (report de la ventilation notamment), des **pathologies** dans les parois (humidité dans les murs, ponts thermiques, etc.) et donc un **inconfort** pour les occupants : dans ce cas, la température de consigne est augmentée pour **compenser cet inconfort impliquant une surconsommation**, même avec l'ajout d'énergies renouvelables. Pour atteindre et assurer un maintien de la performance dans le temps (bilan énergétique et confort pour les occupants), il est donc **préférable de réduire le nombre d'étapes de travaux, plutôt que d'investir dans des EnR pour compenser une consommation d'énergie trop élevée** liée au nombre d'étapes.

Enfin, pour atteindre les objectifs de rénovation performante du parc avec les parcours en 2 et 3 étapes, il est nécessaire de travailler sur des outils d'accompagnement à destination des professionnels et des ménages :

- **outils d'accompagnement à la rénovation énergétique par étapes sur chantier** pour les professionnels intervenant en maison individuelle, permettant en particulier de **traiter les cas complexes d'interfaces et interactions par étapes** ;
- **outils de sensibilisation des maîtres d'ouvrage aux risques et impasses en rénovation par étapes** ;
- dispositifs **d'accompagnement des parcours de rénovation performante par étapes dans la durée** permettant d'assurer que toutes les conditions sont réunies pour que le parcours de rénovation soit mené à son terme : conditions techniques (anticipation des interfaces), économique (toutes les étapes doivent être rentables et finançables) et humaines (accompagnement des ménages dans la durée).

Références bibliographiques

- ADEME Aides financières. (2020, Avril). *Aides financières pour des travaux de rénovation énergétique des logements existants*, ADEME. . Récupéré sur ADEME: <https://www.ademe.fr/aides-financieres-2020>
- ADEME Pérennité étanchéité à l'air Normandie. (2016, Juillet). *Quelle pérennité de la perméabilité à l'air des maisons individuelles BBC en Normandie ? ADEME Direction régionale Normandie*. Récupéré sur ADEME: <https://www.ademe.fr/perennite-permeabilite-a-lair-maisons-individuelles-bbc-normandie>
- ADEME TREMI. (2018, Octobre). *Enquête TREMI (Travaux de Rénovation Énergétique des Maisons Individuelles), Campagne 2017*. Récupéré sur ADEME: <https://www.ademe.fr/travaux-renovation-energetique-maisons-individuelles-enquete-tremi>
- ANSES Coût des polluants de l'air intérieur. (2014, Avril). *Étude exploratoire du coût socio-économique des polluants de l'air intérieur*, ANSES, OQAI, CSTB. Récupéré sur ANSES: <https://www.anses.fr/fr/system/files/AUT-Ra-CoutAirInterieurSHS2014.pdf>
- ANSES, Moisissures dans le bâti. (octobre 2016). *Moisissures dans le bâti*. Avis et Rapport d'expertise collective.
- AQC Combles perdus. (2019). *Isolation des combles perdus par soufflage, 12 enseignements à connaître*, AQC. Récupéré sur Agence Qualité Construction: <https://qualiteconstruction.com/publication/isolation-des-combles-perdus-par-soufflage-12-enseignements-a-connaître/>
- AQC Réno par étape. (2015, Octobre). *Rénovation thermique performante par étape*, AQC, EDF, ES, energivie.pro. Récupéré sur Agence Qualité Construction: <https://qualiteconstruction.com/publication/renovation-thermique-performante-par-etapes/>
- AQC, Humidité dans la construction. (2019). *Humidité dans la construction, 12 enseignements à connaître*. AQC, CODEM, Pôle observation, dispositif REX Bâtiments performants.
- AQC, Observatoire. (2019). *Observatoire de la qualité de la Construction*. Pôle Observation.
- AQC, Points sensibles ITI-ITE. (Décembre 2019). *Rénovation Thermique des Bâtiments*. Pôle Prévention Construction.
- AQC, Rénovation thermique performante par étape. (2015, Octobre). *Rénovation thermique performante par étape*, AQC, EDF, ES, energivie.pro. Récupéré sur Agence Qualité Construction: <https://qualiteconstruction.com/publication/renovation-thermique-performante-par-etapes/>
- CeDRe - Rénovation par étapes. (2018, Octobre). *7ème Congrès National du Bâtiment Durable, à Lyon. Diaporama de l'atelier « rénovation performante par étapes », intégrant la synthèse des travaux du groupe de travail CeDRe*. Récupéré sur <http://www.congresbatimentdurable.com/wp-content/uploads/2018/11/Renovation-etape-par-etape.pdf>
- CEREMA, 500 maisons rénovées BBC. (2017). *500 maisons rénovées basse consommation*. Cerema, EDF. Grand Est: Cerema.
- CSTB CPT 3693 v2. (2015, Juin). *Cahier des Prescriptions Techniques 3693_V2 : Isolation thermique des combles : procédés d'isolation par soufflage d'isolant en vrac*, CSTB Groupe Spécialisé n°20. Récupéré sur CSTB: <https://evaluation.cstb.fr/doc/groupe-specialise/cpt/cpt-3693-v2.pdf>
- CSTB, Les obstacles à la montée en compétences des artisans du bâtiment. (2016, Juillet-Septembre). *Rénover plus vert : les obstacles à la "montée en compétences" des artisans du bâtiment*. Formation emploi, 135.
- Dominique Naert, Thèse professionnelle CSTB. (2015). *Transition énergétique et numérique : nécessaire mutation des compétences des artisans et ouvriers du bâtiment*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Département Génie Civil et Construction.
- Dorémi, Enertech, Matrice des interfaces et interactions. (2019). *Matrice des interfaces et interactions*. Drs DEOUX, S. e. (2002 (réédition 2004)). *Le guide de l'habitat sain*. MEDIECO Editions. Récupéré sur Medieco Editions.
- Effinergie BBC par étapes. (2018, Octobre). *Le BBC par étapes, état des lieux des initiatives*. Récupéré sur Effinergie: <https://www.effinergie.org/web/bbc-par-etapes>
- Effinergie Observatoire BBC réno. (2019, Juin). *Observatoire BBC rénovation, Étude sur les bâtiments rénovés à basse consommation*, Effinergie. Récupéré sur https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/2583/20191008etude-la-renovation-bbc-en-france.pdf

- Enertech Migration de vapeur. (2017, Décembre). *Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien, synthèse bibliographique pour la rénovation performante à destination des concepteurs et des artisans, Enertech SCOP avec Dorémi pour Climaxion/ADEME/Région Grand Est/Oktave*. Récupéré sur Enertech: <https://www.enertech.fr/rubrique/rubrique-2/>
- Enertech STR. (2015). *Les Solutions Techniques de Référence, Enertech*. Récupéré sur Enertech: <https://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/48/150615%20Pourquoi%20et%20comment%20rénover%20avec%20les%20STR.pdf>
- HYGROBA. (2013). *HYGROBA, Étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes, CETE de l'Est, ENSA de Toulouse et Maisons Paysannes de France, pour la DGALN et la DHUP*. Récupéré sur <http://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/fr/espace-documentaire/hygroba-etude-de-la-rehabilitation-hygrothermique-des-parois-anciennes>
- Institut négaWatt - Résorber la précarité. (2018, Juin). *Résorber la précarité énergétique et rénover les passoires thermiques, Institut négaWatt avec la SEM Energies Posit'IF, pour la Ville de Montfermeil, PIA « Ville de demain »*. Récupéré sur Institut négaWatt Résorber la précarité énergétique et rénover les passoires thermiques - Solutions innovantes et prêtes à déployer pour rendre accessible à tous la rénovation performante des maisons individuelles.: http://www.institut-negawatt.com/fichiers/autres_documents/etude_juin_2018_inw.pdf
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (avril 2002). *Formaldehyde as a Basis for Residential Ventilation Rates*. Hodgson, M.H. Sherman and A.T., Indoor Environment Department.
- PACTE Analyse du parc résidentiel. (2017, Juillet). *Analyse détaillée du parc résidentiel existant, de Pouget Consultants version 2.0*. Récupéré sur Programme PACTE: <https://www.programmepacte.fr/analyse-detaillee-du-parc-residentiel-existant-rapport>
- PACTE Stratégie de rénovation. (2017, Octobre). *Stratégie de rénovation, Pouget Consultants dans le cadre du programme PACTE*. Récupéré sur PACTE: <https://www.programmepacte.fr/strategie-de-renovation>
- Perf in Mind Panorama dispositifs. (2020, Février). *Effinergie - Panorama des dispositifs existants de rénovation performante de maisons individuelles*. Récupéré sur Effinergie: <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>
- Perf in Mind. (Rapport à venir en 2021). *Projet PERF IN MIND : Evaluation par la mesure des dispositifs existants de rénovation performante de maisons individuelles, Enertech, effinergie, Institut négaWatt et Médiéco, soutenu par l'ADEME dans le cadre d'un APR*. Récupéré sur <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>
- PUCA. (janvier 2013). *Evaluer les risques de pathologie et de dysfonctionnement après rénovation en opération programmée*. PUCA, ANAH, Habitat et Développement, Fédération PACT, Urbanis, Recherche Expérimentation.
- RAGE. (2012). *Recommandations professionnelles RAGE (Règles de l'Art Grenelle de l'Environnement), Divers auteurs*. Récupéré sur PACTE: <https://www.programmepacte.fr/catalogue>
- TABULA Episcopo. (2015, Mars). *TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment) - Bâtiments résidentiels : typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France, Pouget Consultants dans le cadre du projet EPISCOPE pour EU et ADEME*. Récupéré sur EPISCOPE: https://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/FR_TABULA_TypologyBrochure_Pouget.pdf

Index des tableaux et figures

Figure 1 : Répartition « en grande masse » des consommations (énergie finale) du bâtiment, tous usages. Les pavés sont à l'échelle des consommations énergétiques du secteur représenté, tous usages. Sources : CEREN, INSEE, ADEME et SDDES.	24
Figure 2 : Extraits de l'étude ADEME TREMI, 2018. Gauche : Saut de classes DPE énergie pour les travaux engagés par les ménages. Droite : Travaux privilégiés par les ménages.	26
Figure 3 : Extraits de l'étude ADEME TREMI, 2018. Gauche : Nombre de postes concernés par les travaux de rénovation pour un saut de 2 classes DPE énergie ou plus et tous types de rénovation. Droite : Sondage auprès des ménages ayant réalisés sur les prochaines étapes envisagées, étalement des travaux dans le temps.	26
Figure 4 : Définition de la rénovation performante. Source : Dorémi.	29
Figure 5 : Pathologies observées après rénovation. De gauche à droite : présence de salpêtre (source : humidites.fr), présence de moisissures sur mur intérieur (source : prix-immobilier.info), trace d'humidité et enduit extérieur dégradé (source : Enertech).	38
Figure 6 : Apparition de moisissures à la suite de l'isolation de vieux murs. De gauche à droite : moisissures sur mur extérieur, humidité dans les murs par suite de l'installation d'un voile étanche sous le plancher, traces de moisissures dans un mur de refend (sources : AQC).	38
Figure 7 : Phénomène de condensation au niveau des têtes de solives, renforcé par l'absence de ventilation en phase chantier (cas pouvant se produire également dans un logement rénové peu ou non ventilé). Source : AQC (AQC, Humidité dans la construction, 2019).	39
Figure 8 : Schéma illustrant les 7 bonnes pratiques de conception pour éviter les pathologies liées à l'humidité dans une rénovation complète et performante. Source : Enertech (Enertech Migration de vapeur, 2017).	40
Figure 9 : Exemple de développement de moisissures autour d'une trappe de la salle de bain ainsi qu'en périphérie de la menuiserie extérieure de la cuisine, moins d'un an après rénovation thermique d'un logement avec absence de ventilation (à l'arrêt). Source PUCA (PUCA, janvier 2013).	40
Figure 10 : Définition de la rénovation performante (Source : Dorémi).	45
Figure 11 : Diagramme d'évaluation des potentialités architecturales et écologiques (source : Conseil National de l'Ordre des Architectes).	46
Figure 12 : Matrice de synthèse des complexités de traitement des interfaces entre 2 postes de travaux sur l'enveloppe, selon l'ordre d'exécution.	48
Figure 13 : Exemple de recommandation de recouvrement ITE sur menuiserie. Source : PACTE, Calepin de chantier Fenêtres avec Isolation Thermique par l'Extérieur.	50
Figure 14 : Types de pose de menuiseries.	50
Figure 16 : Fenêtre posée en applique en attente d'une ITI.	51
Figure 17 : Fenêtre posée en applique en attente d'une ITE.	51
Figure 17 : Défaut d'étanchéité d'un dormant conservé en prévision d'une pose en rénovation de la nouvelle menuiserie.	51
Figure 18 : Interface entre menuiserie et isolant intérieur non anticipée : pathologie assurée. (source : Dorémi).	52
Figure 19 : Dormant élargi en anticipation d'une ITI (source : Dorémi).	53
Figure 20 : Dormant adapté à un futur doublage isolé (source : Dorémi).	53
Figure 21 : ITE non anticipée lors du remplacement des menuiseries (source : Dorémi).	54
Figure 22 : Dormant élargi en anticipation de l'ITE (source : Dorémi).	54
Figure 23 : Extraits des fiches A3 et A4 du CPT 3709_V2.	55
Figure 24 : Exemple de mise en œuvre en rénovation extrait du DTU 36.5 P1-1, indiquant l'espacement ventilé (coloré en bleu) à préserver entre l'habillage et l'ancien dormant en bois.	56
Figure 25 : ITE interrompue par un volet roulant existant (source : Dorémi).	56
Figure 26 : Pont thermique sur l'ITE dû à un coffre de volet roulant sous linteau (source : Dorémi).	57
Figure 27 : Pont thermique et défaut d'étanchéité avec un coffre de volet roulant intérieur (source : Dorémi).	57
Figure 28 : Pont thermique sur l'ITE dû à un coffre de volet roulant en applique (source : Dorémi).	57
Figure 29 : Pertes de chaleur d'une maison d'avant 1974 non isolée. Source : Guide Isoler sa maison de l'ADEME.	59
Figure 30 : Exemples de typologies concernés par l'interface combles perdus - murs.	59
Figure 31 : Isolation en laine minérale déroulée en 2 couches Source : CPT 3560_V2 du CSTB.	60
Figure 32 : Mise en place de déflecteurs. Source : CPT 3693 (CSTB).	60
Figure 33 : Discontinuité d'isolation entre combles et ITE (source : Dorémi).	61
Figure 34 : Simulation par éléments finis du pont thermique sur la tête de mur non isolée (source : Enertech). Le point froid généré par ce pont thermique est de 8°C dans l'angle intérieur pour -11°C extérieur. Il provoque donc un risque grave de condensation.	61
Figure 35 : Moisissures apparues sur un pont thermique dû à la discontinuité de l'ITE et de l'isolation des combles (Source : Dorémi).	62
Figure 36 : reprise d'isolation de toiture pour continuité avec l'ITE (source : Dorémi).	62
Figure 37 : Simulation par éléments finis du pont thermique sur la tête de mur isolée (Source : Enertech).	62
Figure 38 : Discontinuité d'isolation et d'étanchéité à l'air en cas de faux-plafond (plénum non isolé) (source : Dorémi).	64
Figure 39 : Extrait du CPT 3647 sur l'isolation de combles en plénum.	66

Figure 41 : Typologie 1-TH	68
Figure 41 : Isolation des rampants et ITE. Gauche : isolation des rampants sans réflexion sur l'isolation des murs à venir. Droite : Continuité d'isolant à prévoir entre rampant et ITE. (source : Dorémi).....	68
Figure 42 : Types de toiture en appui sur un mur (source : Dorémi)	70
Figure 43 : Pratique courante de discontinuité d'isolation et d'étanchéité à l'air entre ITE et rampants (source : Dorémi).....	70
Figure 44 : Bonnes pratiques de liaison d'isolation et d'étanchéité à l'air entre ITE et rampants (source : Dorémi)	71
Figure 45 : ITI réalisée après l'isolation des rampants sans avoir prévu la continuité de l'isolation et de gestion de l'étanchéité à l'air et de la migration de vapeur d'eau (source : Dorémi).....	71
Figure 46 : Traitement des pieds-droits. Source CPT 3560_V2 du CSTB	72
Figure 47 (gauche) : ITI sans continuité d'isolant et de pare-vapeur dans l'épaisseur d'un plancher bois (Source : Dorémi).....	73
Figure 48 (droite) : Continuité d'ITI en découpant le plancher en périphérie (Source : Dorémi)	73
Figure 49 : Schéma des 6 postes de travaux nécessaires à la performance thermique (source : Dorémi).	75
Figure 50 : Exemple de représentation des consommations (chauffage et production d'ECS) à chaque étape, pour les 5 parcours de rénovation sur une typologie de maison.....	76
Figure 51 : Définition de l'objectif de consommation équivalent BBC rénovation dans l'étude.	77
Figure 52 : Tableau descriptif des STR (Enertech) et solutions retenues pour chacune des 10 typologies de l'étude. Ces associations STR-typologies sont ensuite déclinées et adaptées dans les 4 parcours en plusieurs étapes.....	79
Figure 53 : Comparaison des 5 parcours de rénovation étudiés.	82
Figure 54 : Typologies des maisons individuelles étudiées (photos : rapport Tabula (TABULA Episcopo, 2015))	82
Figure 55 : Énergies retenues pour les 10 typologies et énergies de l'état initial.	83
Figure 56 : Répartition des énergies de chauffage simulées pour les 10 typologies, en moyenne nationale, pour le parcours en une seule étape. Taux de représentativité des typologies selon les données Tabula.	84
Figure 57 : Consommation moyenne à terme des 5 parcours de rénovation. Moyenne du parc construit avant 1982. Consommation de chauffage et production d'ECS, en énergie primaire, rapportées à la surface habitable.	84
Figure 58 : Consommation moyenne à terme des 5 parcours de rénovation et consommation du parc actuel. Moyenne du parc construit avant 1982. Consommation de chauffage et production d'ECS, en énergie finale, rapportées à la surface habitable.	85
Figure 59 : Consommations minimales, maximales et moyennes pour les productions de chauffage et d'ECS, à l'échelle du parc, obtenues par calcul pour les 5 parcours de rénovation.	86
Figure 60 : Comparaison des consommations de chauffage et d'ECS avant et après rénovation pour les parcours rénovation.....	86
Figure 61 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) pour chaque parcours de rénovation des 10 typologies. Objectif de consommation : $80 \text{ kWh}_{EP}/\text{m}^2_{\text{shab.an}}$ pour le chauffage et la production d'ECS.	87
Figure 62 : Consommation en énergie primaire de chauffage et d'ECS pour le parcours RCP, appliqué aux 10 typologies. Regroupement des typologies par équipement de production de chaleur.	88
Figure 63 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) pour le parcours RCP et pour les 10 typologies.	89
Figure 64 : Consommation d'énergie primaire (chauffage + ECS) pour les parcours RQC et RCP.	91
Figure 65 : Comparaison des besoins de chauffage pour les parcours RCP et RQC	92
Figure 66 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) des 10 typologies pour les parcours RCP, RQC et SG.	93
Figure 67 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) des 10 typologies pour les parcours RCP, RQC, SG et Partielle renforcée.	95
Figure 68 : Consommations d'énergie primaire (chauffage + ECS) des 10 typologies pour les 5 parcours.	97
Figure 69 : Synthèse des consommations moyenne sur le parc d'avant 1982 pour les différents parcours de rénovation, écart de consommation entre les parcours et écart à la consommation cible BBC rénovation.....	98
Figure 70 : Consommation chauffage et ECS par sur la moyenne du parc d'avant 1982, pour 5 parcours de rénovation. En grisé : les parcours ne respectant pas les objectifs d'une rénovation performante, en vert le parcours RCP en une étape à viser, en jaune les parcours de rénovation par étape pouvant mener à une rénovation performante sous conditions.	99
Figure 71 : Schématisation de l'augmentation de la complexité avec le nombre d'étapes d'un projet de rénovation	101
Figure 72 : Illustration de la baisse des puissances surfaciques depuis les bâtiments d'avant 1975 à aujourd'hui. Source : Enertech, rapport de synthèse de l'AMO Bourgogne	103
Figure 73 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les chaudières gaz à condensation.....	104
Figure 74 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les chaudières fioul à condensation.....	105
Figure 75 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les pompes à chaleur air-eau.....	106
Figure 76 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les chaudières à granulés	106
Figure 77 : Schéma de l'ajout d'un ballon tampon à une chaudière surpuissante	107
Figure 78 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les poêles à bûches de faible puissance ...	108
Figure 79 : Benchmark des plages de modulation disponibles pour les poêles à granulés de faible puissance .	108

Figure 80 : Dégradation du rendement d'un même modèle de chaudière gaz dans différentes utilisations faisant appel à tout ou partie de sa puissance. Source : Enertech pour ADEME, campagne de mesure sur les rénovations du Quartier Franklin à Mulhouse.	110
Figure 81 : Modèle de rendement utilisé dans l'étude. Pmin et Pmax sont les limites de modulation de la chaudière.	110
Figure 82 : Un écosystème de prescripteurs. Source : Bourgogne Bâtiment Durable.	118
Figure 83 : Les sources de renseignements préalables à tout projet de rénovation pour les particuliers. Source : Diagnostic initial de la rénovation énergétique du logement privé – Consolidation Rhône-Alpes, CERA, 2015.	119
Figure 84 : Les différents profils de ménages identifiés lors du projet RESSORT.	121
Figure 85 : Benchmark des logiciels d'accompagnement des projets de rénovation énergétique, Dorémi, 2018	124
Figure 86 : Définition de la rénovation performante (Source : Dorémi).	126
Figure 87 : Écarts de consommation sur la moyenne du parc construit avant 1982 entre les différents parcours de rénovation selon le nombre d'étapes, et écart à l'objectif BBC rénovation ou équivalent.	127
Figure 88 : Schéma des 6 postes de travaux nécessaires à la performance thermique (source : Dorémi).	127
Figure 89 : Niveaux d'étanchéité à l'air pris en compte dans le DPE actuel. Source : arrêté du 9 novembre 2006.	139
Figure 90 : Taux de renouvellement d'air mesurés dans 23 bâtiments neufs en ventilation simple et double flux. Comparaison avec le taux de renouvellement d'air attendu (trait rouge).	140
Figure 91 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 80 logements à Feyzin, année 2, 2013. Source : Campagne de Mesure d'Enertech pour Énergie Demain.	141
Figure 92 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 47 logements à Grenoble, année 2, 2015. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Énergie Demain.	141
Figure 93 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 55 logements à La Mulatière, année 2, 2015. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Énergie Demain.	142
Figure 94 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 169 logements à Rilleux la Pape, année 2, 2014. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Énergie Demain.	142
Figure 95 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 40 logements à Saint-Denis, 2014. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Cerqual.	143
Figure 96 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 20 logements à Tain l'Hermitage, 2014. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Cerqual.	143
Figure 97 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 32 maisons à Thury Harcourt, 2014. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Cerqual.	144
Figure 98 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation de 67 logements (B12) à Châlon sur Saône, 2014. Source : Maîtrise d'œuvre et suivi de la rénovation, Enertech pour OPAC71.	145
Figure 99 : Répartition des déperditions statiques par les parois (état initial, ensemble du parc d'avant 1982) ..	146
Figure 100 : Répartition des déperditions statiques par les parois (rénovation complète et performante de l'ensemble du parc d'avant 1982) ..	146
Figure 101 : Bilan thermique annuel de chauffage état initial (ensemble du parc d'avant 1982) ..	147
Figure 102 : Bilan thermique annuel de chauffage (rénovation complète et performante de l'ensemble du parc d'avant 1982) ..	147
Figure 103 : Comparaison des consommations de chauffage et ECS du parc par période de construction et selon différentes sources de données (comparaison réalisée par Enertech) ..	148
Figure 104 : Carte des zones climatiques du calcul réglementaire, et station météo de référence.	151
Figure 105 : Besoin de chauffage calculé pour l'état initial et la rénovation complète et performante pour l'ensemble des 10 typologies de maisons jusqu'à 1982, dans chacune des 8 zones climatiques, et en moyenne pondérée nationale ..	152
Figure 106 : Résistances minimales des parois opaques pour obtenir le CITE, eco-PTZ, TVA à 5,5%. Source (ADEME Aides financières, 2020).	152
Figure 107 : Performances minimales des menuiseries pour obtenir le CITE, eco-PTZ, TVA à 5,5%. Source : (ADEME Aides financières, 2020) ..	153
Figure 108 : Tableau des 10 STR pour chauffage à combustible et PAC performante (Enertech STR, 2015). Grille valable pour tous les chauffages par combustion et pour les pompes à chaleur (dont ETAs >126%) ..	153
Figure 109 : Tableau des 3 STR en cas de chauffage électrique conservé (Enertech STR, 2015) Grille valable pour le chauffage par radiateur électrique qui serait conservé après rénovation.	153
Figure 110 : Exemple de solutions pour limiter les ponts thermiques en nez de dalle. De gauche à droite : isolation périphérique horizontale sous chape, isolation périphérique en continuité d'ITE, isolation périphérique verticale avec ITI (source (de g. à d.) : RAGE, RAGE et Dorémi).	154
Figure 111 : Sources de fuite dans les différents parcours de rénovation et dans l'état initial ..	155
Figure 112 : Énergies retenues pour les 10 typologies et énergies de l'état initial.	155
Figure 113 : Répartition des énergies de chauffage en moyenne nationale selon la représentativité des typologies (source tabula) et pour une rénovation en 1 étape.	156
Figure 114 : Tableau de vérification de la possibilité de cumuler les aides et financements.	180

Tableaux

Tableau 1 : Tableau de synthèse des 5 parcours de rénovation pour la typologie 1-SFH.....	83
Tableau 2 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie TH-3 (3 étapes de travaux).	112
Tableau 3 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie TH-2 (3 étapes de travaux).	113
Tableau 4 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie 2-SFH (4 étapes).	114
Tableau 5 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie TH-1 (4 étapes).....	114
Tableau 6 : Comparaison de parcours de rénovation semi globale, avec et sans intégration d'EnR, et du parcours RCP, pour la typologie TH-1 (4 étapes).....	115

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AQC	Agence Qualité Construction
BBC	Bâtiment à Basse Consommation
CESI	Chauffe-Eau Solaire Individuel
CET	Chauffe-Eau Thermodynamique
COP	Coefficient de Performance
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EnR	Énergies Renouvelables
ITE	Isolation Thermique par l'Extérieur
ITI	Isolation Thermique par l'Intérieur
PAC	Pompe à Chaleur
PACTE	Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Énergétique
PV	Photovoltaïque
QAI	Qualité de l'Air Intérieur
RCP	Rénovation Complète et Performante
RP	Rénovation Performante
RPE	Rénovation Performante par Étapes
RQC	Rénovation Quasi-Complète
RT	Réglementation Thermique
SNBC	Stratégie Nationale Bas Carbone
STR	Solutions Techniques de Rénovation
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée
VMC SF	VMC Simple-Flux
VMC DF	VMC Double-Flux

ANNEXES

Annexe 1 - Choix de la méthode de calcul

Annexe 2 - Hypothèses de calcul

Annexe 3 - Résultats de calcul détaillés pour les 10 typologies de maisons étudiées

Annexe 4 - Hypothèses économiques

Annexe 1 - Choix de la méthode de calcul

Dans la présente étude, les calculs énergétiques ont été réalisés avec un outil interne développé par Enertech sur la base de la simulation thermique dynamique. Cette annexe précise les raisons de ce choix méthodologique, et en illustre les conséquences sur la consommation des maisons avant rénovation et sur l'objectif de consommation après rénovation.

Pourquoi ne pas avoir choisi le calcul 3CL-DPE ?

Cette méthode de calcul est très largement utilisée dans des études similaires, et de façon générale pour caractériser le parc bâti. **Cependant, plusieurs biais de calcul dans la méthode 3CL-DPE contribuent à ce que ce calcul sous-estime, dans certains cas, les consommations de chauffage par rapport à la réalité, biais qui devraient être corrigés avec la réforme en cours du DPE.**

L'analyse qui suit s'appuie sur l'annexe 1 de l'arrêté du 9 novembre 2006⁵⁹ portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine.

Les principaux facteurs qui expliquent que le DPE sous-estime les consommations de chauffage sont les suivantes :

- [page 4-5]⁶⁰ Le calcul DPE est fait sur la base des DJU à 18°C. Il suppose une consigne à 19°C, et un ralenti à 16°C pendant la nuit de 22 heures à 6 heures, ainsi qu'une semaine d'inoccupation pendant la saison de chauffe.
 - La réalité des usages est plutôt une consigne qui est en moyenne entre 21 et 22 °C (voir notamment l'étude PECOIC⁶¹). Ceci peut expliquer un écart de 15 à 20% sur la consommation de chauffage pour des bâtiments peu isolés.
- [page 5] L'écart entre la consigne de 19°C et les DJU calculés à 18°C, soit 1°C, est supposé fourni par les apports internes.
- [page 34] Cependant les apports internes sont tout de même comptés (une seconde fois ?) dans le calcul, à hauteur de 4,17 W/m², sur une durée de période de chauffe forfaitaire (dépendant du département).
 - Si l'ordre de grandeur de 4 à 5 W/m² est cohérent (il correspond à la consommation moyenne d'électricité spécifique de 1000 kWh_{élec}/an par personne), en revanche la durée de période de chauffe dépend à la fois du climat et de la performance de l'enveloppe.
 - En comptant forfaitairement 1°C d'apports gratuits et une période de chauffe de durée fixe, la méthode 3CL est optimiste pour les bâtiments non isolés et très pessimiste pour les bâtiments très performants. A titre d'illustration, la température de non-chauffe d'un bâtiment passif est souvent de 15°C, soit 4°C d'apports gratuits pour une consigne à 19°C. Les apports gratuits sont dans ce cas sous-estimés d'un facteur 4.
- [page 34] Les apports solaires sont estimés par le biais d'une « surface transparente Sud équivalente »
 - Le moteur de calcul réglementaire ou le calcul par simulation thermique dynamique permettent une modélisation bien plus fine que cette approximation. Il est également très important de prendre en compte les masques solaires proches et lointains, sinon on sous-estime parfois largement le besoin de chauffage.

⁵⁹ Disponible sur Legifrance.

⁶⁰ La référence à la pagination est relative à la version PDF du document.

⁶¹ Projet PECOIC - Prise en compte du comportement des occupants et incertitudes associées en phase conception de bâtiments en phase conception, 122 pages, Mai 2019. Étude réalisée par le CSTB et Enertech et accompagnée par l'ADEME dans le cadre d'un Appel à Projet Recherche. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/pecoic-2019-rapport.pdf>.

- [page 32] Les infiltrations sont calculées avec l'indicateur Q4, en ne prenant en compte que le tirage thermique, « l'impact du vent étant négligé ».
 - Le calcul réglementaire RT2005 existant n'est pas plus réaliste (voir la suite). En revanche, le calcul RT2012 dispose d'un modèle de pression bien plus précis. Et de fait entre la RT2005 et la RT2012 on a vu le besoin de chauffage évoluer à la hausse pour un même bâtiment.
 - Une approche simplifiée largement utilisée est celle établie par le CETE de Lyon, qui est de considérer un renouvellement d'air continu égal au n50 divisé par 20 ou plutôt par 15 dans la mise à jour des préconisations du CETE.
 - En tout état de cause, la méthode de calcul 3CL sous-estime les déperditions par les infiltrations, pour un Q4 donné.
- [page 32] Le niveau d'infiltrations Q4 est pris en compte forfaitairement en distinguant 3 typologies :

Q _{4Pacon/m2} en m³/h/m² sous 4 Pa valeurs conventionnelles		
Fenêtres sans joint et cheminée sans trappe de fermeture	Fenêtres sans joint ou cheminées sans trappe de fermeture	Autres cas
2,5	2,0	1,7

Figure 89 : Niveaux d'étanchéité à l'air pris en compte dans le DPE actuel. *Source : arrêté du 9 novembre 2006.*

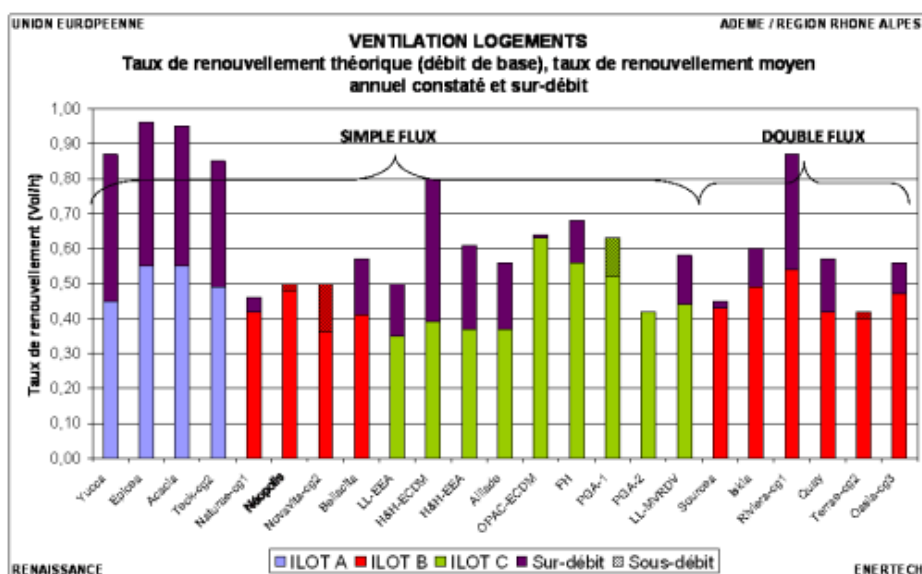
- Ces valeurs sont faibles par rapport aux données récentes d'EXIST'AIR⁶² (étude du CEREMA), qui constate un Q4 moyen de 3,3 pour les maisons d'avant 1948, et de 2,2 pour les maisons entre 1948 et 1975 (à comparer avec la valeur 1,7 du tableau en Figure 89, car après 1948 on considère généralement que les menuiseries ont des joints).
 - Le calcul 3CL sous-estime la consommation de chauffage dans l'existant liée aux déperditions à la fois par la valeur de Q4 prise en compte et par le fait qu'elle néglige l'effet du vent sur les bâtiments.
 - A contrario, dans les rénovations performantes on peut obtenir des valeurs de Q4 très inférieures à 1,7. Par exemple, dans les rénovations Dorémi⁶³, on vise et on atteint n50 = 3 vol/h, voire dans certains cas 1 vol/h, ce qui correspond à des Q4 respectivement autour de 0,7 et 0,2 m³/h par m².
 - Le calcul 3CL défavorise donc les bâtiments performants en ne permettant pas de saisir une valeur connue de Q4.
- Par ailleurs, le calcul DPE prend en compte les différents systèmes de ventilation au niveau de performance théorique des avis techniques. Or des mesures montrent que dans la réalité les économies de chaleur peuvent être inférieures aux économies théoriques.
 - Cas de la ventilation hygroréglable : la Figure 90 représente les taux de renouvellement d'air mesurés dans la campagne de mesure réalisée à Lyon sur plusieurs ensembles de bâtiment récents. Les débits d'air en simple flux, systématiquement hygroréglables ici, sont supérieurs aux débits de l'arrêté de 1982, alors que selon les avis techniques ils devraient être de 30% à 50 % inférieurs. Dans ce cas, le système de ventilation hygroréglable n'a permis aucune économie d'énergie par rapport à une ventilation simple flux autoréglable.
 - Un mauvais réglage, ou une mauvaise maintenance, peut affecter tous les systèmes de ventilation : c'est le cas pour l'une des installations de ventilation double flux (voir Figure 90),

⁶² <https://www.cerema.fr/fr/actualites/campagne-mesures-permeabilite-air-logements-construits-2005>

⁶³ <https://www.renovation-doremi.com/>

qui s'avère réglée à un débit trop élevé. Pour 2 autres installations, le débit mesuré est au contraire inférieur, probablement à cause de filtres encrassés (mauvaise maintenance).

- Le calcul 3CL sous-estime donc dans certains cas la consommation de chauffage des bâtiments, notamment ceux avec ventilation hygroréglable.



Conclusion : le calcul DPE peut sous-estimer les consommations de chauffage. C'est particulièrement vrai pour les bâtiments peu performants avant rénovation. L'inverse peut se produire après rénovation, notamment pour les bâtiments où l'étanchéité à l'air atteinte est très performante par rapport aux hypothèses par défaut du calcul. C'est pourquoi l'étude retient une autre méthode de calcul.

Pourquoi ne pas avoir choisi le calcul RT2005-rénovation ?

D'autres études comparables s'appuient sur le calcul réglementaire, notamment les règles ThCE-Ex de la RT2005-rénovation, qui sont notamment celles utilisées pour définir le label BBC rénovation (calcul réglementaire).

Cependant, là encore, cette méthode de calcul sous-estime les consommations de chauffage par rapport à la réalité. Ce constat n'est d'ailleurs pas surprenant, dans la mesure où le calcul réglementaire est un calcul conventionnel qui n'a jamais eu pour vocation de « prédire la réalité », mais constitue une base de comparaison des bâtiments entre eux pour juger du respect de la réglementation.

Les nombreux exemples (pages suivantes) illustrent ce phénomène pour des rénovations de niveau BBC rénovation, et comparent le calcul RT2005-rénovation avec la réalité, sur les 5 usages réglementaires.

Les raisons des écarts importants entre la mesure et la méthode de calcul RT2005-rénovation (ThCE-ex) sont semblables à celles décrites pour la méthode de calcul DPE :

- **Scénario conventionnel** de consigne à 19°C et ralenti à 16°C
- Le calcul RT2005 **ne prend pas en compte l'effet du vent sur les infiltrations**. Les déperditions de chaleur par les défauts d'étanchéité à l'air sont donc largement sous-estimées
- Prise en compte des économies de chauffage par la **ventilation hygroréglable** selon les avis techniques, alors que des mesures sur le terrain sur de nombreuses opérations ne sont pas probantes concernant

⁶⁴ Rapport téléchargeable sur https://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/66/Synth%C3%A8se%20Confluence_VC.pdf

les économies d'énergies générées par rapport à une ventilation simple flux autoréglable (hors problèmes de mise en œuvre et réglages sur site qui sont communs à tous les systèmes de ventilation).

Conclusion : le calcul RT2005 sous-estime les consommations après rénovation en logement collectif. Il n'est pas rare que la consommation 5 usages réelle soit deux fois supérieure au Cep du calcul réglementaire. C'est pourquoi l'étude retient une autre méthode de calcul.

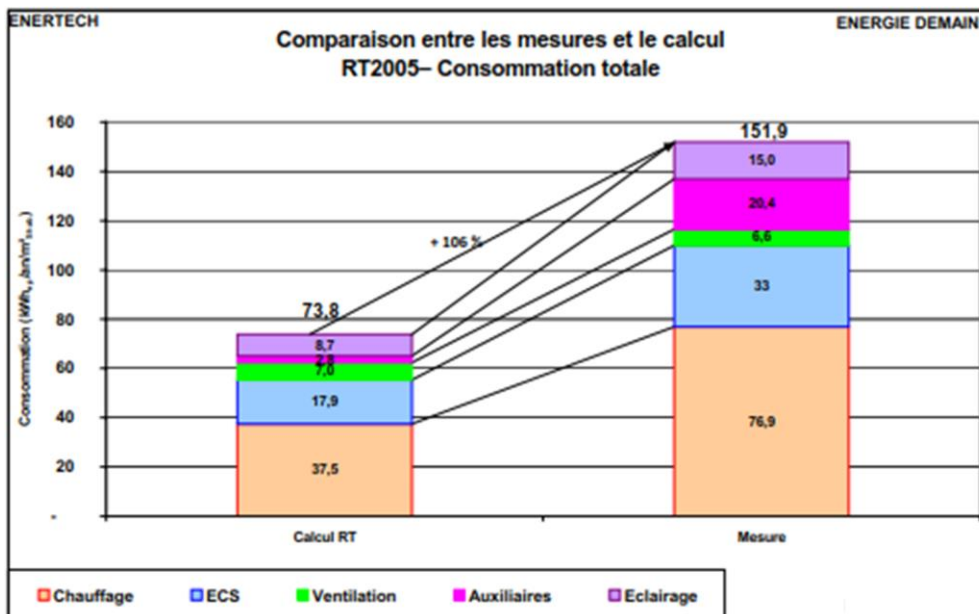


Figure 91 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 80 logements à Feyzin, année 2, 2013.
Source : Campagne de Mesure d'Enertech pour Énergie Demain.

- La consommation réelle 5 usages est **supérieure de +106%** au calcul RT2005 après rénovation.

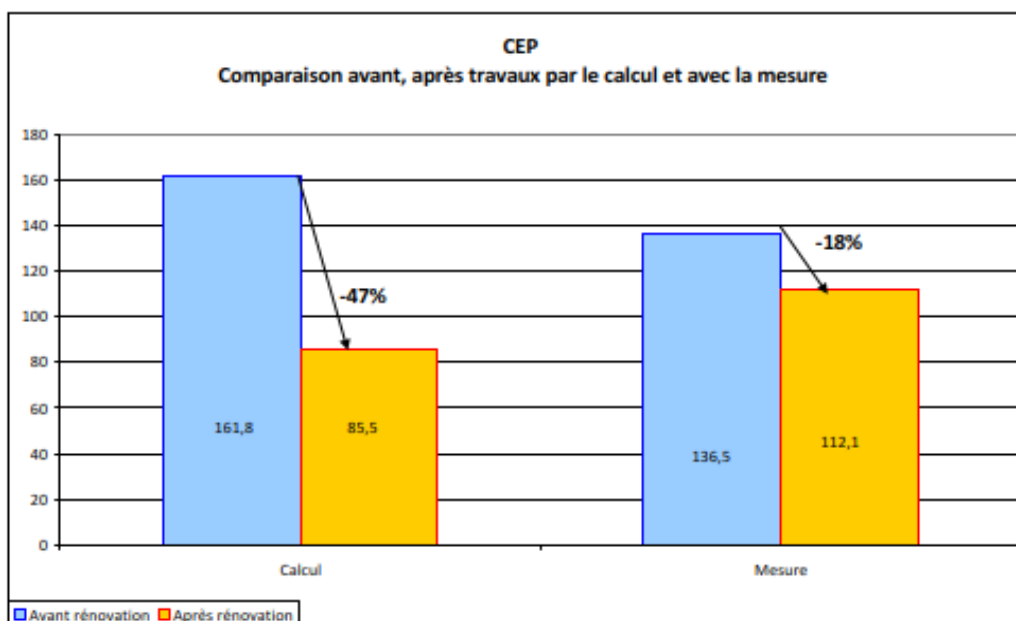


Figure 92 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 47 logements à Grenoble, année 2, 2015.
Source : Campagne de Mesures Enertech pour Énergie Demain.

- La consommation réelle 5 usages est **inférieure de -16% au calcul RT2005 avant rénovation** (barreaux bleus), elle est **supérieure de +31% au calcul RT2005 après rénovation** (barreaux jaunes).

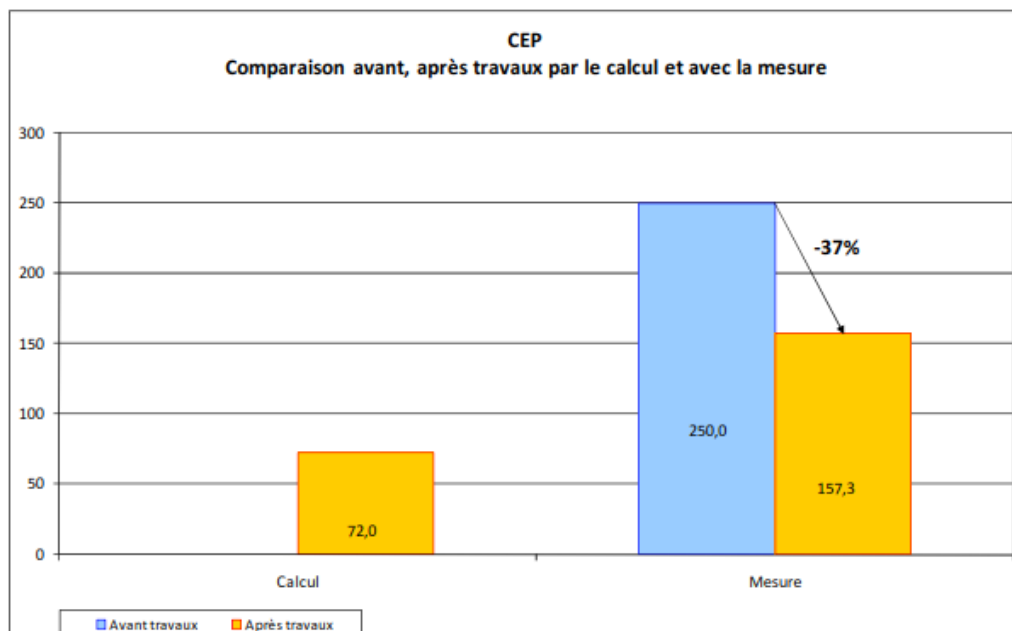


Figure 93 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 55 logements à La Mulatière, année 2, 2015. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Énergie Demain.

- La consommation réelle 5 usages est **supérieure de +118% au calcul RT2005 après rénovation**.

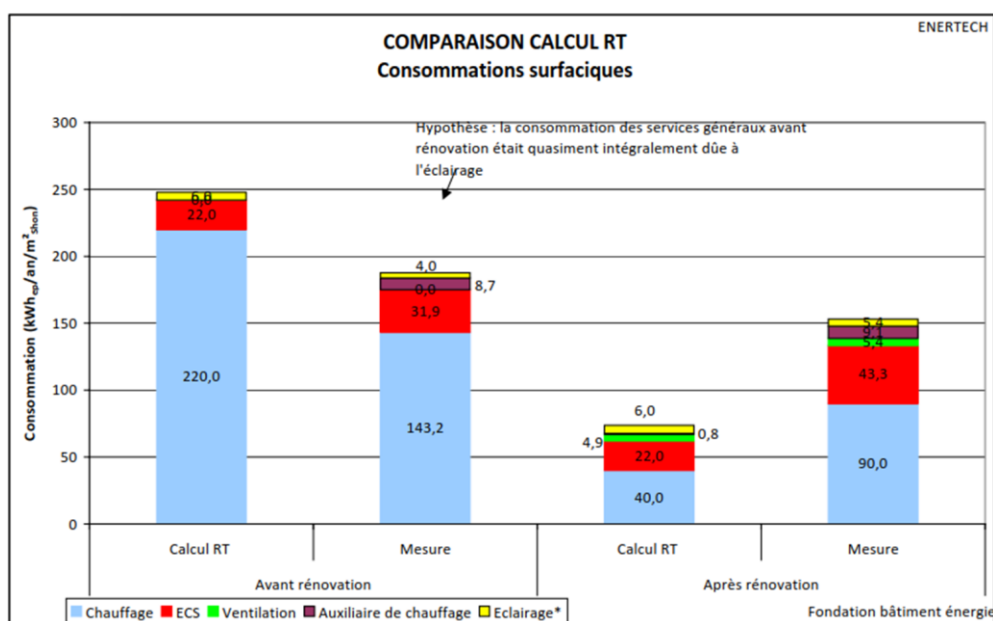


Figure 94 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 169 logements à Rilleux la Pape, année 2, 2014. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Énergie Demain.

- La consommation réelle 5 usages est **inférieure de -25%** au calcul RT2005 avant rénovation, elle est **supérieure de +107%** au calcul RT2005 après rénovation.

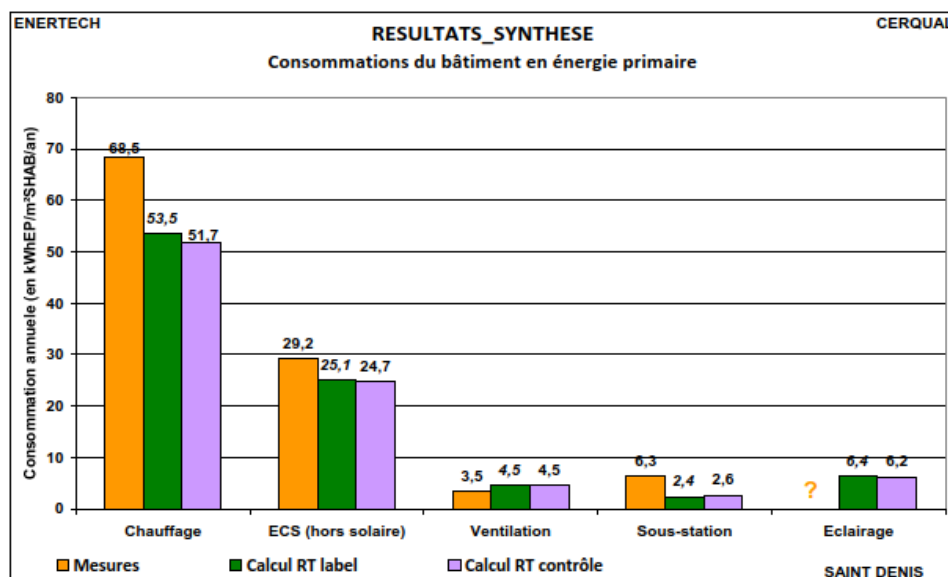


Figure 95 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 40 logements à Saint-Denis, 2014. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Cerqual.

- La consommation réelle 5 usages est **supérieure de +27%** au calcul RT2005 après rénovation.

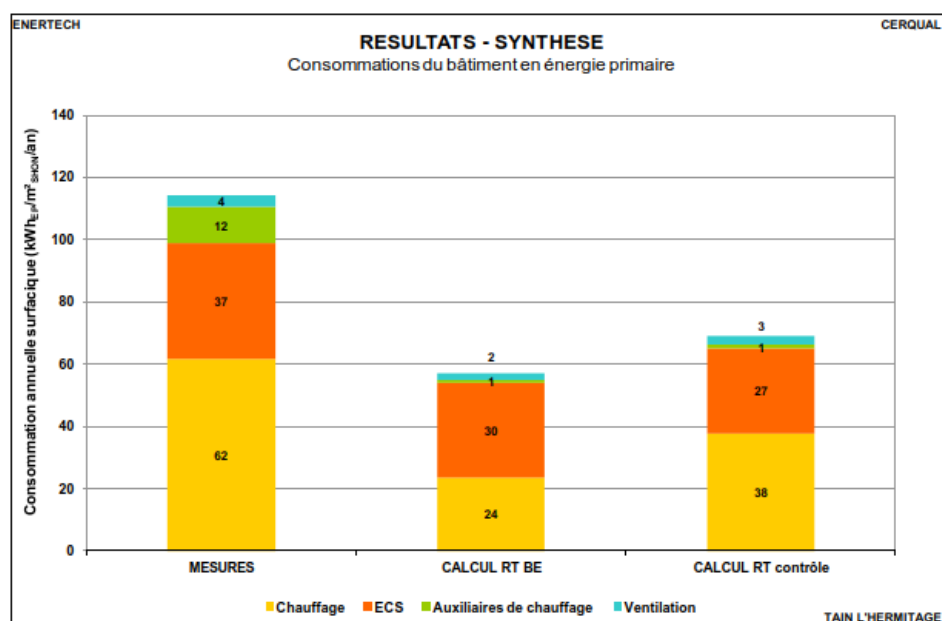


Figure 96 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 20 logements à Tain l'Hermitage, 2014. Source : Campagne de Mesures Enertech pour Cerqual.

- La consommation réelle 5 usages est **supérieure de +67%** au calcul RT2005 après rénovation.

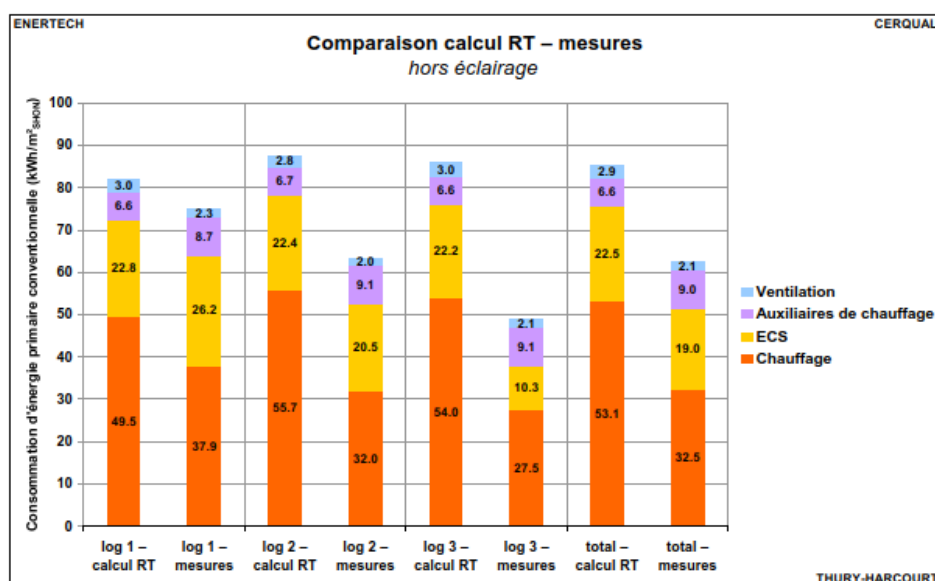


Figure 97 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation BBC de 32 maisons à Thury Harcourt, 2014.
Source : Campagne de Mesures Enertech pour Cerqual.

- La consommation réelle 5 usages est **inférieure de -9% à -43%** au calcul RT2005 après rénovation.
 NB : des **problèmes de qualité d'air** ont été décelés (taux de CO₂ mesurés trop élevés, insatisfaction des habitants), liés à une **ventilation insuffisante** (débits mesurés nuls à certains bouches).

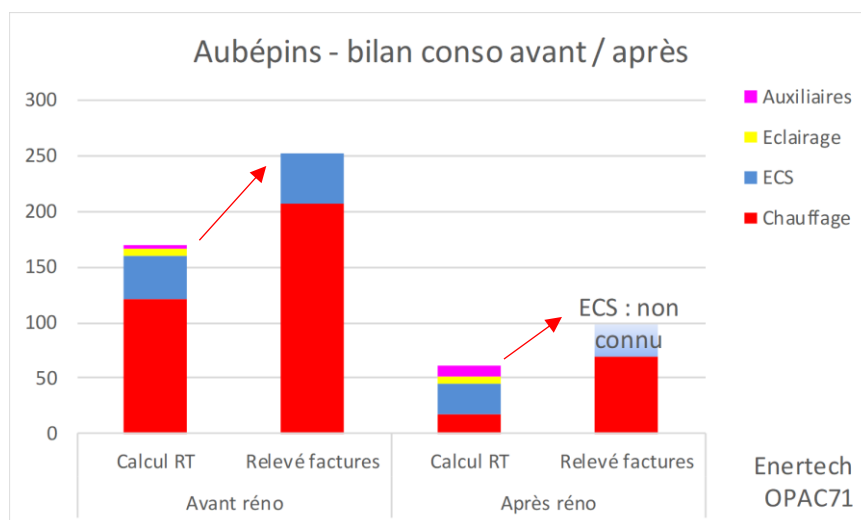


Figure 98 : Comparaison entre mesure et calcul RT2005 sur la rénovation de 67 logements (B12) à Châlon sur Saône, 2014.
Source : Maîtrise d'œuvre et suivi de la rénovation, Enertech pour OPAC71.

- La consommation réelle de chauffage est **supérieure de +72% au calcul RT2005 avant rénovation**
 Elle est **supérieure de +286% au calcul RT2005 après rénovation**.

Méthode de calcul retenue

Fruit de l'expérience d'Enertech en simulation thermique dynamique, l'outil utilisé est un tableur permettant d'estimer rapidement les besoins de chauffage d'un bâtiment (logement, tertiaire...) et de simuler des variantes, avec une précision proche de la simulation thermique dynamique pour une station météo donnée.

Le calcul est réalisé au pas de temps de la journée, sur lequel l'inertie lisse les apports gratuits. L'outil intègre une possibilité d'intermittence de la consigne de chauffage, de la ventilation et des apports internes, selon un calendrier détaillé. Les apports solaires de l'outil sont issus d'abaques générés sous TRNSYS (logiciel de simulation thermique dynamique) pour chacune des météo. Il est possible de simuler des masques proches et lointains de manière simple.

Les résultats de cet outil ont été comparés à ceux de la simulation thermique dynamique sous TRNSYS sur plusieurs bâtiments, avec des résultats équivalents à moins de 10% près. Créé en 2013, il a été constamment amélioré depuis. La version utilisée pour cette étude est la v6.

A titre d'illustration, les graphiques ci-dessous montrent la répartition des déperditions statiques de l'enveloppe et le bilan des pertes et apports gratuits, pour l'état initial moyen du parc et pour la rénovation complète et performante (basé sur le cas médian de la STR8) du parc :

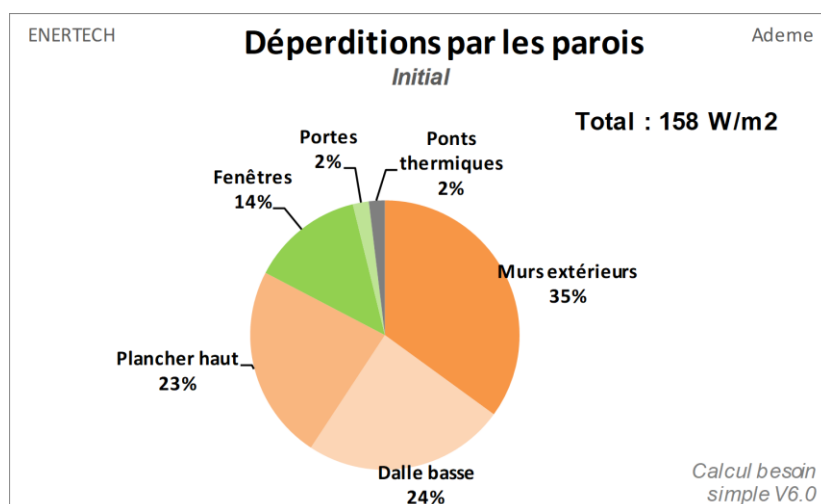


Figure 99 : Répartition des déperditions statiques par les parois (état initial, ensemble du parc d'avant 1982)

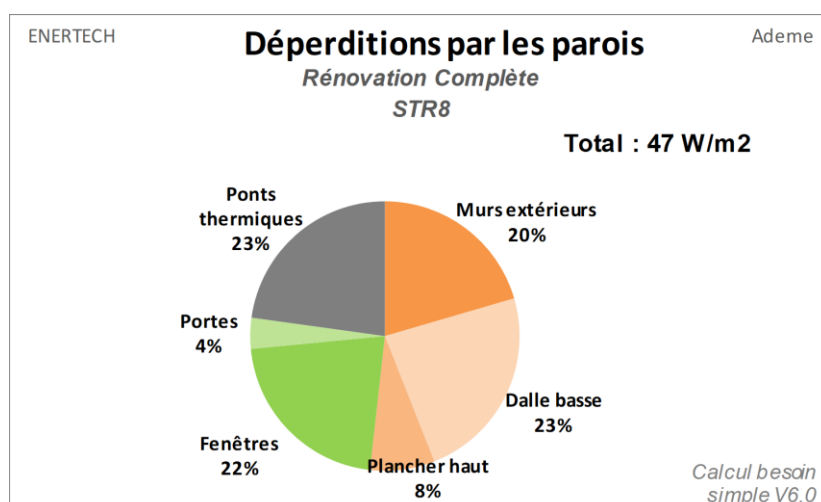


Figure 100 : Répartition des déperditions statiques par les parois (rénovation complète et performante de l'ensemble du parc d'avant 1982)

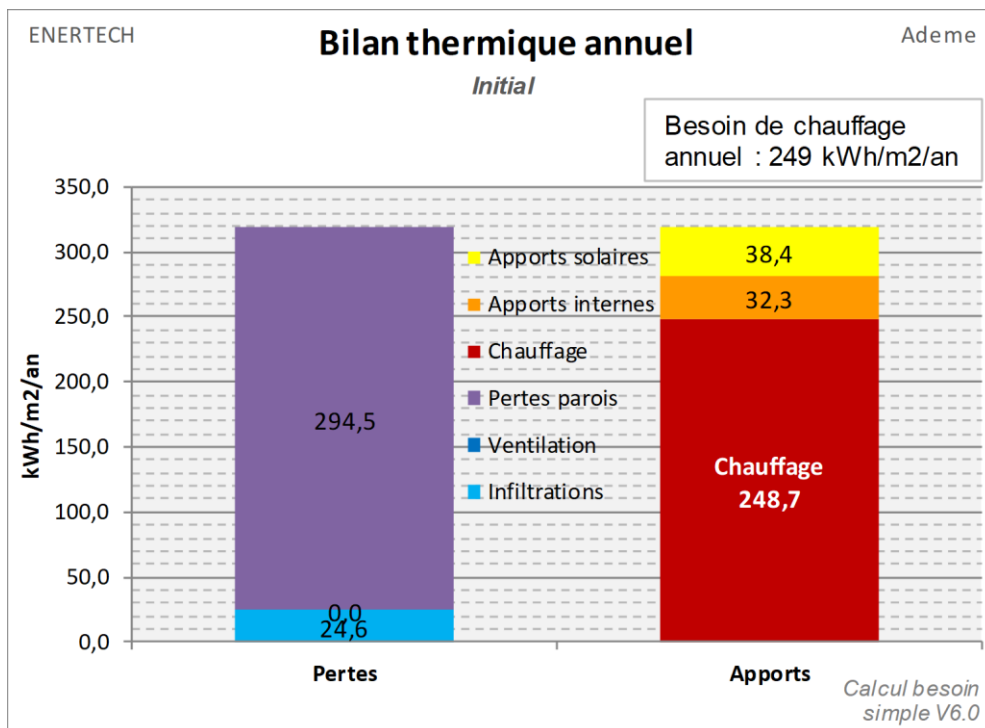


Figure 101 : Bilan thermique annuel de chauffage état initial (ensemble du parc d'avant 1982)

On voit les pertes par les parois et par infiltration (pas de ventilation dans l'état initial), dont une partie est compensée par des apports gratuits, et le reste par le besoin de chauffage calculé.

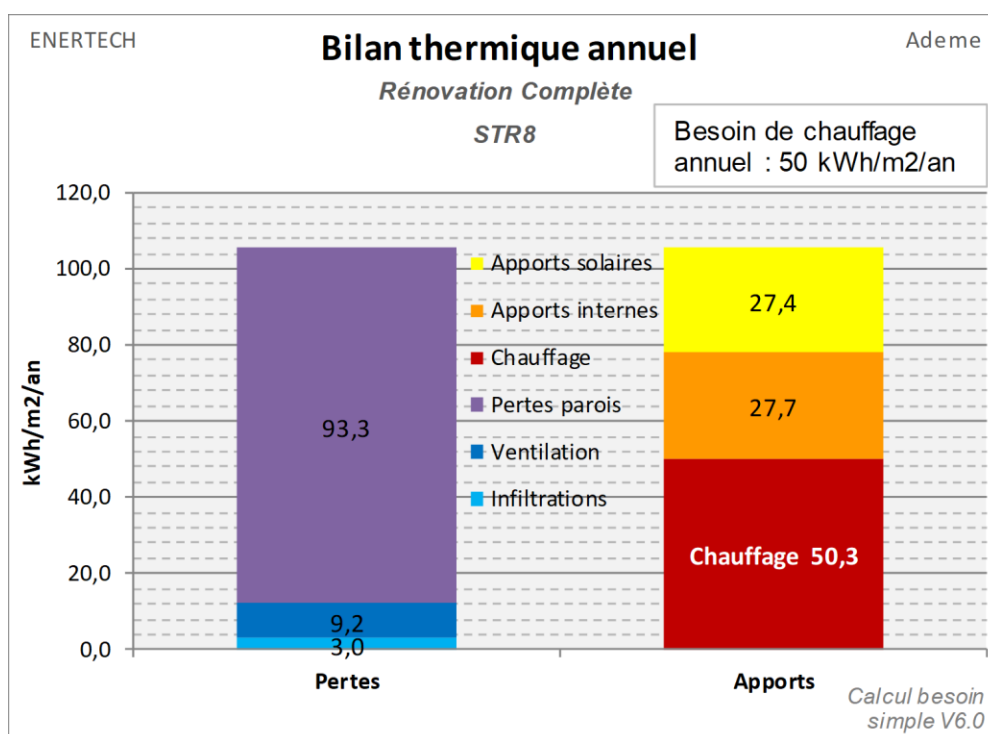


Figure 102 : Bilan thermique annuel de chauffage (rénovation complète et performante de l'ensemble du parc d'avant 1982).

Le besoin de chauffage est **réduit d'un facteur 5** par rapport à l'initial.

Niveau de consommation du parc existant de maisons

Les résultats de la modélisation des 10 typologies TABULA (TABULA Episcopo, 2015) avant rénovation ont été l'occasion d'échanger sur la consommation de chauffage du parc existant, et de la comparer à d'autres sources.

Le graphique de la Figure 103 présente une compilation de différentes études et bases de données décrivant la consommation du parc résidentiel pour les bâtiments livrés avant 1975, ceux livrés de 1975 à 2000 et après. Les consommations sont exprimées en kWh d'énergie primaire (coefficient 2,58 pour l'électricité) par m² SHAB, pour les deux usages Chauffage et Eau Chaude Sanitaire (ECS). Les données ont été ramenées au même périmètre en effectuant des moyennes pondérées sur la base du nombre de logements par année de construction (données du CEREN), et si besoin la consommation d'ECS a été estimée.

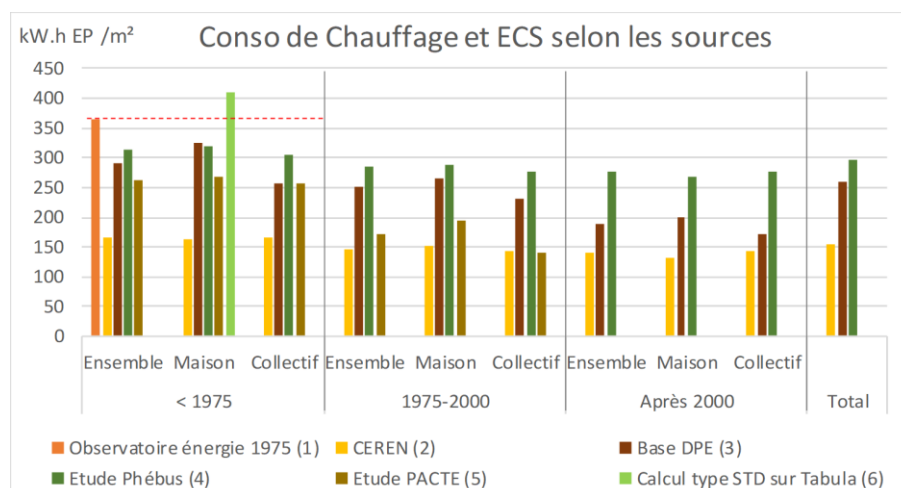


Figure 103 : Comparaison des consommations de chauffage et ECS du parc par période de construction et selon différentes sources de données (comparaison réalisée par Enertech)

Les sources comparées sont :

- **L'observatoire de l'énergie de 1975⁶⁵**, valeur paraissant fiable pour le point d'origine du parc d'avant 1975 puisqu'elle quantifie au total les consommations d'énergie finale (mais énergie primaire et énergie finale étaient sensiblement identiques vu le peu de chauffage électrique existant à l'époque) du secteur résidentiel en 1975. Cette valeur est d'ailleurs cohérente avec les Chiffres Clés du Bâtiment de 2013 de l'ADEME⁶⁶, qui indique une consommation moyenne du parc de 352 kWh_{EP}/m² en 1973. Elle ne prend pas en compte les rénovations énergétiques réalisées depuis 1975. Ceci peut expliquer une part de l'écart avec les autres sources, mais à l'échelle du parc les rénovations réellement impactantes sur le plan énergétique ont été insuffisamment nombreuses pour expliquer un rapport de 1 à 2 avec certaines sources.
- **Les données du CEREN⁶⁷**, valeurs pour 2018, ramenées au m² SHAB et en énergie primaire pour les années de construction concernées. Ces données sont basées sur une enquête sur 3 500 logements. L'écart avec la source précédente sur le parc d'avant 1975 ne s'explique pas. Ces données font remonter un faible écart de performance entre le parc d'avant 1975 et celui d'entre 1975 et 2000, le faible écart entre logements collectifs et maisons (bien moins compactes, donc normalement bien plus consommatrices), et également une forte variation de la consommation de chauffage d'une année sur l'autre en plus et en moins, alors qu'elles sont corrigées du climat. Ces données ne sont pas en

⁶⁵ Observatoire de l'énergie (données des fournisseurs d'énergie) de 1975 pour les bâtiments d'avant 1975, rapporté aux chiffres INSEE de l'époque pour la surface de logements. A noter que le chauffage électrique est quasiment inexistant avant 1975, il y a équivalence entre énergie finale et primaire.

⁶⁶ ADEME, Chiffres Clés du Bâtiment édition 2013, 92p, <https://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-industrielle-services/chiffres-cles-observation>. Le chiffre cité est page 43.

⁶⁷ CEREN (Centre d'étude et de recherches économiques sur l'énergie), <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/>. Données énergie 1990-2018 du secteur résidentiel

cohérence avec les résultats des autres études. Dans la mesure où la méthodologie d'autres sources étudiées ici sont plus robustes, cette étude ne s'appuie pas sur ces données.

- **La base DPE⁶⁸** : des requêtes ont été effectuées sur la base DPE mise à disposition par l'ADEME à l'été 2019. Des données incohérentes ont été identifiées (redondance de projets, consommations très élevées ou très faibles au regard de la définition du bâti). *NB : de nouvelles données ont été mises à disposition en 2020, mais une seconde analyse n'a pas été réalisée dans le cadre de la présente étude.*
- **L'étude Phébus⁶⁹**, qui est une étude réalisée en 2013 par des bureaux de contrôle sur un échantillon représentatif de 10 000 logements, dont 2400 ont fait l'objet d'un calcul de DPE, à la suite d'une enquête en face à face. Cette source est utilisée comme référence pour la présente étude. A noter que pour les raisons exposées précédemment, les consommations sont sous-estimées par la méthode DPE. La réalité est donc plutôt supérieure aux données de Phébus.
- **L'étude PACTE - Analyse détaillée du parc résidentiel existant⁷⁰** : ce rapport présente des calculs des consommations de chauffages par typologies qui se veulent représentatives du parc (avec une pondération de leur représentativité). Après avoir fait une hypothèse sur la consommation d'ECS basée sur 40 kWh ep /m² SHAB, un écart important existe entre les valeurs de ce rapport et celles de l'ensemble des autres sources, notamment pour la période entre 1975 et 2000. La raison de cet écart n'a pas été identifiée, et dans la mesure où l'étude Phébus s'appuie sur un plus grand panel de bâtiment, c'est cette dernière source qui a été privilégiée pour les besoins de cette étude.
- Le dernier chiffre est le résultat des calculs réalisés **dans le cadre de la présente étude** sur l'ensemble des 10 typologies modélisées, pondérées de leur représentativité dans le parc, dans les différentes zones climatiques, elles encore pondérées de leur représentativité. Les systèmes de chauffage et ECS pris en compte pour ce graphique sont ceux des statistiques de l'étude PACTE citée précédemment, auxquels ont été appliqués les rendements utilisés dans l'étude (il y a donc un écart dans les parts d'énergie utilisés dans l'initial entre ce graphique et les résultats présentés en partie 2.1.2).

Conclusions :

Les différentes sources étudiées pour quantifier la consommation du parc résidentiel sont très divergentes. On constate des écarts pouvant aller du simple au double entre les sources.

Les données de l'enquête Phébus semblent être les plus proches de la consommation constatée en 1975 pour le parc concerné et des calculs physiques effectués dans la présente étude, bien que cette enquête date de 2013 et qu'elle soit basée sur un calcul de type DPE.

En comparaison aux données de l'étude Phébus, les résultats de la présente étude pour les maisons individuelles d'avant 1975 sont supérieures de 29% (sur le périmètre Chauffage et ECS, en énergie primaire). Cet écart se justifie compte tenu du fait que la méthode DPE sous-estime systématiquement les consommations de chauffage, pour les raisons exprimées précédemment.

Le point de départ avant rénovation dans la présente étude qualifie les maisons à leur niveau de consommation au moment de leur construction, c'est-à-dire **avant toute action de rénovation**. Les maisons d'avant 1975 qui ont été isolées partiellement depuis peuvent être considérées comme ayant déjà entamé un parcours de rénovation partielle par « gestes de rénovation » non coordonnés.

⁶⁸ Base DPE « nettoyée » : ont été supprimés les DPE de surface habitable inférieure à 10m² (2500 DPE écartés), écarté les consommations négatives et supérieures à 1000 kWh/m² (2500 DPE écartés), écarté les DPE pour lesquels l'année est nulle (a priori non saisie, écarte 900 DPE), et enfin les DPE pour lesquels la consommation chauffage + ECS est inférieure au besoin de chauffage calculé augmenté du besoin ECS, ce qui est impossible hors PAC de COP supérieur à 2,58. Or 775 000 DPE sont concernés par ce filtre, ce qui n'est pas cohérent.

⁶⁹ Étude Phébus (Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie) de 2013. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-performance-de-lhabitat-equipements-besoins-et-usages-de-lenergie-phebus> et d'après le document du CGDD - Chiffres et statistiques n°534, Juillet 2014, 9p.

⁷⁰ (PACTE Analyse du parc résidentiel, 2017) PACTE - Analyse détaillée du parc résidentiel existant – réalisée par POUGET Consultants, Juillet 2017, version 2.0, 130 p. Cette étude se base sur le modèle ENER-TER, similaire à la méthode 3CL-DPE.

Annexe 2 - Hypothèses de calcul

Calculs énergétiques

Le périmètre de l'approche énergétique est ici limité à consommation liée au chauffage et à la production d'ECS (voir annexe 1 pour ce choix d'affichage).

Données climatiques

L'étude se base sur les 8 zones climatiques définies par la RT2005, avec leurs 8 stations météo de référence (cf. Figure 104). La correction d'altitude n'est pas appliquée ici, les résultats suivants s'entendent donc en climat de plaine (altitude $\leq 400\text{m}$).

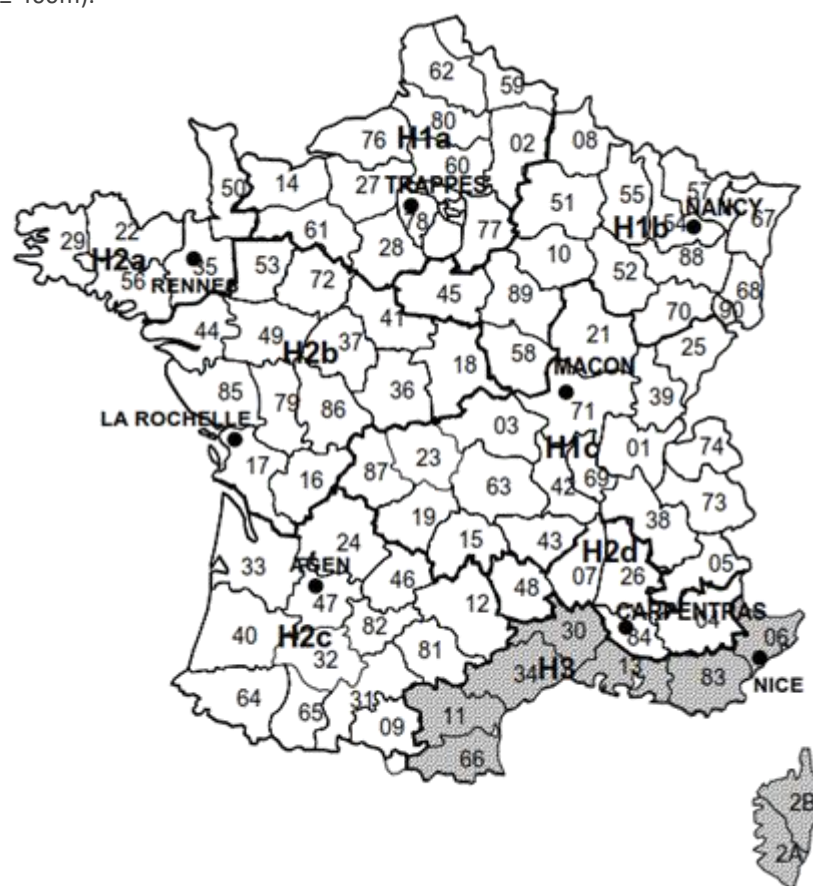


Figure 104 : Carte des zones climatiques du calcul réglementaire, et station météo de référence.
Source : règles ThCE-2005

Afin de simplifier la suite des calculs, un **climat « moyen » représentatif** de la moyenne du parc est considéré (maisons jusqu'à 1982), et ce aussi bien pour l'état initial que pour la rénovation complète et performante (RCP).

Le besoin moyen des maisons a été calculé pour :

- l'état initial et la projection rénovation complète et performante (moyenne des 10 STR, prenant en compte les cas où le plancher bas est sur terre-plein, ce qui concerne 2 typologies, voir les détails dans l'annexe 3)
- les 10 typologies (pondérées de la surface de logements dont elles sont représentatives)
- les 8 zones climatiques,

- puis calculé la moyenne nationale, pondérée du nombre d'habitants (en 2019, source INSEE, population estimée au 01/01/2019 par département) dans chaque zone climatique. Les résultats sont présentés dans le graphique Figure 105).

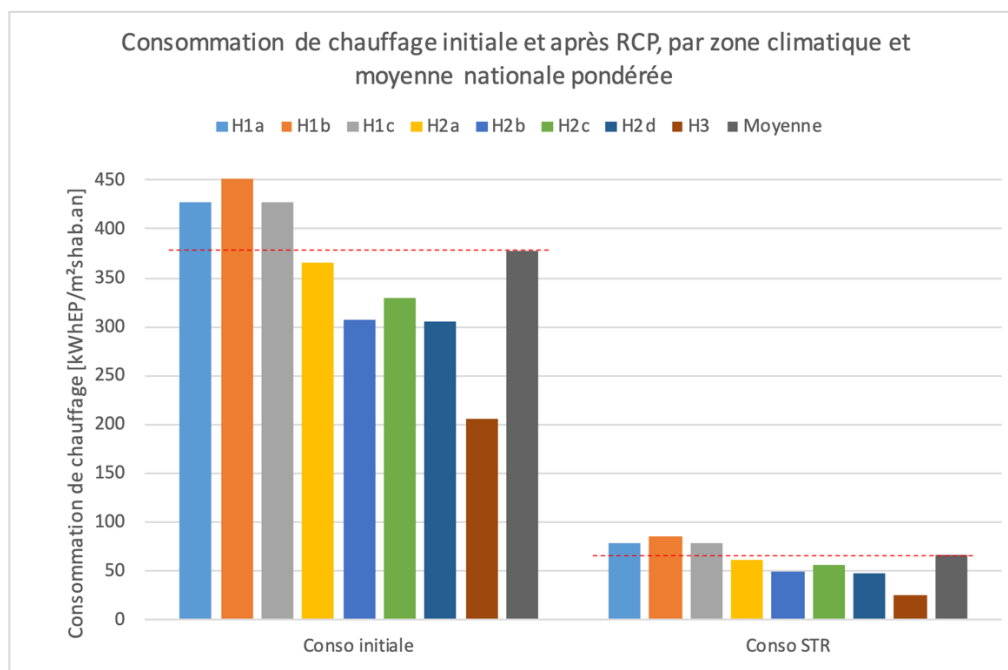


Figure 105 : Besoin de chauffage calculé pour l'état initial et la rénovation complète et performante pour l'ensemble des 10 typologies de maisons jusqu'à 1982, dans chacune des 8 zones climatiques, et en moyenne pondérée nationale

Le climat de la zone H2a (station météo de Rennes) est **représentatif de la moyenne nationale**, à +2% sur l'initial et -2% sur la RCP. Les autres climats testés (Lyon et Montélimar) se sont avérés plus éloignés de la moyenne nationale).

Sauf mention contraire, le **climat de Rennes** (zone H2a) est utilisé pour l'ensemble des simulations, dans la mesure où il est représentatif de la moyenne pondérée du parc national.

Performance des postes de rénovation

Rénovation partielle :

Les niveaux de performance de l'enveloppe se base sur les seuils des aides financières.

NIVEAUX DE PERFORMANCES À RESPECTER

Matériaux d'isolation thermique des parois opaques	Caractéristiques et performances
Planchers bas sur sous-sol, sur vide sanitaire ou sur passage ouvert	$R \geq 3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Murs en façade ou en pignon	$R \geq 3,7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Toitures terrasses	$R \geq 4,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Planchers de combles perdus	$R \geq 7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Rampants de toitures, plafonds de combles	$R \geq 6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Figure 106 : Résistances minimales des parois opaques pour obtenir le CITE, eco-PTZ, TVA à 5,5%. *Source (ADEME Aides financières, 2020).*

NIVEAUX DE PERFORMANCE THERMIQUE À RESPECTER

Matériaux éligibles	Caractéristiques et performances	Matériaux éligibles	Caractéristiques et performances
Fenêtre ou porte-fenêtre	$U_w \leq 1,3 \text{ W/m}^2.\text{K}$ et $S_w \geq 0,3$ ou $U_w \leq 1,7 \text{ W/m}^2.\text{K}$ et $S_w \geq 0,36$	Portes d'entrées donnant sur l'extérieur	$U_d \leq 1,7 \text{ W/m}^2.\text{K}$
Fenêtre de toiture	$U_w \leq 1,5 \text{ W/m}^2.\text{K}$ et $S_w \leq 0,36$		

Figure 107 : Performances minimales des menuiseries pour obtenir le CITE, eco-PTZ, TVA à 5,5%. Source : (ADEME Aides financières, 2020)

Par ailleurs la ventilation est de type Hygroréglable (qui est la pratique majoritaire en France).

La RCP, RQP, rénovation semi-globale et rénovation partielle renforcée

La performance des postes de rénovation pour les autres parcours de rénovation est basée sur les STR développées par Enertech. Les 13 STR sont présentées dans les tableaux ci-dessous. D'autres variantes peuvent être retenues dans des cas spécifiques pour lesquels l'isolation du plancher bas est impossible (voir guide (Enertech STR, 2015)).

N° Solution	Isolation Int / Ext	Etanchéité air n_{50} (vol/h)	Résist. additionnelles [$\text{m}^2.\text{K/W}$]			U_w [$\text{W/m}^2.\text{K}$] Menuis.ext.	Ventilation
			Murs	Plancher bas	Toiture		
1	Int	3,0	6,0	4,5	10	1,1	Double Flux
2	Int	3,0	4,5	4,5	10	0,8	Double Flux
3	Int	1,0	4,5	4,5	10	1,7	Double Flux
4	Int	1,0	4,5	3,0	7,5	1,4	Double Flux
5	Ext	3,0	4,5	4,5	7,5	1,7	Double Flux
6	Ext	3,0	4,5	3,0	7,5	1,4	Double Flux
7	Ext	3,0	6,0	4,5	10	0,8	Hygro
8	Ext	1,0	4,5	3,0	7,5	1,7	Double Flux
9	Ext	1,0	3,7	3,0	7,5	1,4	Double Flux
10	Ext	1,0	4,5	3,0	7,5	1,1	Hygro

Figure 108 : Tableau des 10 STR pour chauffage à combustible et PAC performante (Enertech STR, 2015).
Grille valable pour tous les chauffages par combustion et pour les pompes à chaleur (dont ETAs >126%)

N° Solution	Isolation Int / Ext	Etanchéité air n_{50} (vol/h)	Résist. additionnelles [$\text{m}^2.\text{K/W}$]			U_w [$\text{W/m}^2.\text{K}$] Menuis.ext.	Ventilation
			Murs	Plancher bas	Toiture		
1	Int	1,0	7,5	6,5	10	0,8	Double Flux
2	Ext	1,0	6,0	4,5	10	1,1	Double Flux
3	Ext	1,0	4,5	3,0	10	0,8	Double Flux

Figure 109 : Tableau des 3 STR en cas de chauffage électrique conservé (Enertech STR, 2015)
Grille valable pour le chauffage par radiateur électrique qui serait conservé après rénovation (pas de pose de convecteurs s'il n'y en avait pas avant travaux.). Ces bouquets renforcent l'isolation de l'enveloppe et conduisent à des besoins de 25 kWh/m²/an en moyenne, tenant ainsi compte du coût plus élevé en énergie primaire (et en euros) de l'électricité. En complément, les logements ainsi rénovés devront disposer d'un chauffe-eau thermodynamique ou d'une installation solaire.

Les STR prévoient des adaptations :

- Si on ne peut pas isoler le **plancher bas** sur terre-plein ou vide sanitaire inaccessible :
 - ⇒ On met alors en place une isolation périphérique (verticale ou horizontale) ;
 - ⇒ On renforce alors la résistance thermique de l'isolation des murs (dans la limite de $R=5,5 \text{ m}^2.\text{K/W}$) car la déperdition par le plancher reste très importante.
- Si on **mélange ITI et ITE** :

- ⇒ On choisit la STR en considérant qu'on est en ITI ;
- ⇒ On traite les ponts thermiques pour éviter les pathologies sur les murs sensibles ; et dans tous les cas il est recommandé de le faire pour le confort.

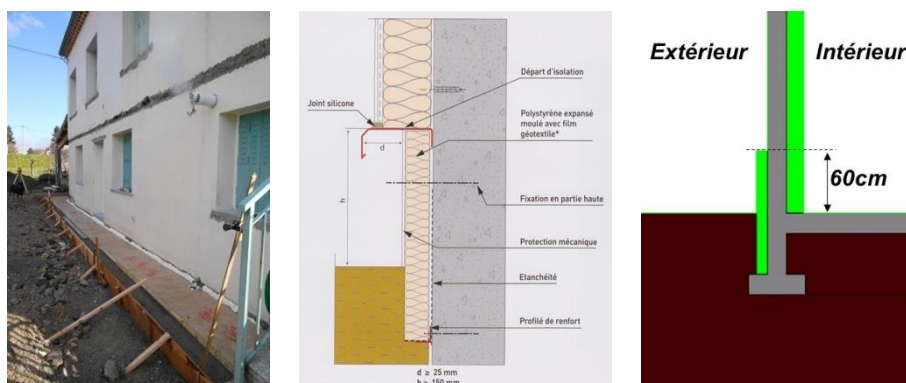


Figure 110 : Exemple de solutions pour limiter les ponts thermiques en nez de dalle. De gauche à droite : isolation périphérique horizontale sous chape, isolation périphérique en continuité d'ITE, isolation périphérique verticale avec ITI (source (de g. à d.) : RAGE, RAGE et Dorémi).

Par ailleurs on rappelle que les STR ne fixent qu'une performance thermique, mais que le choix des matériaux (isolant, freine-vapeur etc.) reste à déterminer en prenant en compte notamment les enjeux de migration de vapeur.

Calculs des déperditions

Les mètres des parois sont indiqués dans le rapport TABULA (TABULA Episcopo, 2015), ainsi que les coefficients de déperdition (U et U_w) et la représentativité de chaque typologie en nombre de logements et en surface habitable.

Les ponts thermiques ont été intégrés dès les premières améliorations thermiques de l'enveloppe :

- estimation des mètres de ponts thermiques à partir d'une hypothèse de facteur de forme et de taux de mitoyenneté (pour les typologies TH)
- vérification de la cohérence de la hauteur d'étage apparente (surface de façade et de menuiseries divisée par le linéaire de ponts thermiques plancher bas + plancher intermédiaire).
- hypothèses sur les linéaires de terrasses et de balcons, sur la base des photos de maisons représentatives des typologies présentées dans le rapport TABULA (TABULA Episcopo, 2015). La valeur de ces ponts thermiques a été affectée des valeurs usuelles ($Th-U$).

Les niveaux d'étanchéité à l'air visés dans le cadre des Solutions Techniques de Rénovation (STR) sont les suivants :

- 1 vol/h (niveau **excellent**, entre le passif et la RT2012) avec une tolérance jusqu'à 1,5 vol/h
- 3 vol/h (niveau **bon**, entre la RT2012 et la RT2005) avec une tolérance jusqu'à 3,5 vol/h

Un modèle d'étanchéité à l'air a été développé pour prendre en compte les rénovations partielles ne permettant pas de gérer des interfaces entre parois ainsi qu'une performance moindre des menuiseries utilisées dans certains parcours de rénovation (classe A*2 en Rénovation Partielle contre A*4 dans les parcours RCP).

Les sources de dégradation de l'étanchéité à l'air pour les différents parcours de rénovation sont multiples :

- Classement AEV des menuiseries (A*4 recommandé pour toutes les rénovations) ;
- Traitement de l'étanchéité à l'air des parois opaques ;
- Traitement des interfaces entre lots.

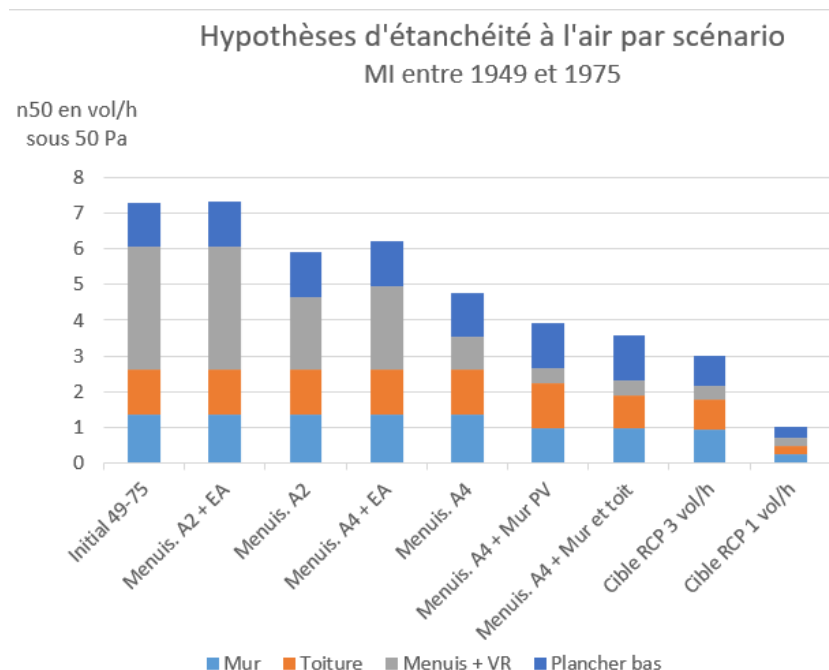


Figure 111 : Sources de fuite dans les différents parcours de rénovation et dans l'état initial

Énergies

Les énergies retenues sont issues de l'étude TABULA (TABULA Episcopo, 2015) et recoupées avec les pratiques majoritaires en rénovation BBC telles que recensées par Effinergie dans le cadre de l'Observatoire BBC (Effinergie Observatoire BBC réno, 2019), à savoir :

- la majorité (61%) des projets initialement chauffés au fioul changent d'énergie, le plus souvent pour un poêle à bois (9 sur 19),
- la majorité (72%) des logements chauffés à l'électricité restent à l'électricité,
- la majorité (94%) des logements chauffés au gaz restent sur cette énergie.

Ainsi, pour cette étude, un seul projet conserve son énergie fioul (2-TH) alors que c'était l'énergie majoritaire à l'état initial (6/10) et 3 projets passent au bois-énergie.

	Chauffage (initial ⇒ rénové)	ECS (initial ⇒ rénové)
1-SFH	Poêles fioul Poêles fioul ⇒ Chaudière bois Poêle Bois (pour RQP et RCP)	CE électrique ⇒ CE Électrique surisolé
2-	Chaudière fioul ⇒ Chaudière Gaz	Chaudière fioul
3-	Chaudière fioul ⇒ PAC air-eau	CE électrique ⇒ PAC air-
4-	Chaudière fioul ⇒ Chaudière Bois	CE électrique ⇒
5-	Chaudière fioul ⇒ PAC air-eau	CE électrique ⇒ PAC air-
1-TH	Radiateurs électriques ⇒ Poêle Bois + radiateur. Electriques en rénovation par étapes	CE électrique ⇒ CE Électrique surisolé
2-	Chaudière fioul ⇒ Chaudière Fioul	CE électrique ⇒
3-	Chaudière gaz ⇒ Chaudière Gaz	CE électrique ⇒
4-	Chaudière gaz ⇒ Chaudière Gaz	Chaudière gaz
5-	Chaudière gaz ⇒ Chaudière Gaz	Chaudière gaz ⇒

Figure 112 : Énergies retenues pour les 10 typologies et énergies de l'état initial.

REPRÉSENTATIVITÉ DES ÉNERGIES APRÈS TRAVAUX DE RÉNOVATION

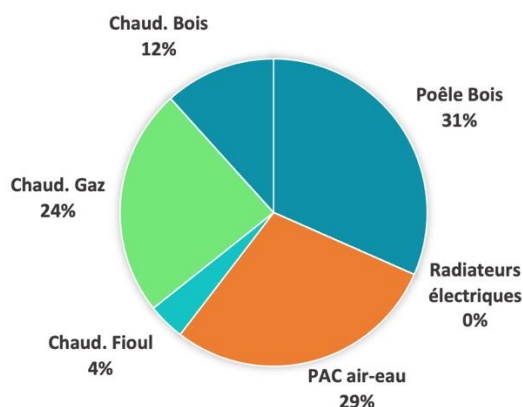


Figure 113 : Répartition des énergies de chauffage en moyenne nationale selon la représentativité des typologies (source tabula) et pour une rénovation en 1 étape.

Les hypothèses de rendements globaux des installations de chauffage (tenant compte des rendements de génération, distribution, régulation et émission) sont les suivants :

- Ancienne chaudière gaz : 75%,
- Chaudière gaz renouvelée 90%,
- Ancienne chaudière fioul : 75%,
- Chaudière fioul renouvelée 90%,
- Chaudière bois renouvelée : 85%,
- Poêle à bois ancien : 70%,
- Poêle à bois renouvelé : 75%.
- PAC air-eau renouvelée : COP annuel de 3,
- Radiateur électrique existant : 95%,
- Radiateur électrique renouvelé (appoint de poêle par exemple) : 100%.

Le rendement est dégradé en cas de surpuissance du générateur (chaudière et PAC) face à la déperdition de la maison. Le modèle de perte de rendement est présenté au § 4.2.

Pour la production ECS, le rendement des chaudières est abaissé forfaitairement de 5 points, soit par exemple 85% de rendement de génération ECS pour une chaudière gaz renouvelée. Pour une PAC double service en génération d'ECS et pour un ballon thermodynamique le calcul prend en compte un COP de 2.

Les Chauffe-eau solaires individuels (CESI) sont supposés avoir un taux de couverture de 60%.

Annexe 3 - Parcours de rénovation et résultats de calculs des 10 typologies

1-SFH

Période constructive

Avant 1915

Surface habitable : 93 m²
Niveaux chauffés : 2
Compacité : 0,93

Part du parc existant : 8,6% des logements en France
9,2% de la surface habitable

Etat initial

Murs	Brique ou moellon non isolé	Chauffage	Poêle fioul pièce par pièce
Plancher bas	Poutre métalliques sur cave non isolé	ECS	Chauffe-eau électrique
Plancher haut	Poutres en bois vers combles perdus faiblement isolé sous rampants (2cm LM)	Ventilation	Naturelle
Menuiseries	Bois simple vitrage, volets bois	Energies	Fioul + Electricité



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Le ménage souhaite améliorer son confort de vie en remplaçant l'actuel chauffage inconfortable et contraignant (poêle fioul pièce par pièce) par un poêle bois ou une chaudière bois (maison de ville accessible et place en sous-sol pour le stockage) en l'absence de réseau de gaz dans la rue.

En second poste de travaux, les occupants souhaitent remplacer les menuiseries extérieures de l'ensemble du logement pour limiter les courants d'air mais aussi embellir leur façade.

La typologie peut être protégée architecturalement (façades pierre ou briques) imposant ainsi une isolation des murs par l'intérieur et le traitement de la toiture sans impact visuel depuis l'extérieur. Une ITI est programmée en 4e position dans les parcours de rénovation partielle.

La mise en place d'une ventilation est repoussée car rarement mise en place par les ménages. Cependant, des traces de moisissure sont apparues dans la salle de bain autour des fenêtres. Après avoir demandé conseil à un artisan, celui-ci leur propose la mise en oeuvre d'une VMC hygroréglable.

La toiture est déjà faiblement isolée, aussi le ménage ne voit pas l'intérêt d'isoler plus, d'autant que le comble sert de grenier et est fort encombré !

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	Chaudière bois 7-25 kW (impossibilité de mettre un poêle) ●	Chaudière bois 7-25 kW (impossibilité de mettre un poêle) ●	Chaudière bois 6-20 kW + Menuiseries TV Uw=0,8 A4 + Ventilation double flux ●	Poêle à granulés 4-12 kW + Menuiseries TV Uw=0,8 A4 + Ventilation double flux + Plancher bas R=4,5 + ITI R=4,5 ●	STR 2 : ITI R=4,5 + Rampants R=10 + Plancher bas R=4,5 + Menuiseries TV Uw=0,8 A4 + Ventilation double flux + Poêle à granulés 2-6 kW ●
2	Menuiseries DV Uw=1,7 A2 ●	Menuiseries TV Uw=0,8 A4 ●	Plancher bas R=4,5 ●	Rampants R=10 ●	
3	Plancher bas R=3 ●	Plancher bas R=4,5 ●	ITI R=4,5 ●		
4	ITI R=3,7 ●	ITI R=4,5 ●	Rampants R=10 ●		
5	Ventilation hygroréglable ●	Ventilation double flux ●			
6	Rampants ●	Rampants R=10 ●			

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- Impossibilité technique - risque de pathologie
- Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

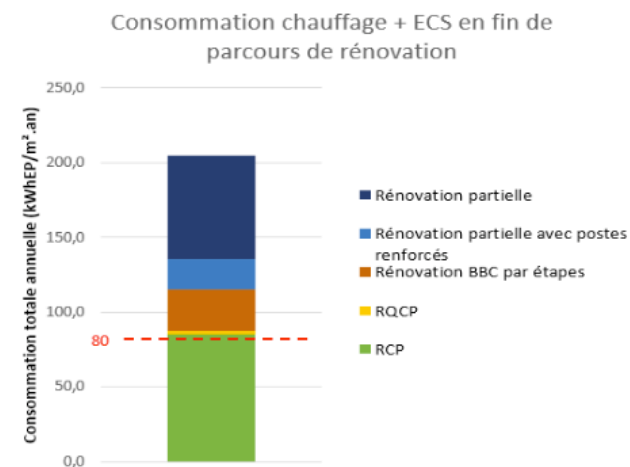
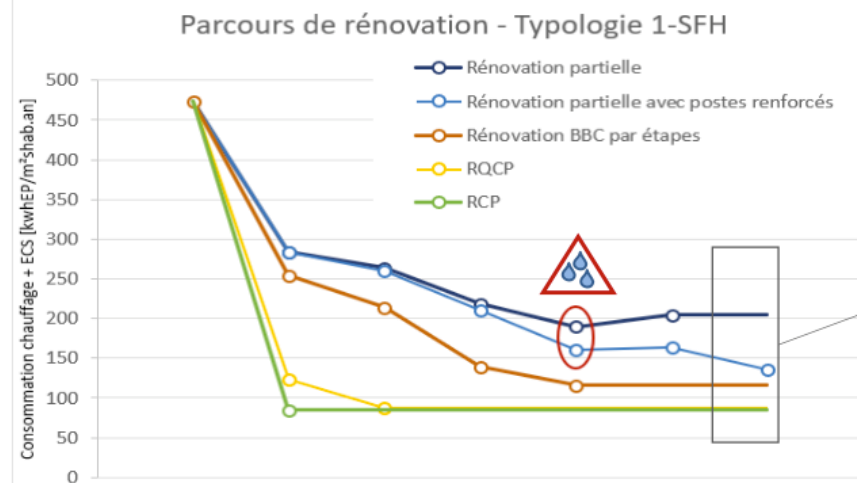
Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

-  **Pathologie** : à l'étape 4, l'isolation des murs et le remplacement des menuiseries améliorent l'étanchéité à l'air. Faute d'avoir installé une ventilation, la situation risque fortement de générer des pathologies. De plus, si les menuiseries sont posées à l'étape 2 sans dormant élargi, il reste un pont thermique autour des fenêtres, qui est un point froid qui va concentrer la condensation. Des moisissures peuvent apparaître.
- La pose des menuiseries avant l'isolation des murs, sans anticipation, empêche le traitement des retours d'isolant en tableau car le dormant de la menuiserie risque de ne pas être assez large pour accueillir l'isolant. En plus de la pathologie liée à l'humidité, cette absence d'isolation génère de fortes pertes de chaleurs et pénalise le bilan énergétique.
-  **Faute d'un conseil technique suffisant**, l'ITI est réalisée de façon classique sans isoler ni traiter l'étanchéité à l'air dans l'épaisseur du plancher bois. Des infiltrations emmènent de l'humidité sur ce pont thermique, ce qui peut à terme dégrader les solives et conduire à un risque structurel.
- Chaudière remplacée avant tous travaux de rénovation : l'équipement sera surdimensionné et fonctionnera avec un moins bon rendement au fur et à mesure de la rénovation. L'investissement est également plus élevé pour cette puissance plus forte que nécessaire à terme.
- L'isolation des rampants étant reportée, il faudrait pour assurer la continuité de l'isolant et celle de l'étanchéité à l'air, prévoir pour l'ITI un rail d'ossature bien positionné en anticipant l'épaisseur d'isolant du rampant, la partie supérieure de l'ossature étant démontable, et freine vapeur relié au mur + en attente). Ceci nous semble tellement complexe à anticiper et à réaliser que l'hypothèse a été faite d'un traitement imparfait pour tous les scénarii à part la rénovation complète où les deux postes sont traités simultanément.

Rénovation Semi-globale et Quasi-complète

- ✓ Les menuiseries sont posées avec des dormants élargis (préconisation technique supposée portée par le dispositif d'accompagnement) et conservation des volets bois, ce qui permet un bon traitement de l'étanchéité à l'air et du pont thermiques périphérique lors de la pose de l'ITI.



2-SFH

Période constructive

1915-1948

Surface habitable :	85 m²	Part du parc existant :	4,9 % des logements en France
Niveaux chauffés :	2 + combles		4,8 % des logements en France
Compacité :	0,78		

Etat initial

Murs	Briques pleines et creuses sous enduit, non isolé	Chauffage	Chaudière fioul > 1991
Plancher bas	Solives métalliques sur cave, non isolé	ECS	Couplé à la chaudière fioul
Plancher haut	Rampants isolés par 2cm de laine minérale et localement non isolés	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	Bois, simple vitrage, volets "accordéon" métallique	Energies	Fioul



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Le ménage souhaite d'abord remplacer les menuiseries, pour leur aspect et éviter les fuites d'air.

Dans un second temps, ils sont contactés pour une isolation du plancher bas à 1€, qu'ils font réaliser.

Ensuite, la chaudière fioul tombe en panne. C'est l'occasion de la remplacer par une chaudière gaz à condensation.

Il reste des parois froides en hiver, aussi le ménage réfléchit à isoler les murs. Malgré l'intérêt patrimonial de la maison (située hors zone de protection du patrimoine), ils optent pour une isolation par l'extérieur.

Cependant, l'absence de ventilation devient problématique dans les pièces humides. Lorsque des moisissures apparaissent dans la salle de bain, le ménage fait installer une VMC hygro.

L'isolation de la toiture doit être réalisée en sarking car les combles sont habités et de faible hauteur sous plafond. Cette étape, coûteuse et peu rentable, n'est pas réalisée dans le parcours de rénovation partielle.

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	Menuiseries DV Uw=1,7 A2 ●	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 ●	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Ventilation double flux + ITE R=4,5	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Plancher bas R=3 + Chaudière Gaz 1-12 kW + ITE R=4,5 + Ventilation double flux	STR 6 : Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Plancher bas R=3 + Chaudière Gaz 1-12 kW + ITE R=4,5 + Ventilation double flux + Sarking R=7,5
2	Plancher bas R=3	Plancher bas R=3	Plancher bas R=3	Sarking R=7,5 ●	
3	Chaudière Gaz 10-24 kW	Chaudière Gaz 2,5-24 kW	Chaudière Gaz 1-12 kW		
4	ITE R=3,7 ▲●	ITE R=4,5 ▲●	Sarking R=7,5 ●		
5	Ventilation hygroréglable	Ventilation double flux			
6	Sarking	Sarking R=7,5 ●			(Le choix de cette STR est courant en ITE, en visant n50 = 3 vol/h)

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- ▲● Impossibilité technique - risque de pathologie
- ▲ Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

● **Pathologie : le remplacement des menuiseries puis les différents travaux réalisés contribuent à rendre la maison plus étanche à l'air. La qualité d'air est médiocre, et de la moisissure finit par apparaître au bout de quelques années dans les pièces humides.** (NB : dans le scénario ceci arrive après l'étape 4 mais n'est pas lié techniquement à l'ITE)

● La pose des menuiseries avant l'isolation des murs, sans anticipation, empêche le traitement des retours d'isolation en tableau car le dormant de la menuiserie risque de ne pas être assez large pour accueillir l'isolant. De plus, les occultations extérieures ne peuvent pas être conservées car leur dimension n'est plus adaptée.

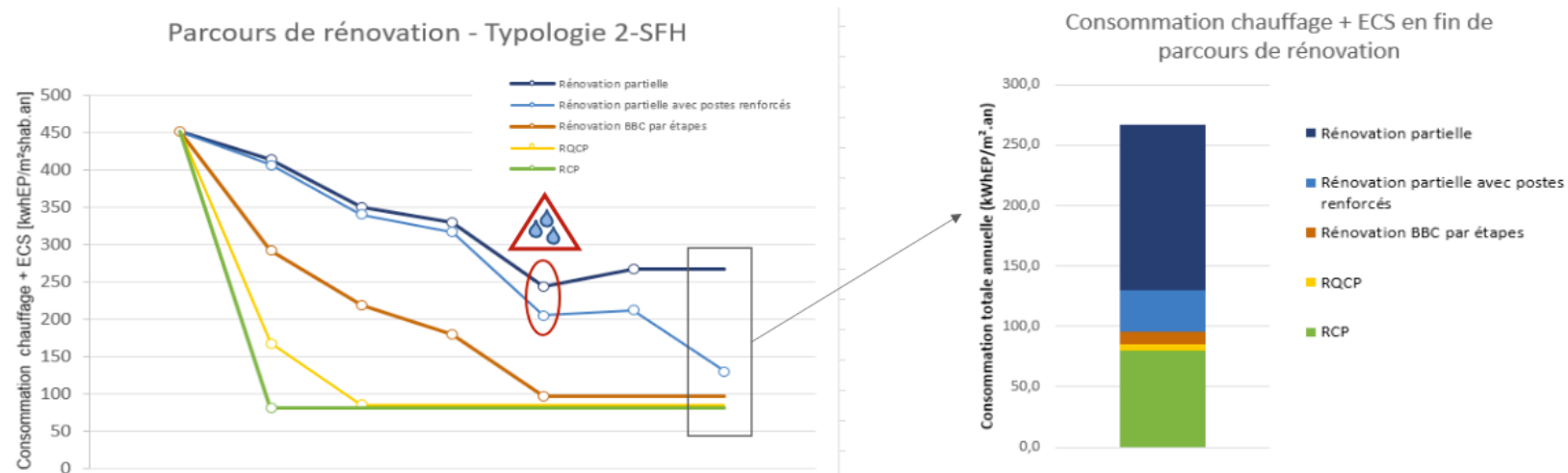
● Ventilation DF : la réalisation de prise d'air en façade après ITE nécessite des reprises d'enduit peu esthétiques. De plus, il n'est pas possible d'assurer correctement l'étanchéité à l'air autour du conduit, car le plan d'étanchéité à l'air est l'enduit existant qui n'est plus accessible. Il reste une fuite d'air à ce niveau. Il aurait fallu laisser une réservation dans l'ITE.

Tous les parcours sauf rénovation complète :

● La réalisation d'un sarking après une ITE est très complexe. Ici il y a des génoises, dont l'ITE vient recouvrir les deux premiers rangs. Lorsqu'on réalise le sarking, il reste un pont thermique important au niveau des rangs de génoise restés apparents.

Rénovation Semi-globale et Quasi-complète

✓ Les menuiseries sont posées avec des dormants élargis (préconisation technique supposée portée par le dispositif d'accompagnement) et au nu extérieur (car l'ITE est réalisée en même temps). Ceci permet de bien traiter le pont thermique sans perdre de surface vitrée et sans "effet meurtrière" de l'ITE. On peut même réutiliser les volets extérieurs s'ils sont en bon état.



3-SFH

Période constructive

1949-1967

Surface habitable : 87 m²
Niveaux chauffés : 2
Compacité : 1,19

Part du parc existant : 5,0 % des logements en France
5,0 % de la surface habitable



Etat initial

Murs	Murs briques creuses sous enduit, non isolé	Chauffage	Chaudière fioul > 1991
Plancher bas	Poutrelles-hourdis béton sur cave, non isolé	ECS	Chauffe-eau électrique
Plancher haut	Plancher bois vers combles perdus, 1cm PSE	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	Bois et PVC double vitrage 4/12/4 air, volets bois	Energies	Fioul + Electricité

Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

La facture initiale de fioul étant très élevée (3000 € par an), le ménage souhaite avant tout changer d'énergie. Il profite des aides pour faire installer une pompe à chaleur air-eau.

Par la suite, la facture énergétique restant élevée, le ménage souhaite isoler. Il profite des offres à 1€, pour les combles d'abord puis pour le plancher bas.

Les menuiseries étant vieillissantes et présentant des fuites d'air, le ménage les fait remplacer.

C'est alors que la qualité d'air se dégrade, et que des moisissures apparaissent sur certains murs (non isolés) dans les pièces humides. Le ménage fait installer en urgence une VMC hygroréglable.

Le confort reste moyen en hiver car les murs sont froids. Pourtant, l'isolation des murs, souhaitée par l'extérieur pour minimiser les nuisances, reste chère et peu rentable. La présence d'un balcon et d'un escalier extérieur complexifient également cette étape. C'est pourquoi elle n'est pas réalisée dans le parcours de rénovation partielle.

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	PAC air-eau 20 kW (non modulante) ●	PAC air-eau 8-20 kW ●	PAC air-eau 4-10 kW + Combles R=7,5 + Plancher bas R=3 + Ventilation double flux	PAC air-eau 4-10 kW + Combles R=7,5 + Plancher bas R=3 + Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Ventilation double flux	STR 6 : PAC air-eau 4-10 kW + Combles R=7,5 + Plancher bas R=3 + Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Ventilation double flux + ITE R=4,5
2	Combles R=6 ●	Combles R=7,5 ●	Menuiseries DV Uw=1,4 A4	ITE R=4,5 ●	
3	Plancher bas R=3 ●	Plancher bas R=3 ●	ITE R=4,5 ●		
4	Menuiseries DV Uw=1,7 A2 ●	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 ●			
5	Ventilation hygroréglable ●	Ventilation double flux ●			
6	Isolation des murs ●	ITE R=4,5 ●			(Le choix de cette STR est courant en ITE, en visant n50 = 3 vol/h)

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- Impossibilité technique - risque de pathologie
- Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

-  **Pathologie : le remplacement des menuiseries contribue à rendre la maison plus étanche à l'air. La qualité d'air se dégrade rapidement, et de la moisissure apparaît sur les murs des pièces humides. La ventilation mécanique aurait dû être préconisée en amont plutôt que posée après constat de la pathologie...**

- Dans le parcours de rénovation partielle, la PAC mise en œuvre est non modulante (modèle bas de gamme). Si son COP est correct aux premières étapes, il se dégrade fortement lorsque la maison est de plus en plus isolée. Dans le parcours de rénovation partielle renforcée, la PAC est modulante, ce qui réduit le problème. Toutefois la puissance minimale reste trop importante pour la performance à terme (le besoin n'est plus que de 6 kW).
- L'isolation des combles perdus est réalisée avant de savoir si les murs seront isolés par l'extérieur ou par l'intérieur. Par défaut, l'entreprise fait comme d'habitude et arrête l'isolant au droit du nu intérieur du mur. Lorsque les murs seront isolés par l'extérieur, il restera un pont thermique important, qui peut générer des pathologies.
- Les menuiseries sont remplacées avant l'ITE : par défaut des dormant classiques sont posés, ce qui ne permettra pas de faire des retours d'ITE en tableaux. Il restera un pont thermique important, ainsi qu'un risque pathologique notamment si les menuiseries sont en "pose rénovation" sur dormant bois existant.

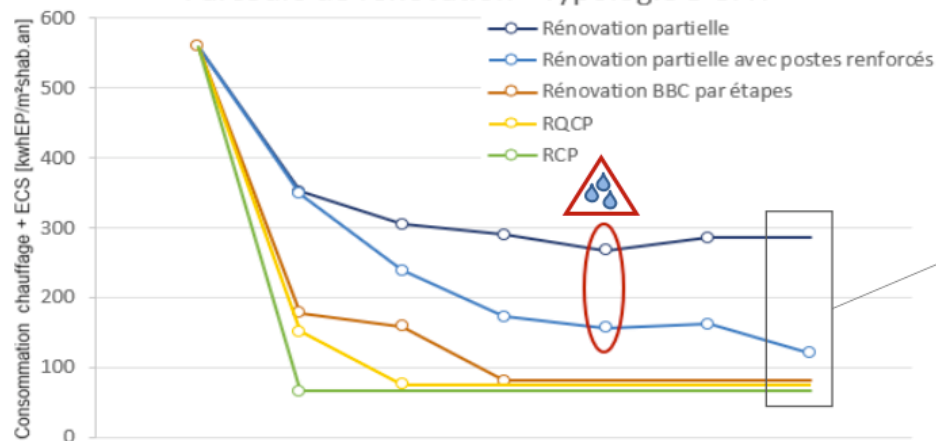
Rénovation Semi-globale et Quasi-complète

- Les menuiseries sont posées avec des dormant élargis. Cependant elles sont posées au nu intérieur, comme les menuiseries existantes, et un volet roulant est mis en œuvre. Le coffre de VR est intérieur et génère des défauts d'étanchéité à l'air. La surface vitrée est réduite. De plus lorsque l'ITE sera réalisée, il restera un pont thermique au niveau du rail de volet roulant.

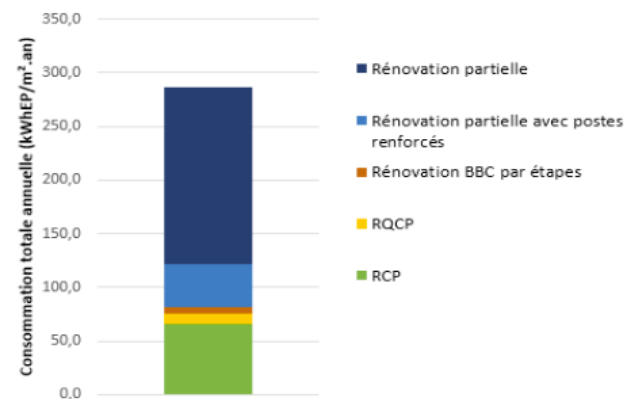
Rénovation Globale

- ✓ Menuiserie et ITE sont réalisées en même temps, ce qui permet une pose au nu extérieur. Le coffre de volet roulant est intégré dans l'ITE avec traitement du pont thermique. La performance est optimale, la surface vitrée est conservée, et l'esthétique de l'ensemble est réussie.

Parcours de rénovation - Typologie 3-SFH



Consommation chauffage + ECS en fin de parcours de rénovation



4-SFH

Période constructive

1968-1974

Surface habitable :	96 m²	Part du parc existant :	4,1 % des logements en France
Niveaux chauffés :	1 + combles		4,6 % de la surface habitable
Compacité :	2,04		

Etat initial

Murs	Parpaings creux, non isolé	Chauffage	Chaudière fioul > 1991
Plancher bas	Dalle béton non isolée sur locaux non chauffés et garage	ECS	Chauffe-eau électrique
Plancher haut	Rampants isolés par 2cm de laine minérale	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	Bois double vitrage 4/12/4 air et volet battant bois	Energies	



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Contacté pour une isolation du plancher bas à 1€, le ménage commence par réaliser ce poste.

Ensuite, voyant que sa facture de fioul reste élevée, ils choisissent de passer à une chaudière à granulés de bois.

L'étage en comble aménagé est peu confortable en été. Suite à une canicule, le ménage décide de le faire isoler. La hauteur sous plafond étant limitée, ils optent pour une isolation en sarking.

L'étanchéité à l'air est grandement améliorée notamment sous comble. Cependant, faute d'une ventilation suffisante, la douche de l'étage est trop humide, la peinture craquelle et les joints du carrelage moisissent. Le ménage réagit en faisant poser une ventilation hygroréglable.

Voulant améliorer leur confort sans perdre en surface habitable, le ménage fait réaliser quelques années plus tard une isolation par l'extérieur, tout en conservant l'aspect pierre du sous-bassement.

Plus tard, le ménage hésite à faire changer les fenêtres. Cependant ils constatent que pour bien faire il faudrait réaliser des retours d'isolant en tableaux, et pour cela reprendre l'ITE et déposer et adapter les volets battants. Découragés, ils reportent ces travaux. Après tout les menuiseries existantes sont déjà du double vitrage...

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	Plancher bas R=3	Plancher bas R=3	Plancher bas R=3 + Chaudière bois 4,5-15 kW + Sarking R=7,5 + Ventilation double flux	Plancher bas R=3 + Chaudière bois 2-8 kW + Sarking R=7,5 + Ventilation double flux + ITE R=4,5	STR 6 : Plancher bas R=3 + Chaudière bois 2-8 kW + Sarking R=7,5 + Ventilation double flux + ITE R=4,5 + Menuiseries DV Uw=1,4 A4
2	Chaudière bois 10-20 kW	Chaudière bois 6-20 kW	ITE R=4,5	Menuiseries DV Uw=1,4 A4	
3	Sarking R=6	Sarking R=7,5	Menuiseries DV Uw=1,4 A4		
4	Ventilation hygroréglable	Ventilation double flux			
5	ITE R=3,7	ITE R=4,5			
6	Menuiseries	Menuiseries DV Uw=1,4 A4			

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- Impossibilité technique - risque de pathologie
- Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

-  **Pathologie : le sarking avec membrane d'étanchéité à l'air réduit fortement les fuites d'air. La qualité d'air se dégrade rapidement, notamment dans la salle de bain de l'étage, qui ne dispose pas de fenêtre, et faute d'une ventilation mécanique.**

- De plus, le sarking est réalisé sans anticiper l'interface avec l'ITE : le débord des chevrons existants n'est pas scié et la membrane d'étanchéité à l'air est raccordé tant bien que mal en tête de mur. Une fois le sarking fini, il ne sera plus possible de raccorder correctement l'étanchéité à l'air, qui restera imparfaite.
- Dans le parcours de rénovation partielle, la chaudière bois mise en œuvre est peu modulante. Son rendement se dégrade fortement lorsque la maison est de plus en plus isolée. Dans le parcours de rénovation partielle renforcée, la chaudière est fortement modulante, ce qui réduit le problème. Toutefois la puissance minimale reste trop élevée en mi-saison.
- Faute d'un accompagnement technique suffisant, l'ITE est arrêtée au niveau du décroché en façade, soit au droit de la dalle. Il reste un pont thermique important (mais a priori non pathologique ici) à la liaison du plancher bas avec le mur.

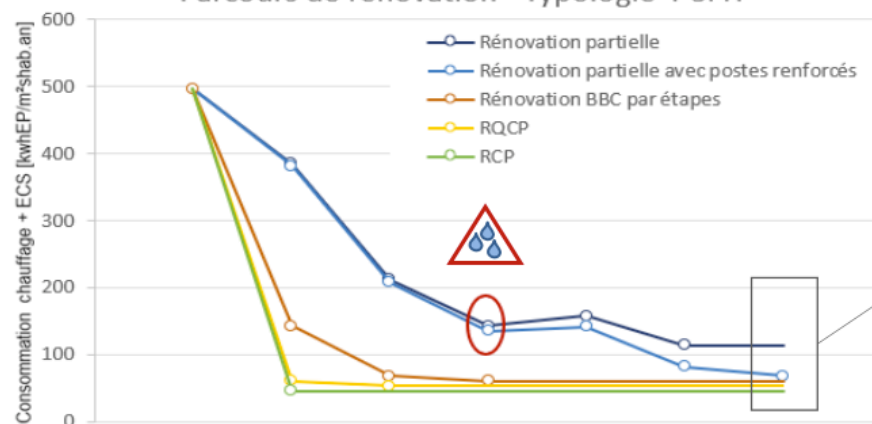
Tous les parcours sauf rénovation complète :

- L'ITE est réalisée avant le remplacement des menuiseries. Or les fenêtres existantes n'ont pas un dormant assez large pour accueillir un retour d'ITE en ébrasements. L'ITE s'arrête au droit des tableaux, ce qui permet de plus de réutiliser les volets bois. Cependant, le jour où l'on veut remplacer les menuiseries, il faudrait alors faire revenir un façadier pour faire le retour d'ITE, et également déposer et recouper les volets bois qui sont trop grands pour la cote en tableaux après isolation. Le surcoût est très important, le ménage renonce et il restera un pont thermique important et potentiellement pathologique.

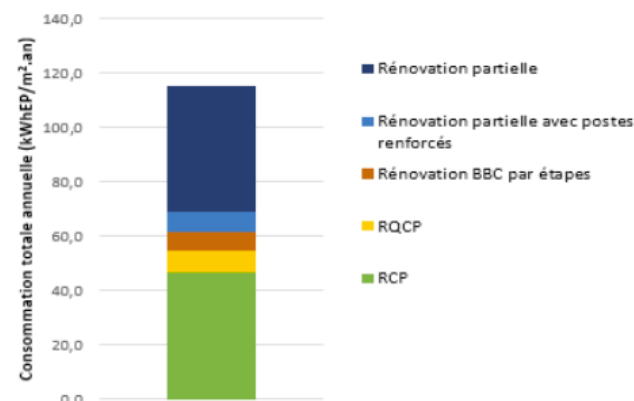
Rénovation Semi-globale

- Grâce aux conseils de la plateforme de rénovation, l'interface du sarking avec ITE est anticipée : les débords de chevrons sont sciés et la membrane est rabattue sur l'enduit existant. Un parement provisoire est mis en place pour cacher ce raccord. Ce n'est pas très beau mais cela incite à réaliser plus vite l'ITE !

Parcours de rénovation - Typologie 4-SFH



Consommation chauffage + ECS en fin de parcours de rénovation



5-SFH

Période constructive

1975-1981

Surface habitable :	101 m ²	Part du parc existant :	5,1 % des logements en France
Niveaux chauffés :	1 + comble		6,0 % de la surface habitable
Compacité :	1,01		

Etat initial

Murs	Parpaings + 4cm PSE en ITI	Chauffage	Chaudière fioul standard > 1991
Plancher bas	Dalle béton sur cave et garage + isolation 8cm	ECS	Chauffe-eau électrique
Plancher haut	Plancher béton isolé par 4cm de polystyrène et rampant isolé par 8cm de laine minérale	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	Bois, double vitrage 4/6/4 air, volet roulant	Energies	Fioul + Electricité



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Bien qu'un peu isolée depuis la construction, cette maison chauffée au fioul coût cher. Le ménage profite des aides pour faire installer une pompe à chaleur air-eau. En été, les chambres de l'étage surchauffent. Le ménage décide d'isoler la toiture. Afin de conserver la surface habitable, ils optent pour un sarking. Cependant l'amélioration de l'étanchéité à l'air réalisée grâce au sarking impacte la qualité d'air intérieure. Des peintures craquèlent. Le ménage fait poser une VMC hygro pour régler le problème.

La maison est vendue. Les acquéreurs profitent du fait que la maison est vide pour l'isoler par l'intérieur. Quelques années après, le nouveau ménage souhaite remplacer les menuiseries qui sont vieillissantes. Le plancher bas ayant déjà 8cm d'isolant, le ménage ne voit pas l'intérêt de l'isoler plus (dans le parcours rénovation partielle).

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	PAC air-eau 15 kW (non modulante) ●	PAC air-eau 8-20 kW ●	PAC air-eau 6-14 kW + Sarking R=10 + Ventilation double flux + ITI R=4,5 ●	PAC air-eau 6-14 kW + Ventilation double flux + ITI R=4,5 + Menuiseries DV Uw=1,7 A4 + Plancher bas R=4,5 ●	STR 3 : PAC air-eau 6-14 kW + Ventilation double flux + ITI R=4,5 + Menuiseries DV Uw=1,7 A4 + Plancher bas R=4,5 + Sarking R=10 ●
2	Sarking R=6 ●	Sarking R=10 ●	Menuiseries DV Uw=1,7 A4 ●	Sarking R=10 ●	
3	Ventilation hygroréglable ●	Ventilation double flux ●	Plancher bas R=4,5 ●		
4	ITI R=3,7 ●	ITI R=4,5 ●			
5	Menuiseries DV Uw=1,7 A2 ●	Menuiseries DV Uw=1,7 A4 ●			
6	Plancher bas ●	Plancher bas R=4,5 ●			

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- Impossibilité technique - risque de pathologie
- Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

-  La réalisation du sarking à l'étape 2, avec pose d'un freine-vapeur, améliore l'étanchéité à l'air de l'étage notamment. Faute d'une ventilation suffisante, des pathologies sont à craindre notamment dans les pièces humides. Une ventilation mécanique est nécessaire.
- La PAC posée à l'étape 1 se doit d'avoir une puissance suffisante à ce stade. Dans le parcours de rénovation partielle, nous avons supposé qu'un modèle bas de gamme non modulant est mis en œuvre : il devient surpuissant en fin de parcours et fonctionne alors avec un COP dégradé. Dans le parcours de rénovation partielle renforcé, le modèle est modulant ce qui réduit le problème, mais il reste trop puissant à terme et de nouveau le COP est dégradé.
- Faute d'un conseil technique suffisant, l'ITI est réalisée de façon classique sans isoler ni traiter l'étanchéité à l'air dans l'épaisseur du plancher intermédiaire en bois. Des infiltrations emmènent de l'humidité sur ce pont thermique, ce qui peut à terme dégrader les solives et conduire à un risque structurel.

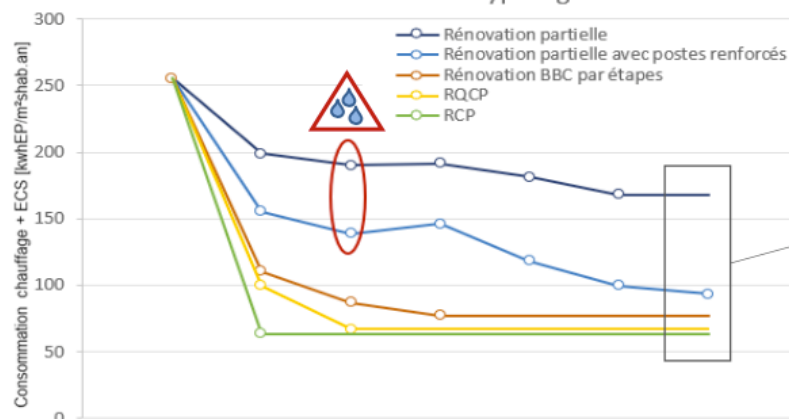
Rénovations partielles et Semi-globale

- La pose des menuiseries après l'ITI nécessite de casser les ébrasements pour déposer la menuiserie existante et reprendre l'isolation et l'étanchéité à l'air. Ceci génère un surcoût, et l'incompréhension du ménage que l'on doit casser et refaire une réalisation aussi récente. Le remplacement du coffre de volet roulant nécessite également de reprendre le parement.
- Tous les parcours sauf rénovation complète :
- La liaison d'étanchéité à l'air entre sarking et ITI est toujours complexe, car il faut traverser le plan des solives de la toiture. C'est encore plus complexe par étapes, car il faut ici intervenir par-dessous lorsqu'on procède à l'ITI quelques années après avoir fait le sarking. Il y a de fortes chances pour que cela ne soit pas fait, laissant ainsi un défaut d'étanchéité à l'air et un défaut d'isolation dans l'épaisseur des solives.

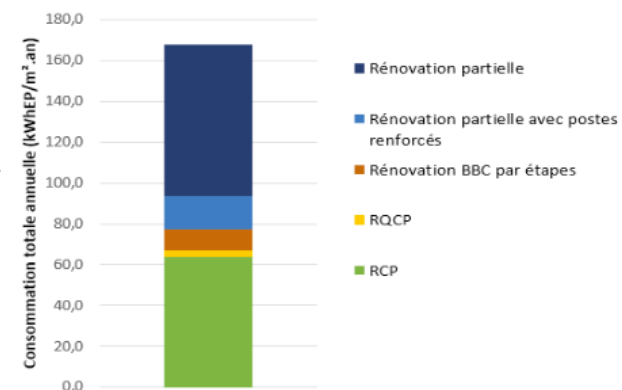
Rénovation Globale

- ✓ Les travaux réalisés conjointement permettent la coordination des corps d'état, d'éviter les pathologies, d'atteindre un résultat plus performant, et à un coût plus faible.

Parcours de rénovation - Typologie 5-SFH



Consommation chauffage + ECS en fin de parcours de rénovation



1-TH

Période constructive

avant 1915

Surface habitable :	93 m²	Part du parc existant :	2,6 % des logements en France
Niveaux chauffés :	2 + combles		2,8 % de la surface habitable
Compacité :	0,71		

Etat initial

Murs	Pierre de taille et brique sous enduit, non isolé	Chauffage	Convecteurs électriques
Plancher bas	Sur terre-plein non isolé	ECS	Chauffe-eau électrique
Plancher haut	Ramplants légèrement isolés (2cm LM) , combles perdus non isolés	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	Bois simple vitrage, volets battants bois.	Energies	Electrique



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Le ménage souhaite en premier lieu remplacer les menuiseries qui sont anciennes.

Quelques années après, ils souhaitent améliorer le confort du comble habité. Ils font isoler les combles, le rampant. Bien conseillés, ils font isoler le pied droit (partie de mur sous le rampant) en même temps.

Cependant, l'étanchéité à l'air de l'étage est devenue bien meilleure, aussi la ventilation naturelle ne suffit plus à évacuer l'humidité. Des traces d'humidité apparaissent autour des menuiseries de l'étage. Le ménage fait ajouter une ventilation hygroréglable pour résoudre ce problème.

Si le comble est devenu confortable, les autres niveaux sont toujours froids en hiver et le chauffage électrique coûte encore cher. Afin de préserver l'aspect extérieur, le ménage fait réaliser une ITI.

Afin d'abaisser encore la facture de chauffage électrique, le ménage fait installer un poêle à bois, et conserve les radiateurs électriques en appoint.

La maison étant sur terre-plein, l'isolation du plancher bas ne peut se faire que par-dessus. C'est une intervention lourde en site occupé, et coûteuse. Le ménage préfère ne pas réaliser ce poste (dans le parcours rénovation partielle).

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	Menuiseries DV Uw=1,7 A2 ●	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 ●	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Comble et rampant R=7,5 + ITI du pied droit R=4,5 + Ventilation double flux	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Comble et rampant R=7,5 + ITI complète R=4,5 + Ventilation double flux + Poêle à bois 3-8 kW (appoint radiateur électrique)	STR 4 : Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Comble et rampant R=7,5 + ITI complète R=4,5 + Ventilation double flux + Poêle bois 3-6 kW (sans appoint) + Plancher bas sous chape R=3
2	Comble et rampant R=6 + ITI du pied droit R=3,7 ●	Comble et rampant R=7,5 + ITI du pied droit R=4,5 ●	Complément ITI R=4,5 ●	Plancher bas isolé sous chape R=3 ●	
3	Ventilation hygroréglable ●	Ventilation double flux ●	Poêle à bois 5-12 kW (appoint radiateur électrique) ●		(STR choisie pour l'ITI et le besoin de minimiser l'épaisseur d'isolant du plancher bas.
4	Complément ITI R=3,7 ●	Complément ITI R=4,5 ●	Plancher bas isolé sous chape R=3 ●		On vise n50 = 1 vol/h, mais nous avons supposé qu'on n'atteint "seulement" n50 = 2 vol/h)
5	Poêle à bois 5-12 kW (appoint radiateur électrique) ●	Poêle à bois 5-12 kW (appoint radiateur électrique) ●			
6	Plancher bas ●	Plancher bas isolé sous chape R=3 ●			

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- Impossibilité technique - risque de pathologie
- Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

Les menuiseries sont remplacées en feuillure dans ce mur ancien. Un dormant classique est mis en œuvre pour ne pas perdre en surface vitrée. Lorsqu'on vient faire l'ITI quelques années par la suite, il n'est pas possible de faire un retour d'isolant ni de traiter correctement l'étanchéité à l'air. Il reste un point froid et des fuites.

Pathologie : l'isolation du rampant et pied droit avec membrane d'étanchéité à l'air réduit fortement les fuites d'air du comble aménagé. Faute d'une ventilation mécanique, le point froid autour des menuiseries concentre la condensation, et génère des moisissures.

Le choix d'un poêle à bois de faible puissance est pertinent pour la performance à terme de la maison. Cependant, faute d'isolation du plancher bas dans le parcours de Rénovation Partielle, l'isolation n'est pas

Rénovations partielles et Semi-globale

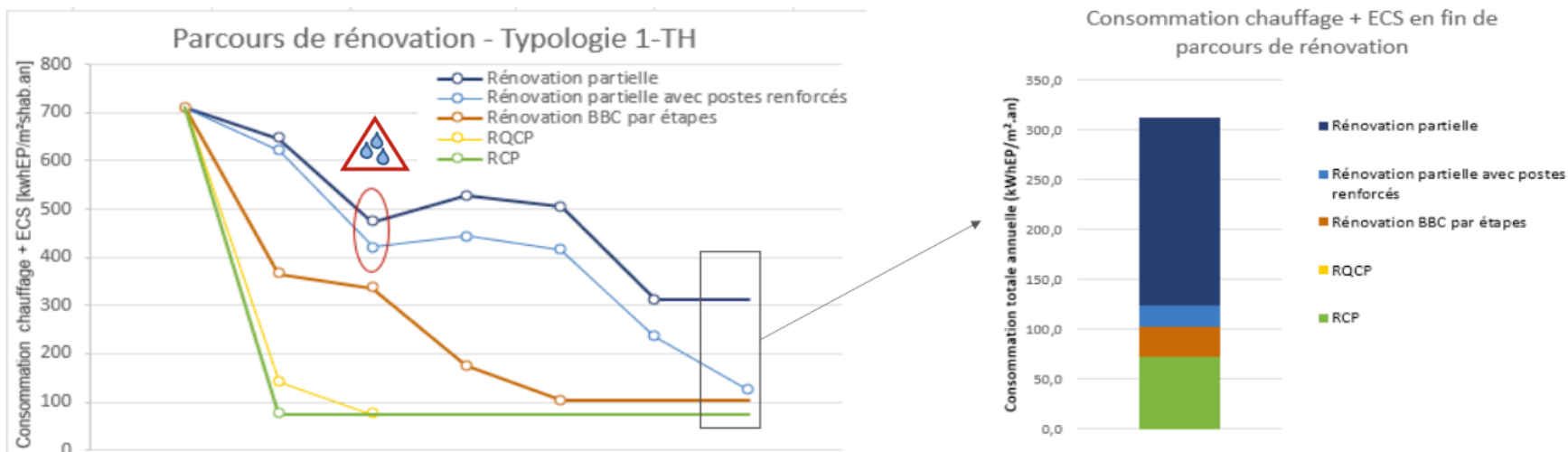
Cette typologie de maison présente un plancher intermédiaire bois. Le fait d'isoler d'abord le pied droit sous rampant puis le reste des murs laisse peu de chance à ce que les artisans traitent la continuité d'étanchéité à l'air et d'isolation dans l'épaisseur du plancher. Des infiltrations emmènent de l'humidité sur ce point froid ce qui peut à terme dégrader les solives et conduire à un risque structurel.

Tous les parcours sauf rénovation complète :

L'isolation du plancher bas par-dessus (sous chape ou dans un plancher bois) nécessite d'anticiper une hauteur suffisante des seuils de portes extérieures et portes-fenêtres. Ici seule la porte d'entrée est concernée : or c'est le point le plus difficile à traiter par étapes : en effet la réglementation PMR ne permet pas de mettre en œuvre un seuil haut d'une dizaine de centimètres au moment où l'on change les menuiseries, en attendant d'isoler le plancher bas. Il faudra soit remplacer la porte quand on isole le plancher bas, soit renoncer à isoler l'entrée de la maison.

Tous les parcours :

Isoler le pied droit en même temps que le rampant permet d'assurer la continuité de l'isolation et de l'étanchéité à l'air entre rampant et ITI, qui aurait été très complexe en dissociant ces travaux.



2-TH

Période constructive

1915-1948

Surface habitable :	85 m²	Part du parc existant :	1,4 % des logements en France
Niveaux chauffés :	2		1,4 % de la surface habitable
Compacité :	0,82		

Etat initial

Murs	Moellons calcaire ferme 40cm sous enduit	Chauffage	Chaudière fioul > 1991
Plancher bas	Solives métalliques non isolées, sur cave	ECS	chauffe-eau électrique
Plancher haut	Dalle béton et plancher bois (2 zones) vers comble non aménagé, isolé par 1cm de polystyrène	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	Bois, simple vitrage, sans occultation	Energies	Fioul + Electricité



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Pour des raisons esthétiques, le ménage souhaite changer les menuiseries de la façade principale seulement.

Par la suite, ils souhaitent améliorer la performance énergétique du logement en bénéficiant de l'isolation des combles à 1€.

La chaudière, ancienne, tombe en panne. Bien conseillé, le ménage opte pour une chaudière modulante.

Le ménage souhaite isoler les murs, par l'intérieur pour garder la pierre apparente à l'extérieur. Mal conseillé en revanche, il va au moins cher et fait poser un doublage collé.

Les menuiseries anciennes restantes sont fuyantes, et dépourvues d'occultations. Le ménage les fait remplacer et ajoute des volets roulants. L'artisan soulève la question des entrées d'air. Le ménage s'approprie le sujet de la ventilation et décide de faire poser une ventilation hygroréglable.

Il resterait à isoler le plancher bas, mais il y a des tuyaux de chauffage en sous-face du plancher bas dans la cave qui complexifient l'isolation. Le ménage est lassé des nuisances des travaux successifs et ne donne pas suite.

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	50% des Menuiseries DV Uw=1,7 A2	50% des Menuiseries DV Uw=1,4 A4	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Combles R=7,5 + Plancher bas R=3 + Ventilation double flux	Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Combles R=7,5 + Plancher bas R=3 + Ventilation double flux + Chaudière Fioul 4,5-14 kW	STR 4 : Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Combles R=7,5 + Plancher bas R=3 + Ventilation double flux + Chaudière Fioul 4,5-14 kW + ITI R=4,5
2	Combles R=6	Combles R=7,5	Chaudière Fioul 4,5-14 kW	ITI R=4,5 (avec membrane)	
3	Chaudière Fioul 4,5-14 kW	Chaudière Fioul 4,5-14 kW	ITI R=4,5 (avec membrane)		
4	ITI R=3,7 (doublage collé)	ITI R=4,5 (doublage collé)			
5	Reste des Menuiseries + Ventilation hygroréglable	Reste des Menuiseries + Ventilation double flux			
6	Plancher bas	Plancher bas R=3			(Pour cette typologie compacte il semble possible de viser un n50 de 1 vol/h en ITI avec membrane, d'où le choix de la STR 4)

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- Impossibilité technique - risque de pathologie
- ⚠ Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

- L'isolation par doublage collé ne permet pas une étanchéité à l'air performante ni ne régule pas correctement la migration de vapeur, en particulier pour les murs anciens. De la moisissure risque fort d'apparaître entre le mur et l'isolant. Cela ne se voit pas, mais la conséquence peut être une dégradation de la qualité d'air intérieur, les spores des moisissures étant un allergène puissant.
- De plus, l'absence de ventilation à l'étape 4 ne permet pas d'évacuer efficacement la vapeur d'eau. Le risque de moisissure, ici en particulier derrière le doublage collé, est particulièrement élevé. Or dès que la moisissure a installé son mycélium (ses racines), il devient très difficile de s'en débarrasser...
- La pose des menuiseries après l'ITI nécessite de casser les ébrasements pour déposer la menuiserie existante et reprendre l'isolation et l'étanchéité à l'air. Ceci génère un surcoût, et l'incompréhension du ménage que l'on doit casser et refaire une réalisation aussi récente. La mise en place de volets roulants nécessite également de reprendre le parement.

Rénovations Semi-globale et Quasi-complète

- La réalisation de l'ITI après la pose des fenêtres nécessite d'avoir anticipé la présence de dormants élargis aux étapes précédentes. Dans ces parcours nous avons supposé que le ménage a bénéficié d'un accompagnement technique qui a permis cette anticipation. En revanche, l'intégration du volet roulant a été faite en coffre intérieur, qui ne sera pas intégré à l'ITI pour rester démontable, aussi l'étanchéité à l'air va rester mauvaise au niveau de ces coffres de volet roulant.

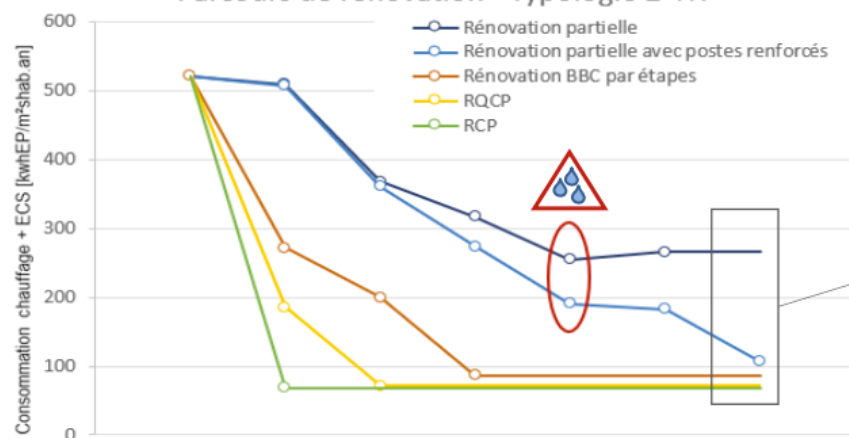
Rénovations Semi-globale, Quasi-complète et Complète

- ✓ L'ITI avec ossature et freine-vapeur continu, avec un choix adapté des matériaux (isolant et membrane choisis selon la nature de la pierre), permettent de garantir la pérennité du bâti et d'atteindre une performance élevée d'étanchéité à l'air.

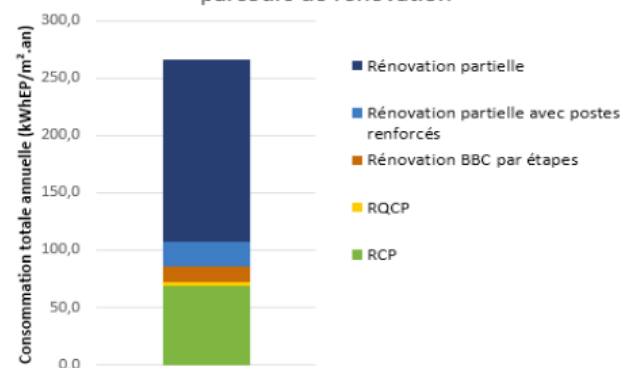
Tous les parcours :

- Malgré le choix pertinent d'une chaudière modulante de faible puissance (dans la limite des modèles disponibles sur le marché), la chaudière Fioul reste bien trop puissante pour la performance à terme. Le rendement en est dégradé en fin de parcours.

Parcours de rénovation - Typologie 2-TH



Consommation chauffage + ECS en fin de parcours de rénovation



3-TH

Période constructive

1949-1967

Surface habitable :	87 m²	Part du parc existant :	1,3 % des logements en France
Niveaux chauffés :	2		1,3 % de la surface habitable
Compacité :	1,01		

Etat initial

Murs	Parpaing machefer, non isolé	Chauffage	Chaudière gaz condensation > 2012
Plancher bas	Béton de machefer, non isolé	ECS	Chauffe-eau électrique
Plancher haut	Plancher bois vers combles perdus, non isolé	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	PVC, double vitrage 4/12/4 air, volet roulant	Energies	Gaz + Electricité



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Le ménage est sollicité pour l'isolation des combles à 1€. Il fait réaliser ce poste.

Le gain énergétique étant limité, le ménage envisage l'isolation des murs. S'agissant d'une rénovation en site occupé, ils s'orientent vers une ITE. Le ménage mobilise un éco-PTZ.

Le ménage se plaint d'odeurs persistantes dans la cuisine et les toilettes. Ils font installer une ventilation hygrorégable.

La chaudière, pourtant récente, tombe en panne. Un technicien indique au ménage qu'elle est encrassée et qu'il vaut mieux la remplacer. Le ménage bénéficie d'aides pour ce faire.

Les menuiseries, en double vitrage, ne semblaient pas un poste prioritaire. Cependant elles ont vieilli et présentent des fuites qui nuisent au confort. Le ménage les fait remplacer. L'éco-PTZ ayant été mobilisé plus de 5 ans auparavant, le reste à charge de ce poste après CEE et CITE est financé en fond propre.

Le plancher bas est sur terre-plein, non isolé. Il n'est pas envisageable d'isoler par-dessus (site occupé, hauteur des linteaux de portes etc.). Il aurait fallu isoler en périphérie de la maison, mais l'ITE étant déjà faite le ménage renonce à reprendre ce poste.

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	Combles R=6	Combles R=7,5	Combles R=7,5 + ITE R=3,7+1 (enterrée) + Ventilation double flux	Combles R=7,5 + ITE R=3,7+1 (enterrée) + Ventilation double flux + Menuiseries DV Uw=1,4 A4	STR 9 : Combles R=7,5 + ITE R=3,7+1 (enterrée) + Ventilation double flux + Menuiseries DV Uw=1,4 A4 + Chaudière gaz 1-12 kW
2	ITE R=3,7 (non enterrée)	ITE R=3,7+1 (non enterrée)	Menuiseries DV Uw=1,4 A4	Chaudière gaz 1-12 kW	(Maison sur terre-plein non isolable : on prévoit l'isolation périphérique. Pour compenser, on majore le R du mur. D'où le choix de la STR9 où en base on vise R=3,7 et n50 = 1 vol/h)
3	Ventilation hygrorégable	Ventilation double flux	Chaudière gaz 1-12 kW		
4	Chaudière gaz 10-24 kW	Chaudière gaz 2,5-24 kW			
5	Menuiseries DV Uw=1,7 A2	Menuiseries DV Uw=1,4 A4			
6	Plancher bas non isolable	Plancher bas non isolable			

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- Impossibilité technique - risque de pathologie
- Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

- L'isolation des combles est réalisée conformément au détail du guide RAGE, en arrêtant l'isolant au droit du nu intérieur du mur. Lorsqu'on réalise l'ITE en étape 2, il reste donc un pont thermique important au niveau de la tête de mur, qui peut être pathologique pour le plafond voire la charpente, et qui en tout cas dégrade la performance.
- L'isolation des murs en ITE est réalisée sans bénéficier d'un conseil global. L'impossibilité d'isoler le plancher bas n'est pas identifiée. L'artisan ne propose pas spontanément de prolonger l'ITE en enterré en périphérie de la maison, car il estime que la plus-value ne serait pas acceptable par le client. Il ne sera pas possible d'ajouter cette isolation périphérique par la suite, ainsi le plancher bas restera un poste non traité qui diminuera le confort et la performance.
-  La maison est mal ventilée, et même si les travaux réalisés à ce stade n'ont pas sensiblement amélioré l'étanchéité à l'air par rapport à l'existant, le ménage se plaint d'une qualité d'air dégradée. La ventilation est mise en place de façon curative et non dans une réflexion globale sur la qualité d'air intérieure et la performance.

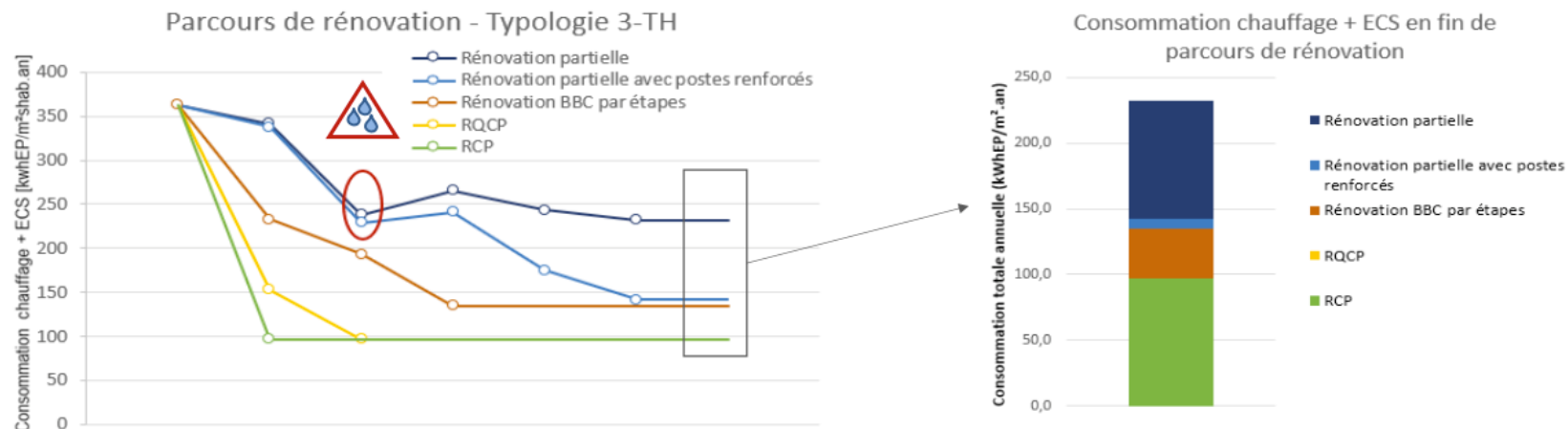
Rénovations partielles et Semi-Globale

- Le remplacement des menuiseries est réalisé après l'ITE. En présence de volets roulants existants avec coffre extérieur, l'ITE a été arrêtée sur les coulisses du volet roulant et a englobé le coffre. Le remplacement des menuiseries et des volets roulants nécessite une dépose précautionneuse pour ne pas fissurer l'enduit. Le pont thermique entre le rail et la menuiserie reste présent et dégrade la performance énergétique.

NB : dans l'absolu on pourrait déporter les coulisses et isoler dessous, mais il faudrait alors reprendre ad minima l'enduit des ébrasements, et le ménage ne retient pas cette plus-value.

RQC et Semi-Globale

- La pose de la chaudière gaz est réalisée après l'ITE, qui sera traversée par la ventouse. Il n'est pas possible d'accéder au plan d'étanchéité à l'air (l'enduit existant) au niveau de cette traversée, dont le traitement d'étanchéité à l'air restera imparfait. La performance énergétique en est légèrement dégradée.



4-TH

Période constructive

1968-1974

Surface habitable : 96 m²
Niveaux chauffés : 2
Compacité : 0,42

Part du parc existant : 1,0 % des logements en France
1,1 % de la surface habitable

Etat initial

Murs	Parpaings creux sous enduits, non isolé	Chauffage	Chaudière gaz standard 1991-2000
Plancher bas	Dalle béton sur local non chauffé	ECS	Couplé à la chaudière
Plancher haut	Toiture terrasse dalle béton, non isolé	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	Bois, double vitrage 4/12/4 air, volet roulant	Energies	Gaz



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Le ménage est sollicité pour l'isolation du plancher bas à 1€. Il fait réaliser ce poste.

Par la suite, le ménage fait réaliser l'isolation de la toiture terrasse, également soutenue par un dispositif d'aides attractif.

Le confort n'étant toujours pas assuré en toute saison, le ménage fait isoler les murs. L'isolation par l'extérieure est choisie pour limiter les nuisances. Le ménage mobilise l'éco-PTZ pour financer ces travaux.

C'est alors que la qualité d'air se dégrade, et que des moisissures apparaissent sur certaines fenêtres et jonction toiture- mur extérieur dans les pièces humides. Le ménage fait installer en urgence une VMC hygroréglable.

La chaudière, ancienne et sur-puissante, finit par tomber en panne. Le ménage la fait remplacer par une chaudière à condensation.

Les menuiseries ont été jugées non prioritaires jusqu'ici car elles étaient en double vitrage. Pourtant des menuiseries récentes seraient bien plus performantes et étanches à l'air. Le ménage demande un devis, mais voyant qu'il faudrait reprendre l'ITE en ébrasements pour bien faire, avec un surcoût important, et échaudé par le problème d'humidité et la chaudière tombée en panne, le ménage ne donne pas suite.

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	Plancher bas R=3	Plancher bas R=3	Plancher bas R=3 + Toiture terrasse R=7,5 + ITE R=4,5 + Ventilation double flux	Plancher bas R=3 + Toiture terrasse R=7,5 + ITE R=4,5 + Ventilation double flux + Chaudière gaz 1-12 kW	STR 6 : Plancher bas R=3 + Toiture terrasse R=7,5 + ITE R=4,5 + Ventilation double flux + Chaudière gaz 1-12 kW + Menuiseries DV Uw=1,4 A4
2	Toiture terrasse R=4,5	Toiture terrasse R=7,5	Chaudière gaz 1-12 kW	Menuiseries DV Uw=1,4 A4	
3	ITE R=3,7	ITE R=4,5	Menuiseries DV Uw=1,4 A4		
4	Ventilation hygroréglable	Ventilation double flux			
5	Chaudière gaz 10-24 kW	Chaudière gaz 2,5-24 kW			
6	Fenêtres avec volets roulants	Fenêtre avec volets roulants			

Légende

● Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
● Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

● Impossibilité technique - risque de pathologie
● Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

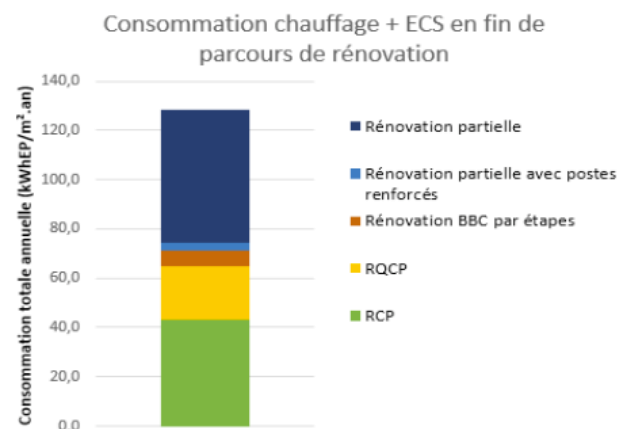
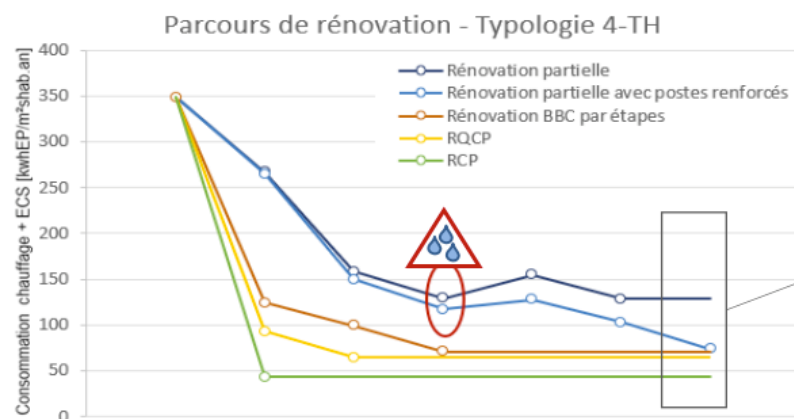
- Lors de la rénovation de la toiture terrasse, une reprise de l'étanchéité (à l'eau) est réalisée sur les acrotères, et une couvertine est posée. L'ITE réalisée dans un second temps devrait nécessiter une reprise de cette étanchéité et la dépose de la couvertine, car les acrotères devraient être isolés pour traiter le pont thermique. Nous avons supposé ici que face au surcoût (il faut faire revenir un étancheur) le ménage ne retient pas cette option, et il reste un pont thermique important au niveau de l'acrotère.
- L'ITE réalisée avant le remplacement des menuiseries ne permet pas de traiter correctement les retours en ébrasements : les menuiseries existantes ne peuvent pas accueillir une épaisseur d'isolant en appui, et les rails et coffres de volets roulants empêchent de traiter correctement le pont thermique en linteau et tableau. Il reste un pont thermique.
- En l'absence d'une ventilation suffisante et permanente, l'humidité condense sur les ponts thermiques créés précédemment à la jonction des murs extérieurs avec l'acrotère et avec les menuiseries. La condensation génère des dégradations de la peinture voire des moisissures dans les pièces humides. Une ventilation mécanique est nécessaire.
- Pour le parcours Rénovation partielle : la chaudière faiblement modulante est adaptée à l'état final sans remplacer les fenêtres. Mais si la rénovation avait été conduite à son terme la chaudière aurait été sur-puissance et son rendement dégradé.

Rénovations partielles et Semi-globale

- La pose de la chaudière gaz est réalisée après l'ITE, qui sera traversée par la ventouse. Il n'est pas possible d'accéder au plan d'étanchéité à l'air (l'enduit existant) au niveau de cette traversée, dont le traitement d'étanchéité à l'air restera imparfait. La performance énergétique en est légèrement dégradée.

Rénovation partielle renforcée, Semi-globale et Quasi-complète

- Le remplacement des menuiseries est réalisé après l'ITE. En présence de volets roulants existants avec coffre extérieur, l'ITE a été arrêtée sur les coulisses du volet roulant et a englobé le coffre. Le remplacement des menuiseries et des volets roulants nécessite une dépose précautionneuse pour ne pas fissurer l'enduit. Le pont thermique entre le rail et la menuiserie reste présent et dégrade la performance énergétique.



5-TH

Période constructive

1975-1981

Surface habitable :	101 m ²	Part du parc existant :	1,2 % des logements en France
Niveaux chauffés :	1		1,4 % de la surface habitable
Compacité :	1,08		

Etat initial

Murs	Parpaing avec 4cm PSE en ITI	Chauffage	Chaudière gaz standard 1991-2000
Plancher bas	Plancher bois sur local non chauffé, isolé 4cm PSE	ECS	Couplé à la chaudière gaz
Plancher haut	Plancher Isolé avec 10cm laine minérale vers combles perdus	Ventilation	Ventilation naturelle
Menuiseries	Bois, double vitrage 4/6/4 air, volet roulant	Energies	Gaz + Electricité



Contraintes du bâtiment et préférence des ménages (parcours Rénovation partielle)

Contacté pour une isolation du plancher bas à 1€, le ménage commence par réaliser ce poste.

Le gain énergétique étant limité, le ménage envisage l'isolation des murs. S'agissant d'une rénovation en site occupé, ils s'orientent vers une ITE. Le ménage mobilise un éco-PTZ.

Le ménage se plaint d'odeurs persistantes dans la cuisine et les toilettes. Ils font installer une ventilation hygrorégable.

Pour réduire encore la facture, le ménage fait remplacer son ancienne chaudière par une chaudière à condensation, et bénéficie d'aides.

Pour des raisons principalement esthétiques, le ménage souhaite ensuite faire remplacer les menuiseries.

Les combles déjà isolés, ne sont pas jugés utiles à surisoler, et restent en l'état.

Parcours de rénovation

	Rénovation partielle	Rénovation partielle renforcée	Rénovation Semi-Globale	Rénovation Quasi-complète	Rénovation Complète
1	Plancher bas R=3	Plancher bas R=4,5	Plancher bas R=4,5 + ITE R=4,5 + Ventilation double flux + Menuiseries DV Uw=1,7 A4	Plancher bas R=4,5 + ITE R=4,5 + Ventilation double flux + Menuiseries DV Uw=1,7 A4 + Chaudière gaz 1-12 kW	STR 5 : Plancher bas R=4,5 + ITE R=4,5 + Ventilation double flux + Menuiseries DV Uw=1,7 A4 + Chaudière gaz 1-12 kW + Combles R=7,5
2	ITE R=3,7	ITE R=4,5	Chaudière gaz 1-12 kW	Combles R=7,5	(Ce bouquet de travaux est guidé par le choix de l'ITE pour les murs, et un n50 visé de 3 vol/h en raison des murs poreux, ainsi que des menuiseries à Uw=1,7)
3	Ventilation hygrorégable	Ventilation double flux	Combles R=7,5		
4	Chaudière gaz 10-24 kW	Chaudière gaz 2,5-24 kW			
5	Menuiseries DV Uw=1,7 A2	Menuiseries DV Uw=1,7 A4			
6	Combles	Combles R=7,5			

Légende

- Difficulté / Nécessite une anticipation à une étape précédente
- Difficulté majeure à cette étape ou par la suite

- Impossibilité technique - risque de pathologie
- Pathologie liée à l'humidité

Poste non-réalisé

Résultats

Problèmes rencontrés lors des rénovations

Rénovations partielles

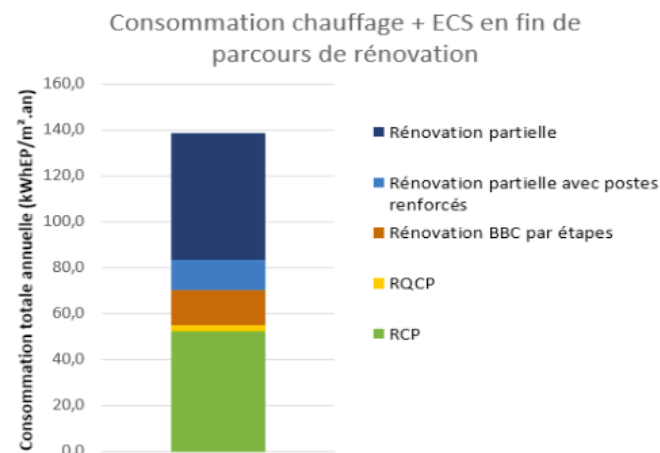
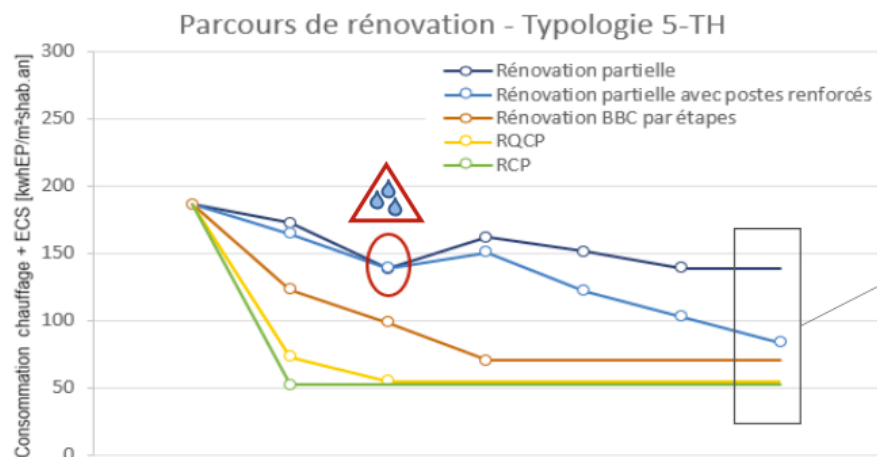
- L'isolation des murs par l'extérieur est réalisée alors que les menuiseries existantes n'ont pas de dormant élargi. Il n'est pas possible de réaliser des retours d'isolation en ébrasement. Il reste un pont thermique important.
- La maison est mal ventilée, et même si les travaux réalisés à ce stade n'ont pas sensiblement amélioré l'étanchéité à l'air par rapport à l'existant, le ménage se plaint d'une qualité d'air dégradée. La ventilation est mise en place de façon curative et non dans une réflexion globale sur la qualité d'air intérieure et la performance.
- La chaudière gaz proposée en rénovation partielle n'est que peu modulante, et s'avère surpuissante dès l'étape 4, et encore plus à l'étape 5. Son rendement est dégradé. Alors qu'en rénovation partielle renforcée, une chaudière très modulante est mise en place, qui conserve son bon rendement jusqu'à la fin du parcours de rénovation.
- Le remplacement des menuiseries est réalisé après l'ITE. Il n'y a pas eu d'isolation en ébrasement. Les menuiseries étant remplacées principalement pour des raisons esthétiques, le pont thermique reste en place. De plus, le coffre de volet roulant est remplacé à l'identique et reste de type coffre intérieur, qui est peu étanche à l'air. Les ponts thermiques et les fuites dégradent la performance énergétique et le confort.

Rénovation partielle renforcée et Semi-globale

- La pose de la chaudière gaz est réalisée après l'ITE, qui sera traversée par la ventouse. Il n'est pas possible d'accéder au plan d'étanchéité à l'air (l'enduit existant) au niveau de cette traversée, dont le traitement d'étanchéité à l'air restera imparfait. La performance énergétique en est légèrement dégradée.

Rénovation partielle renforcée, Semi-globale et Quasi-complète

- L'isolation des combles réalisée en différé avec l'ITE ne permet pas un échange entre les artisans. La frontière d'étanchéité à l'air n'est pas claire, aussi l'artisan qui isole les combles ne se préoccupe pas de l'absence de jonction entre le faux plafond et le chaînage des murs, car il pense que c'est le parement de l'isolation intérieure qui fait l'étanchéité à l'air (alors que c'est l'enduit extérieur en réalité). La performance atteinte en est dégradée.



Annexe 4 - Hypothèses économiques

Pour illustrer les questions de financement et de rentabilité à chaque étape des différents parcours de rénovation, des hypothèses sur les coûts des travaux sont émises pour chaque poste, et les subventions / CEE et autres sources de financement mobilisables ont également été identifiées et intégrées au bilan économique des projets (typologie / parcours de rénovation).

NB : les coûts pris en compte sont ceux des travaux énergétiques et tous les travaux induits, mais pas les travaux d'aménagement (réfection salle de bain, de cuisine, etc.) ou de mise en sécurité (tableau électrique, etc.). La peinture n'est pas prise en compte en cas d'ITI.

Sources des hypothèses de coût

La majorité des coûts unitaires sont issus du rapport ADEME « *Rénovation énergétique des logements : Étude des prix* », publié en novembre 2019⁷¹. De façon générale, la **valeur médiane** est retenue comme coût unitaire HT pour les travaux, avec parfois des exceptions quand ces valeurs différaient de façon importante avec nos propres retours d'expérience sur les coûts de travaux de rénovation performante (Dorémi et/ou Enertech).

Valeurs retenues pour l'étude :

- Isolation des murs par l'intérieur :
 - o Valeur médiane du rapport ADEME : 55 €/HT/m² (hypothèse que cette valeur corresponde à une ITI sans pare-vapeur).
 - o Parcours « Rénovation partielle par postes » : valeur médiane de l'Ademe majorée, 57 €/HT/m²
 - o Autres parcours de rénovation : 65 €/HT/m², issues des retours de Dorémi et Enertech pour les ITI plus qualitatives et avec freine-vapeur des autres parcours.
- Isolation des murs par l'extérieur :
 - o La valeur médiane du rapport ADEME de 160 €/HT/m² ;
 - o Parcours « Rénovation partielle par postes » : 139 €/HT/m² ;
 - o Autres parcours de rénovation : 160 €/HT/m².
- Isolation du plancher bas, isolation en sous-face :
 - o Parcours « Rénovation partielle par postes » : reprise du coût d'une isolation à 1€ (CEE + coup de pouce = 29,8 €TTC/m²), soit 28 €/HT/m² ;
 - o Autres parcours de rénovation : valeur médiane du rapport ADEME : 49 €/HT/m².
- Isolation du plancher bas, isolation sous chape :
 - o hypothèse de 100 €/HT/m² (isolant + chape, finition non comprise)
- Isolation du plancher bas, isolation périphérique
 - o prolongement de l'ITE dans le sol, estimée à 25 €/HT/m² de plancher (valeur extrapolée du linéaire périphérique pour simplifier les calculs).
- Isolation en comble perdu :
 - o Parcours « Rénovation partielle par postes » : coût d'une isolation à 1€ pour le parcours Rénovation partielle par postes (CEE + coup de pouce = 20,5 €TTC/m²), soit 19 €/HT/m²,
 - o Autres parcours de rénovation = valeur médiane du rapport ADEME soit 40 €/HT/m².
- Isolation en rampant :
 - o Valeur médiane du rapport ADEME : 65 €/HT/m², semble correspondre à un complexe avec ossature et freine vapeur protégé par lame d'air.
 - o Parcours « Rénovation partielle par postes » : 46 €/HT/m² (niveau d'isolation plus faible, pas de lame d'air),
 - o Autres parcours de rénovation : valeur médiane Ademe.
- Isolation en toiture terrasse :
 - o Parcours « Rénovation partielle par postes » : hypothèse de 75 €/HT/m² (R=4,5 selon CITE),
 - o Autres parcours de rénovation : hypothèse de 80 €/HT/m² (R=7,5).
- Isolation en sarking :

⁷¹ « Rénovation énergétique des logements : Étude des prix » de l'ADEME, publié en novembre 2019, disponible sur <https://www.ademe.fr/renovation-energetique-logements-etude-prix>

- Parcours « Rénovation partielle par postes » : hypothèse de 150 €/m² (R=6 selon CITE),
- Autres parcours de rénovation : hypothèse de 160 €/m² (R=7,5 à 10).
- Menuiseries double vitrage :
 - Valeurs du rapport Ademe : valeurs non retenues car supérieures aux autres bases de coût.
 - Parcours « Rénovation partielle par postes » : 400 €/m² pour le double vitrage,
 - Autres parcours de rénovation : 440 €/m² pour le double vitrage.
- Menuiseries triple vitrage :
 - Parcours « Rénovation partielle par postes » : 480 €/m²
 - Autres parcours de rénovation : 576 €/m² du rapport ADEME (moyenne des valeurs de fenêtres et portes fenêtres pondérées de leur nombre)
- Portes : valeur du rapport ADEME de 897 €/m² pour tous les parcours.
- VMC hygroréglable : valeur médiane du rapport ADEME, soit 1155 €HT par logement.
- VMC double flux :
 - Valeur médiane du rapport ADEME : 5504 €HT par logement,
 - Tous parcours : 6000 €HT par logement (prix constatés Dorémi).
- Chaudière bois :
 - Valeur médiane du rapport ADEME : non retenue, très éloignée des prix constatés sur le terrain,
 - Tous parcours : 12 000 €HT par logement.
- Poêle à granulés : valeur médiane du rapport ADEME, soit 4 771 €HT par logement.
- Chaudière Gaz : valeur médiane du rapport ADEME, soit 5 286 €HT par logement.
- Chaudière Fioul : valeur médiane du rapport ADEME, soit 8 345 €HT par logement.
- PAC air-eau : valeur médiane du rapport ADEME, soit 12 668 €HT par logement.
- Chauffe-eau thermodynamique (CETH, ou CETI) : la valeur médiane du rapport ADEME (2 874 €HT) est inférieure aux retours de terrain, la valeur de 3 500 €HT par logement est retenue.
- Chauffe-eau solaire individuel (CESI) : valeur médiane du rapport ADEME, soit 7 142 €HT par logement.
- Surisolation d'un ballon existant : forfaitairement à 500 €HT
- Mise en place d'équipements hydro-économiques (douchettes, limiteurs de débit, si besoin limiteur de pression) forfaitairement à 100 €HT.

Sources et hypothèses pour les subventions, CEE et financement

Sources mobilisées pour cette partie :

- Guide pratique des aides financières à la rénovation de l'habitat de l'ADEME version 2020⁷² ;
- Fiches CEE consultées en format PDF sur le calculateur CEE ADEME⁷³, notamment les fiches standardisées BAR-EN 101 à 105 et BAR-TH 105, 106, 112, 113, 125 et 127. Le cas échéant la valeur retenue correspond à la zone géographique médiane, soit la zone H2.

Hypothèses de revenus des ménages :

Calcul des aides en supposant que le ménage dispose d'un revenu médian national, soit 30 340 € annuel⁷⁴. En supposant qu'il y a 2 occupants par logement (la moyenne est à 2,2) et un logement situé hors Ile de France. Il s'agit donc d'un ménage médian à tout point de vue.

Avec ces hypothèses, les subventions, CEE et financements disponibles sont les suivants :

- « Ma prime Rénov' » de l'ANAH : **non éligible à la date de réalisation de l'étude** ;
- CITE : revenu **intermédiaire** : le CITE est plafonné à 4800 € sur 5 ans. Hypothèse que 2 étapes successives étaient réalisées à moins de 5 ans d'intervalle, mais que l'étape suivante intervient plus de 5 ans après la première, et que ce plafond est ainsi renouvelé pour l'étape 3 et 4, le cas échéant ;
- CEE : selon fiche standardisée (sans condition de revenu) ;
- CEE « coup de pouce » : ménage considéré comme « **autre ménage** » (non modeste) ;
- Eco-PTZ : sans condition de ressource. L'éligibilité des travaux a été vérifiée ainsi que les plafonds pour les actions seuls ou en bouquet, ainsi que la possibilité de demander un Eco-PTZ complémentaire dans les 5 ans suivant le premier, dans le respect des règles et d'un total de 30 000 € maximum. Pour la durée

⁷² <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-aides-financieres-renovation-habitat-2020.pdf>

⁷³ <http://calculateur-cee.ademe.fr/user/fiches/BAR>

⁷⁴ Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3549502> ; page 112

de 5 ans, hypothèse que deux étapes consécutives séparées de moins de 5 ans. Après ces deux étapes (pas forcément les deux premières notamment en cas de travaux « à 1€ »), il n'est plus possible de mobiliser d'Eco-PTZ.

- La TVA a été prise en compte à 5,5% (taux réduit pour les travaux énergétiques, sans condition de revenu).

Dans ce cas, les aides et financements mobilisés sont cumulables :

	MaPrime Rénov'	Crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE)	Éco-prêt à taux zéro	Aides de l'Anah	Aides des collectivités locales	Aides des fournisseurs d'énergie	Aides d'Action Logement
MaPrime Rénov'		×	✓	×	✓	avec un écrêtement*	avec un écrêtement*
CITE	×		✓	×	✓	✓	×
Éco-prêt à taux zéro	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Aides de l'Anah	×	×	✓		✓	×	✓
Aides des collectivités locales	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Aides des fournisseurs d'énergie	avec un écrêtement*	✓	✓	×	✓		✓
Aides d'Action Logement	avec un écrêtement*	×	✓	✓	✓	✓	

Figure 114 : Tableau de vérification de la possibilité de cumuler les aides et financements.

Source : Guide pratique des aides financières à la rénovation de l'habitat de l'ADEME version 2020.

Ordre de grandeur des budgets de rénovation

Avec l'ensemble de ces hypothèses, les rénovations complètes et performantes représentent un budget de travaux énergétiques hors aides de 41 000 € TTC pour la moins chère (4-TH maison de ville très compacte et mitoyenne) à 76 000 € TTC pour la plus chère (5-SFH, maison peu compacte, toiture traitée en sarking, installation d'une PAC air-eau). La moyenne des 10 typologies est à 53 000 € TTC.

Déduction faite des aides, ces deux typologies ont un coût de travaux énergétiques respectifs d'un peu moins de 30 000 € TTC (donc finançable intégralement par un Eco-PTZ) à 59 000 € TTC (donc finançable avec 30 000 € d'Eco-PTZ et un apport personnel ou prêt classique de 29 000 €). La moyenne des 10 typologies est à un peu moins de 40 000 € TTC.

On retrouve bien une fourchette de coûts de travaux énergétiques qui est cohérente avec les meilleures pratiques observées par Dorémi et/ou Enertech en rénovation complète et performante.

Concernant les parcours de rénovation par étapes, l'appréciation coûts/bénéfices reste sujette à caution :

- Avec cette approche de coût unitaire, certains parcours par étapes coûtent théoriquement un peu moins : la performance de chaque élément est parfois moindre, ainsi que la qualité de réalisation (frein-vapeur...) En revanche, ces parcours n'atteignent pas la performance requise et sont potentiellement pathogènes
- Cette étude n'intègre pas, en l'absence de données, l'estimation des surcoûts liés à l'obtention de la performance par étapes, qui sont liés aux efforts d'anticipation de l'intervention par étapes, de traçabilité, et de reprises plus ou moins lourdes à effectuer sur les étapes ultérieures (cf. partie 3 pour le détail qualitatif de ces travaux pour quelques cas de figure étudiés).

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



LA RÉNOVATION PERFORMANTE PAR ÉTAPES

L'étude analyse les conditions nécessaires à la réalisation de rénovations performantes permettant au parc de maisons individuelles françaises d'atteindre par étapes le niveau de performance BBC rénovation ou équivalent, fixé comme objectif national, à l'horizon 2050, tout en intégrant à la démarche la santé et le confort des occupants ainsi que la qualité du bâti.

Elle montre que les pratiques usuelles, nommées « rénovations partielles » et qui consistent à juxtaposer des « gestes de travaux », ne permettent pas d'atteindre cet objectif et peuvent conduire à créer ou renforcer des désordres sur le bâti, avec impact possible sur le confort, voire la santé des habitants. Renforcer la performance de chaque élément ne conduit pas non plus au bon niveau de performance dans cette approche « élément par élément ». Ainsi, l'addition simple de travaux qualifiés de « travaux BBC-compatibles » n'est pas suffisante pour l'atteinte du niveau de performance BBC rénovation ou équivalent à terme.

L'étude montre la nécessité de disposer d'une vision globale de ce que sera le parcours de rénovation performante par étapes, et pointe l'importance majeure du traitement des interfaces entre postes de travaux afin de disposer d'une continuité de l'isolation, de la barrière freine-vapeur et de l'étanchéité à l'air, pour éviter les pathologies et atteindre un niveau BBC rénovation ou équivalent à terme.

L'étude démontre par des études de cas et des calculs que l'atteinte du niveau BBC rénovation ou équivalent à terme par des parcours de rénovations de 4 étapes de travaux ou plus à un coût acceptable et d'ici 2050 semble peu réaliste, que cette performance peut être atteinte en 1 à 3 étapes sous des conditions strictes décrites dans le rapport, et que la probabilité d'atteindre la performance décroît avec l'augmentation du nombre d'étapes.

Enfin, l'étude met en évidence que l'intégration des énergies renouvelables est souhaitable et même parfois nécessaire afin d'atteindre le niveau de performance visé, notamment pour le chauffage (bois, PAC), dans les parcours en 3 étapes et moins. L'amélioration du bilan énergétique d'un parcours en 4 étapes ou plus avec l'intégration d'énergies renouvelables est envisageable d'un point de vue strictement énergétique mais le nombre important d'étapes génère des risques pour la santé des occupants (cas du report de la ventilation), des sources de pathologies (humidité dans les parois) et/ou des sensations d'inconfort pour les utilisateurs (ponts thermiques). De plus, l'augmentation des températures de consigne résultant du non-traitement des interfaces risque d'annuler les économies d'énergie générées grâce aux sources renouvelables. Enfin, le coût des parcours en 4 étapes ou plus avec solutions renouvelables en compensation dépasse celui d'un parcours en une seule étape.

La rénovation performante de l'ensemble des logements individuels d'ici 2050 est un impératif majeur pour réduire les consommations d'énergie à l'échelle nationale mais également pour préserver la santé des occupants, leur confort et leur logement.

Rénover chaque logement en une seule fois est la solution techniquement la plus judicieuse pour atteindre la performance. Lorsque ce n'est pas possible, des conditions de réussite s'imposent pour atteindre la

