

LOT 4

BILAN CARBONE PAR

L'ACV ET COUT

GLOBAL



Rapport d'étude

Coordination : RECTo et Verso

Décembre 2025



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Ce rapport constitue le **Rapport final du lot 4 du projet** prévu à la convention ADEME n°2204D0021

Livrables rédigé par RECTo et Verso

Soutiens du projet et Comité de Pilotage :

ADEME : Jonathan LOUIS - DGEC, ANAH – CLER - AREC Occitanie, Envirobat Occitanie - Région Normandie, Région Bourgogne-Franche-Comté, Région Centre-Val de Loire – Dorémi

Participation au Comité technique :

ADEME - CSTB, CEREMA – AQC – Karibati - EDF R&D, Uwe BRANKAMP

CITATION DE CE RAPPORT

SCOP Enertech : Nicolas ANDREAU, Thierry RIESER, Julien SPILEMONT, Mickaël GUERNEVEL, Yoann BAUDOUIN, Roman Nicolas, Damien JANNOT, Jean-Paul ZIMMERMANN, Victor CAMBON, Stéphane MOTEAU, Thérèse DEVIGON, Edwina PEDLEY, Muriel DUPRET, Effinergie : Sébastien LEFEUVRE, Laura BRUNO - Khedidja MAMOU, RECTo : Grégory HERFRAY, VERSO : Marion SIE, Arcanne : Samuel COURGEY, Etienne SAMIN. 2025. SYNTHESE TRANSVERSALE. 96 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Tous les livrables du projet seront disponibles sur <https://www.effinergie.org/>

Des fiches opérations de certaines maisons suivies dans le cadre de Perf in Mind et Perf in Mind 2 sont également disponibles sur l'Observatoire BBC d'Effinergie :

<https://www.observatoirebbc.org/perfinmind>.

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'œuvre 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 reproductrice.

Cette publication, réalisée à l'initiative de son/ses auteur(s), a reçu un soutien financier de l'ADEME, mais n'engage pas l'ADEME. Son contenu (ou les données qu'elle contient) n'engage que la seule responsabilité de son/ses auteur(s) et ne représente pas la position de l'ADEME.

ADEME

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

Numéro de contrat : 2204D0021

Étude réalisée par SCOP Enertech, Muriel DUPRET, Effinergie, RECTo, Verso, Arcanne, Khedidja MAMOU pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Jonathan LOUIS

Appel à projet de recherche : Vers des bâtiments responsables

Coordination technique - ADEME : Jonathan LOUIS

Direction/Service : DVTD/SB

1. Table des matières

2.	Synthèse	6
2.1	Objectifs.....	6
2.2	Cadre méthodologique.....	6
2.3	Analyse de l'échantillon	7
2.4	Résultats et enseignements.....	7
2.4.1	Analyse du Cycle de Vie	7
2.4.2	Analyse en Coût Global	9
3.	Glossaire	12
4.	Introduction.....	13
5.	Objectifs de l'étude	14
5.1	Contexte et applications visées	14
5.2	Planning.....	14
5.3	Organisations impliquées.....	16
5.3.1	Auteurs.....	16
5.3.2	Commanditaires.....	16
5.3.3	Réviseurs	16
5.3.4	Publics	16
5.4	Cadre de travail	16
5.4.1	Analyse du Cycle de Vie	16
5.4.2	Analyse en Coût Global	17
5.5	Analyse bibliographique	18
6.	Champ de l'étude	26
6.1	Etat initial et final	26
6.1.1	ACV.....	26
6.1.2	ACG	26
6.2	Scénarios.....	26
6.2.1	Définition des scénarios.....	26
6.2.2	Le scénario de rénovation	27
6.2.3	Le statu quo.....	27
6.3	Définition de l'unité fonctionnelle.....	28
6.3.1	Équivalence fonctionnelle	28
6.3.2	Fonction principale et flux de référence	29
6.3.3	Période de référence	29
6.3.4	Unité fonctionnelle	30
6.4	Frontières du système	30

6.4.1	Frontières spatiales	30
6.4.2	Frontières temporelles	33
6.5	Points de vue pour le calcul du Coût global.....	33
6.6	Règles de modélisation	34
6.6.1	Principe de modélisation	34
6.6.2	Gestion des multifonctionnalités.....	34
6.6.3	Critères d'exclusion d'intrants et d'extrants.....	35
6.7	Type et sources de données	35
6.7.1	Données spécifiques de premier plan.....	35
6.7.2	Données environnementales	36
6.7.3	Scénarios d'évolution	36
6.8	Méthode de caractérisation des indicateurs	37
6.8.1	Comptabilité environnementale, y compris du carbone	37
6.8.2	Comptabilité des euros.....	37
7.	Inventaire du cycle de vie.....	39
7.1	Modélisation ACV	39
7.1.1	Systèmes constructifs et lots d'équipement	39
7.1.2	Remplacements.....	40
7.1.3	Mix énergétiques	40
7.2	Modélisation ACG	40
7.2.1	Travaux de rénovation et remplacements	40
7.2.2	Maintenance des PCE	41
7.2.3	Coût de l'énergie en phase d'usage.....	41
7.2.4	Valeur résiduelle en fin de période.....	42
7.3	Analyse de l'inventaire	43
7.3.1	Taille de l'échantillon.....	43
7.3.2	Caractéristiques de la MI avant rénovation	44
7.3.3	Caractéristiques de la rénovation des équipements CVC	45
7.3.4	Caractéristiques du gain en consommation d'énergie finale avant / après rénovation	46
8.	Analyse des résultats	49
8.1	ACV.....	49
8.1.1	Analyse des paramètres clés de l'impact carbone	49
8.1.2	Analyse de sensibilité : mix électriques considérés pour les consommations en VEO	58
8.1.3	Analyses de sensibilité : utilisation de données individuelles	63
8.1.4	Analyse complémentaire sur l'impact en EPNR totale.....	65
8.2	ACG	67
8.2.1	Analyse des paramètres clés du coût global.....	67
8.2.2	Analyses de sensibilité évolution du prix de l'énergie	78

8.2.3	Analyses de sensibilité taux d'actualisation	79
9.	Comparaison des enseignements avec la bibliographie	81
10.	Conclusions	85
11.	Bibliographie	89
12.	Annexe 1 : données utilisées pour l'ACV.....	90
12.1	DED et FDES collectives.....	90
12.2	FDES individuelles	93
13.	Annexe 2 : Graphe des coûts cumulés de chaque MI	96

2. Synthèse

2.1 Objectifs

Il est aujourd’hui consensuel que la rénovation du parc bâti à un niveau performant est l’un des points clés de la transition énergétique du secteur du bâtiment. Le projet PIM I avait pour objectif de mieux cerner les performances réelles des rénovations thermiques BBC ou équivalent de maisons individuelles réalisées en France métropolitaine entre 2008 et 2018. Le projet PIM II a été mené dans la continuité de PIM I dans l’objectif d’une part d’élargir ce retour d’expérience à des parcours moins performants (BBC dit « par étape » et rénovations globales au sens du dispositif « Coup de pouce ») et d’autre part d’affiner l’analyse en incluant notamment la quantification du bénéfice en carbone et en coût global de ces actions de rénovation par rapport à leur statu quo. Ces deux indicateurs sont dits globaux car ils prennent en compte l’ensemble du cycle de vie de chaque scénario. L’objectif de la présente étude a donc été de quantifier le bénéfice global, en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de coût, de rénover plutôt que de ne rien faire, ce sur un nombre conséquent de cas d’étude. Au lancement du projet, l’analyse de 60 à 80 maisons était envisagée. Ce nombre a fortement été revu à la baisse au regard des difficultés à collecter les données auprès des ménages. Face à cette réalité de terrain, l’ambition de mener dans PIM II une analyse statistique par ambition de rénovation n’a pas été possible. Nous avons surtout mené une analyse fine des résultats comparatifs obtenus afin de bien comprendre les paramètres déterminant le bénéfice en carbone et en coût global.

2.2 Cadre méthodologique

L’empreinte carbone a été mesurée par l’Analyse du Cycle de Vie (ACV) au sens des normes ISO 14040-44 et le coût global a été mesuré par l’Analyse en Coût Global (ACG) tel que défini dans la norme ISO 15686-5.

Que ce soit pour l’ACV ou l’ACG, l’état initial du système est le suivant : on dispose d’1m² de surface habitable de maison individuelle (MI) en fonctionnement. L’unité fonctionnelle est la suivante : « A partir de l’état initial précédemment défini, fournir 1 m² de surface de plancher de MI pour un usage d’habitat, avec une consigne de température en hiver comprise entre T1 et T2, avec un approvisionnement en Eau Chaude Sanitaire (ECS) conforme à la réglementation des bâtiments résidentiels, et avec un approvisionnement en électricité permettant d’assurer l’éclairage et les autres usages de l’énergie, ce pendant 30 ans ». Pour chaque maison, on compare ainsi sur cette base deux scénarios : la rénovation et le statu quo. Ce dernier scenario est caractérisé par le principe suivant : le propriétaire ne rénove pas sa maison mais souhaite tout de même continuer à l’utiliser. Ces deux postulats sont compatibles à la condition que certains produits de construction et équipements soient en état au cours de la période de référence. On élabore donc une liste des « éléments absolument fonctionnels » qui sont considérés remplacés dans le scénario de statu quo. Cela permet de mesurer le bénéfice avant / après rénovation en restant sur une équivalence de service rendu.

Le périmètre du système inclut les actions de rénovation énergétique touchant le bâti (isolation de l’enveloppe et menuiseries) et les systèmes (équipements chauffage, ventilation, ECS).

Les données d’activités et de coûts sont collectées auprès des ménages (principalement sur la base des devis et factures avant et après travaux) tandis que les données environnementales sont tirées de la base INIES pour les Produits de Construction et Equipment (PCE) – FDES collectives et Données Environnementales par Défaut (DED) auxquelles une réduction forfaitaire de 30% a été appliquée pour annuler la majoration automatique réalisée par INIES – et d’ecoinvent pour les mix énergétiques.

La comptabilité des GES est statique (à l’opposé de « dynamique ») et la comptabilité des euros prend en compte un taux d’actualisation arbitraire de 3%.

Enfin, si en ACV le point de vue implicite est l'environnement, le but étant d'identifier les variantes les plus bénéfiques selon ce point de vue, en ACG le point de vue n'est pas défini de manière implicite mais doit être choisi par les auteurs de l'analyse car ce que l'on considère comme un coût ou comme un bénéfice change selon le point de vue. Dans la présente étude, le coût global est calculé selon deux points de vue distincts : une vision sociétale dans laquelle on considère les coûts pour la société, et une vision propriétaire dans laquelle on considère les coûts du point de vue du propriétaire.

2.3 Analyse de l'échantillon

En définitive 31 maisons ont été étudiées en Analyse du Cycle de Vie et 26 en Analyse en Coût Global. L'ambition de rénovation des maisons n'est pas toujours le même. On distingue cinq cas :

- La rénovation « BBC non conforme »
- La rénovation « Coup de pouce »
- La « Première étape d'une rénovation BBC »¹
- La « Dernière étape d'une rénovation BBC »²
- La « Rénovation BBC »³, qu'elle soit calculatoire ou DOREMI STR⁴

Tout d'abord, les enseignements de cette étude sont à considérer en gardant en tête la faible taille de l'échantillon. Comme précisé plus haut, **il ne s'agit pas d'une étude statistique**.

Par ailleurs, **l'état initial des maisons par ambition de rénovation n'est pas similaire**. En particulier, les rénovations « Coup de pouce » incluent majoritairement des maisons de classes E voire F avec un chauffage au fioul alors que les rénovations « BBC » incluent majoritairement des maisons de classe D avec un chauffage au fioul ou au gaz.

Enfin, **l'échantillon analysé présente une sur-représentation** de la mise en place de PAC air-eau dans les rénovations « Coup de pouce » et « première étape de rénovation », peu de systèmes à base de bois en général et une majorité de chaudière gaz dans les « rénovations BBC ». **Ainsi, nous avons évité l'énoncé de conclusions par ambition de rénovation (du type « Les rénovations BBC sont ... comparativement aux rénovations Coup de pouce ») dans l'analyse des résultats.**

2.4 Résultats et enseignements

2.4.1 Analyse du Cycle de Vie

Impact carbone des produits et équipements

La part PCE des rénovations est très variable, ce quelle que soit l'ambition de rénovation (8 % à 71 % de l'impact carbone total, toutes ambitions confondues).

Lorsqu'il y a mise en place d'une PAC air-eau, les équipements CVC sont plus visibles et représentent environ 50% de l'impact carbone des PCE. En outre, les rénovations qui comprennent la mise en place d'une PAC ont un impact carbone des PCE plus élevés que les autres. Il est donc important que les industriels mettent tout en œuvre pour éco-concevoir ce type de produit. Attention, cela ne dit rien sur le bénéfice global des rénovations avec PAC car il faut le mettre en regard des gains à l'usage (voir plus loin). Mis à part les équipements, c'est l'isolation de l'enveloppe (sol, mur, toiture) qui représente la part carbone la plus importante, devant le remplacement des menuiseries.

¹ <https://www.effinergie.org/web/notre-expertise/renos-bbc-par-etape>

² Ces projets sont des rénovations BBC de maisons qui ont bénéficiées de travaux antérieurs ou ont été construites plus récemment (1998).

³ Référentiel en vigueur au moment de la conception des rénovations étudiées : <https://www.effinergie.org/web/les-labels-effinergie/effinergie-renovation/1654>

⁴ <https://www.renovation-doremi.com/fr/blog/audit-%C3%A9nergie%C3%A9tique-et-str/>

L'impact carbone moyen de la rénovation la plus ambitieuse, c'est à dire "BBC Rénovation", n'est pas plus élevé que celui des autres ambitions. En outre, il est bien inférieur à l'impact carbone moyen des PCE des rénovations "première étape" plus celui des "dernière étape BBC rénovation". Bien que ce calcul ne soit pas rigoureusement pertinent car les "première" et "dernière étape" ne s'additionnent pas nécessairement (il ne s'agit pas des mêmes MI), cela donne tout de même une idée de l'économie d'échelle à réaliser la rénovation en une seule fois.

Enfin, l'analyse croisée des enseignements de la présente étude avec trois autres études françaises portant sur le bilan carbone de la rénovation de bâtiments anciens (études HQE/GBC, ANAH et HUB des prescripteurs) vient confirmer ce constat : la part des PCE est variable mais, dans tous les cas, ne semble pas être le paramètre le plus important pour garantir une rénovation bas carbone.

Temps de retour carbone

Pour l'ensemble de l'échantillon, le carbone émis lors des travaux est compensé sur 30 ans par le gain carbone réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour carbone est toujours inférieur à 30 ans pour l'ensemble des MI analysées. Pour 74% de l'échantillon le TRC est inférieur ou égal à 5 ans.

Les économies de carbone les plus importantes sont réalisées lors du passage d'une énergie carbonée et une énergie décarbonée tel que le bois ou l'électricité. Le second paramètre clé pour maximiser les économies de carbone et donc minimiser le TRC est de viser le plus gros gain possible en énergie finale, notamment en s'attaquant aux passoires thermiques en priorité (MI de Diagnostic de Performance Energétique de niveau E voire F) et en favorisant la mise en place d'une PAC air-eau à Coefficient de Performance (COP) maximal.

Les projets au TRC > 10 ans sont ceux qui étaient sur un système de production de chaleur décarboné et qui y restent, ou qui étaient qualifiés de « non conforme ».

A l'inverse, le gap carbone avant / après rénovation ne semble pas corrélé à la surface habitable, l'année de construction, la zone climatique, l'altitude ou encore le système constructif.

Enfin, l'analyse croisée des enseignements de la présente étude avec trois autres études françaises portant sur le bilan carbone de la rénovation de bâtiments anciens (études HQE/GBC, ANAH et HUB des prescripteurs) vient confirmer ces conclusions : les paramètres clés de la rénovation bas carbone que l'on retrouve dans chaque cas sont : le passage d'une énergie carbonée et une énergie décarbonée tel que le bois ou la PAC air /eau, et la réduction de la consommation énergétique à l'usage. Ce dernier point est atteint en rénovant d'abord les passoires énergétiques et par la sobriété des usages, l'isolation complète de l'enveloppe (notamment via une rénovation ambitieuse comme la rénovation BBC) et l'optimisation des systèmes. On rappelle que sur le plan technique, il est préférable de réduire les consommations avant de changer d'équipements techniques afin que ces derniers soient bien dimensionnés.

Emissions de GES du cycle de vie des MI rénovées

En termes de performance carbone sur 30 ans (PCE + VEO), toutes les MI rénovées en « Coup de pouce » et « BBC rénovation » se situent sous le seuil de 910 kg CO₂e/m² SHAB (nb : seuil établi sur la base de la méthode en base du label BBCA Rénovation).

Il existe une corrélation directe entre le vecteur énergétique choisi à l'occasion de la rénovation et la performance carbone de la maison rénovée : avec le choix d'une énergie décarbonée (bois, électricité), l'impact carbone de la MI rénovée sur 30 ans est inférieur ou égal à 600 kg CO₂e/m² SHAB. Plus exactement, les MI rénovées avec du chauffage bois sont celles qui émettent le moins de GES leur cycle de vie. A l'inverse, toutes les rénovations ayant conservées le gaz comme vecteur énergétique ont une performance carbone supérieure ou égale à 600 kg CO₂e/m² SHAB.

Sensibilité des résultats au facteur d'émissions en GES de l'électricité

Le facteur d'émissions de GES de l'électricité est très variable selon les usages et saisons (écart observable x10) et c'est un paramètre sensible dans les études ACV de bâtiment impliquant un changement de vecteur énergétique pour le chauffage, dont l'électricité, distinct selon les scénarios étudiés. A titre d'exemple, lorsque des mix électriques marginaux sont considérés, le passage d'un chauffage au bois

avant rénovation à l'électricité via une PAC air-eau après rénovation peut mener à un bilan carbone de la rénovation supérieur à celui du statu quo ; alors qu'il apparaît positif lorsque l'on considère le mix électrique moyen (qui a un facteur d'émission plus faible).

De manière similaire mais inverse, l'évolution du facteur d'émissions de GES de l'électricité selon différents scénarios prospectifs de décarbonation de l'électricité est un paramètre sensible. A titre d'exemple, lorsque les mix prospectifs encore plus décarbonés qu'aujourd'hui sont considérés, le passage d'une chaudière électrique avant rénovation à une PAC air-eau après rénovation peut mener à un bilan carbone de la rénovation supérieur à celui du statu quo car le gain de performance lié à la rénovation ne compense pas l'impact associé à l'action de rénover ; alors qu'il apparaît positif lorsque l'on considère le mix électrique moyen d'aujourd'hui (qui a un facteur d'émission plus élevé).

Sensibilité des résultats aux types de données INIES utilisés pour les PCE

L'utilisation de DED corrigées et de données collectives, plutôt que de FDES individuelles, a tendance à réduire le gap entre rénovation et statu quo de 13% en moyenne (i.e. la rénovation apparaît comme encore plus performante).

Ce choix de données est estimé pertinent pour l'étude PIM car cela a permis d'être plus efficace dans la modélisation sans que les enseignements de l'étude ne soient modifiés.

Temps de retour en énergie primaire non renouvelable

Pour 94% de l'échantillon, l'énergie primaire non renouvelable consommée pour les travaux est compensée sur 30 ans par le gain en énergie primaire non renouvelable réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour en énergie primaire non renouvelable est presque toujours inférieur à 30 ans pour l'ensemble des MI analysées.

La performance en énergie primaire non renouvelable est moins importante pour les MI rénovées consommant beaucoup d'électricité. Cela n'est pas préjudiciable néanmoins sur les MI ayant installées une PAC air-eau car la consommation en électricité reste faible après rénovation grâce au COP élevé de ce type de PAC.

2.4.2 Analyse en Coût Global

Avertissement

Nous attirons l'attention du lecteur sur les difficultés rencontrées lors de l'analyse en coût global : les difficultés à collecter des données fiables auprès des ménages a réduit considérablement l'échantillon analysé (26 MI contre 60 à 80 prévues initialement), ce qui pose un problème statistique. Cet échantillon réduit présente une certaine hétérogénéité des ambitions énergétiques et un déséquilibre entre les équipements présents dans les cas initiaux. De plus, il intègre une sur-représentation de solutions techniques onéreuses, un projet expérimental et donc non reproductible, ainsi que des chiffrages et métrés incohérents sur certains lots (ITE pouvant aller de 90 €/m² à 750 €/m² par exemple).

Coût des travaux de rénovation

La part des travaux de rénovation⁵ (i.e. à l'année 0) dans le coût global (i.e. incluant en plus 30 ans d'exploitation) perçu par le propriétaire est très variable, ce quelle que soit l'ambition de rénovation : 33% en moyenne avec des valeurs allant de 5 % à 81 %, toutes ambitions confondues. Dans une vision dite « sociétale » (dans laquelle on ignore les aides reçues par le propriétaire) la part travaux de rénovation correspond à peu près à 50% du coût global.

Lorsqu'il y a mise en place d'une PAC air-eau, les équipements CVC sont plus visibles et représentent 30 à 40% du coût des travaux à l'année 0 (exclusion des aides). Attention, cela ne dit rien sur le bénéfice

5 Les rénovations sont avant tout énergétiques mais sont inclus dans le périmètre les coûts induits, ceux des études et ceux des travaux hors énergie engagés à l'occasion de la rénovation énergétique.

global des rénovations avec PAC car il faut le mettre en regard des gains à l'usage (voir plus loin). Mis à part les équipements, c'est l'isolation des murs et le remplacement des menuiseries qui représentent le coût le plus important, devant les équipements de ventilation et l'isolation du sol et du toit. Il existe une exception cependant à ce dernier point où, en cas d'isolation sarking, l'isolation de la toiture peut être aussi importante que l'isolation des murs ou que le remplacement des menuiseries.

Le coût moyen des travaux de la rénovation la plus ambitieuse, c'est à dire "BBC Rénovation", est plus élevé que celui des autres ambitions. Il reste cependant bien inférieur au coût moyen des travaux des rénovations "première étape" plus celui des "dernière étape BBC rénovation". Bien que ce calcul ne soit pas rigoureusement pertinent car les "première" et "dernière étape" ne s'additionnent pas nécessairement (il ne s'agit pas des mêmes MI), cela donne tout de même une idée de l'économie d'échelle à réaliser la rénovation en une seule fois.

Temps de retour en coût global

Avec un taux d'actualisation de 3%, pour 73% de l'échantillon, le coût des travaux est compensé sur 30 ans par le bénéfice réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour coût global est inférieur à 30 ans pour 73% des MI analysées. Les économies les plus importantes sont réalisées lorsque le montant des travaux n'excède pas le montant des consommations énergétiques annuelles actualisées, pendant 30 ans. L'équation à vérifier pour remplir cette condition est indiquée ci-dessous :

$$\text{Coût des travaux [€TTC]} < \sum_{i=0}^{30} \text{Coût consommation annuelle [\frac{€TTC}{an}]} \times \frac{1}{(1,03)^i}$$

Le second paramètre clé pour maximiser les économies est de viser le plus gros gain possible en énergie finale, notamment en s'attaquant aux passoires thermiques en priorité (MI de Diagnostic de Performance Energétique de niveau E voire F) et en favorisant la mise en place d'une PAC air-eau à COP maximal.

Les paramètres clés de la rénovation à faible coût global sont donc le coût des travaux et l'ampleur du gain à l'usage. Le prix relatif de chaque énergie (i.e. le fait de passer à une énergie plus chère après rénovation, par exemple du gaz vers l'électricité) et la valeur verte (i.e. le bénéfice à la revente d'avoir augmenté la classe de DPE) appliquée en fin de période d'analyse ne sont pas ressortis comme paramètres déterminants. Sur ce dernier point on précise bien « appliquée en fin de période d'analyse » car dans une vision « rénover pour revendre » la valeur verte doit être introduite à l'année 1 après les travaux, ou encore en prenant en compte la durée moyenne de détention d'un bien d'environ 8 ans [source : Effinergie], elle est introduite à l'année 8. Cela engendre un temps de retour sur investissement plus rapide combiné à une valeur verte plus importante en valeur absolue (car l'actualisation est donc moins élevée que lorsqu'on la considère à l'année 30). Dans ce cas la valeur verte peut être un paramètre déterminant.

Effet des aides aux propriétaires sur le temps de retour en cout global

Les aides à la rénovation (prêts et financements) sont capitales pour espérer obtenir un temps de retour en coût global inférieur à 30 ans du point de vue du propriétaire, notamment pour les rénovations à ambition "BBC Rénovation". Si le montant des aides (financements + prêt) reçues à l'année zéro correspond au montant des travaux, et que le remboursement annuel du prêt (le cas échéant) ne dépasse pas le gain annuel en facture d'énergie, le temps de retour du point de vue du propriétaire est immédiat. Sans aller jusque-là, les aides publiques pourraient être calculées de manière à assurer un retour sur investissement en un délai limité, par exemple 10 ans.

Sensibilité des résultats à l'augmentation des prix de l'énergie

La prise en compte de l'augmentation des prix de l'énergie entraîne une augmentation du bénéfice en coût global liée à la meilleure performance énergétique des maisons rénovées, le différentiel du coût de l'exploitation avant / après rénovation s'en trouvant amplifié. L'introduction de scénarios prospectifs à la hausse pour l'ensemble des vecteurs favorise ainsi la rénovation dans l'ensemble des cas en multipliant au maximum par 8,5 le gap entre statu quo et rénovation.

Sensibilité des résultats au taux d'actualisation

Le coût global est fortement sensible au taux d'actualisation choisi. Avec un taux d'actualisation de 0%, pour 85% de l'échantillon, le coût des travaux est compensé sur 30 ans par le bénéfice réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, avec un taux d'actualisation de 0%, le temps de retour coût global est inférieur à 30 ans pour 85% des MI analysées. Cela s'explique aussi par le fait que la valeur verte (au bénéfice des maisons rénovés) n'est pas « actualisée » : c'est comme si elle s'appliquait aujourd'hui et pas dans 30 ans.

Ainsi, vu qu'il est impossible de connaître ce paramètre pour les 30 ans à venir, si le coût global d'un projet de rénovation est un critère d'aide à la décision, deux mesures, a minima, de ce coût global devraient être effectuées, avec un taux d'actualisation minimum et un maximum, afin de vérifier que les conclusions sont similaires dans les deux cas en amont de la prise de décision. Par exemple, dans le cas présent, il n'est pas possible de se prononcer sur le scénario présentant le meilleur cout global pour 3 MI dont le gap entre statu quo et rénovation change de signe avec le changement du taux d'actualisation.

En conclusion sur l'analyse en coût global, **il convient de garder en tête les importantes incertitudes** liées à la projection sur 30 ans de la date d'application de la valeur verte, du taux d'actualisation et des coûts de l'énergie. Les hypothèses prises sur ces éléments changent radicalement les conclusions sur le « **Temps de Retour sur Investissement** », celui-ci **pouvant passer de 30 ans avec des hypothèses défavorables à moins de 10 ans si elles sont favorables**.

3. Glossaire

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
ACG : Analyse en Coût Global
ACV : Analyse du Cycle de vie
AUE : autres usages de l'énergie (toute l'électricité spécifique hors éclairage, ainsi que la cuisson)
BAU : *Business As Usual* = scénario de statu quo
BBC : Bâtiment Basse Consommation
CEN : Comité Européen de Normalisation
CETH : Chauffe-eau Thermodynamique
COP : Coefficient de Performance
CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DPE : Diagnostic de Performance Energétique
DS : Durée de Service
ECS : Eau Chaude Sanitaire
e/o : et / ou
F4 : Facteur 4
HQE : Haute Qualité Environnementale du bâtiment
ICV: Inventaire du Cycle de Vie
ILCD: *International Life Cycle Data system* = système de données international sur le cycle de vie
ITE : Isolation Thermique Extérieure
ITI : Isolation Thermique Intérieure
I3E : Indicateurs Energétique, Economique et Environnementaux
MI : Maison Individuelle
MOA : Maître d'Ouvrage
MOE : Maitrise d'œuvre
PAC : Pompe A Chaleur
PCE : Produits de Construction et Equipements
PER : Période de l'Etude de Référence
PVC : Polychlorure de Vinyle
RE2020 : Réglementation Environnementale 2020
RCU : Réseau de Chauffage Urbain
SHAB : Surface Habitable
SDP : Surface De Plancher
SHON : Surface Hors Œuvre Nette
SRE : Surface de Référence Energétique
STD : Simulation Thermique Dynamique
TEC : Taux d'Enrichissement en Capital
TRC : Temps de Retour Carbone
UE : Union Européenne
VEO : Vie En Oeuvre
yc : y compris

4. Introduction

Il est aujourd’hui consensuel que la rénovation du parc bâti à un niveau performant est l’un des points clés de la transition énergétique du secteur du bâtiment. La Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte (LTECV) définit l’objectif des politiques de rénovation énergétique du parc immobilier français, qui est d’atteindre les normes « bâtiment basse consommation » à horizon 2050 (article 1, III). La Stratégie Nationale Bas Carbone de 2020 réaffirme cet objectif, précise le rythme très important de 700 000 « rénovations thermiques radicales » à partir de 2030 et ajoute l’objectif global de neutralité carbone en 2050. Le double objectif énergie et carbone a été concrétisé par la réforme du Diagnostic de Performance Energétique (DPE) à l’été 2021, qui présente désormais une étiquette combinant ces deux critères.

Le projet PIM I avait pour objectif de mieux cerner les performances réelles des rénovations thermiques BBC ou équivalent de maisons individuelles (MI) réalisées en France métropolitaine entre 2008 et 2018. Par performance il est entendu consommation à l’usage après rénovation mais aussi, en parallèle, température intérieure en hiver et en été ainsi que la qualité de l’air intérieur (concentration de COV, particules fines et radon). Il s’agissait aussi de mieux comprendre le lien entre les ressources engagées pour la rénovation (en termes économique et en termes de travaux) et cette performance. Enfin, le ressenti des occupants sur ces questions, en lien avec les performances mesurées, a aussi été aussi interrogé. Les rénovations qui ont été étudiées dans ce projet peuvent être qualifiées d’ambitieuses (au-delà des exigences réglementaires) puisqu’il s’agissait d’atteindre les niveaux BBC Rénovation ($80 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2_{\text{SHON}}/\text{an}$ sur 5 usages⁶) ou STR ($50 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2_{\text{SHAB}}/\text{an}$ en moyenne française pour le chauffage) ou EnergieSprong (énergie positive sur tous les usages).

Le projet PIM II est mené dans la continuité de PIM I dans l’objectif d’élargir ce retour d’expérience à des parcours moins performants (BBC dit « par étape »⁷ et rénovations dites globales au sens du dispositif « Coup de pouce » BAR-TH-164⁸), d’affiner l’analyse croisée de la mesure et du ressenti des habitants sur le confort d’été notamment, d’éclaircir la pérennité et le cadre normatif des ITI biosourcée et de quantifier le bénéfice en carbone et en coût global de ces actions de rénovation par rapport à leur statu quo. Le présent rapport concerne ce dernier objectif. Ces deux indicateurs sont dits globaux car ils prennent en compte le cycle de vie de chaque scénario.

⁶Définition applicable au moment de la conception des rénovations étudiées : label BBC rénovation au sens de l’arrêté du 29 septembre 2009, <https://www.effinergie.org/web/les-labels-effinergie/effinergie-renovation/1654>

⁷<https://www.effinergie.org/web/bbc-par-etapes>

⁸<https://www.ecologie.gouv.fr/coup-pouce-renovation-performante-dune-maison-individuelle>

5. Objectifs de l'étude

5.1 Contexte et applications visées

L'objectif de la présente étude est donc de quantifier le bénéfice global, en termes de réduction d'impacts environnementaux, et en priorité des émissions de GES, et de coût, de rénover plutôt que de ne rien faire, ce sur un nombre conséquent de cas d'étude (au lancement du projet, 60 à 80 cas d'étude sont visés). Le but est de définir des ordres de grandeurs de bénéfices dépendant, par exemple, de la performance visée, du vecteur énergétique utilisé, de la localisation des maisons en France métropolitaine ou encore du type de matériaux utilisés. L'installation de panneaux photovoltaïques dans certaines opérations ne fait pas partie du champ de l'étude.

La principale application visée par cette étude est d'apporter des arguments pour un plaidoyer en faveur de la rénovation niveau BBC ou équivalent (i.e. à haut niveau de performance) en une fois ou par étapes planifiées. Conscient que cette intention est un biais potentiel, on tâchera aussi d'identifier les contre-arguments à la rénovation à haut niveau de performance ainsi que les avantages des rénovations moins ambitieuses.

On note que l'étude consiste en un exercice de comptabilité environnementale et économique rétrospective, c'est-à-dire en aval de toutes décisions concrètes prises dans la réalité. Elle sert à identifier des enseignements qui pourront supporter des décisions futures.

5.2 Planning

Le planning général du projet PIM II est rappelé dans la figure ci-dessous. La collecte de données a pris plus longtemps que prévus. Finalement, les principaux jalons de la présente étude conduite dans le lot 4 ont été les suivants :

- Pour décembre 2022 : Méthodologie d'évaluation, 1^{ère} version
- Pour mars 2023 : Collecte des données sur les MI de PIM I
- Pour octobre 2023 : Evaluation et analyse des résultats, 1^{ère} itération
- Pour juin 2024 : Collecte des données sur l'ensemble des MI finalisée
- Pour septembre 2024 : Méthodologie d'évaluation, 2^{ème} version
- Pour novembre 2024 : Evaluation et analyse des résultats, 2^{ème} itération
- Pour février 2025 : Livraison du Rapport d'étude, version finale

APR ADEME - Perf in Mind 2

Planning projet v0

MO = juillet 2022

Mois du projet	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30	M31	M32																										
Date	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F																										
	2022						2023												2024												2025																											
Lot	Tâche	Pilote																																																								
Lot 0 : Coordination du projet	EnerTech	Lancement	COPIL	COPIL	COPIL	COPIL	COPIL	COPIL																																																		
Lot 1 : Diffusion et appropriation de Perf in Mind par les acteurs																																																										
T1.1 : Valorisation PIM, déclinaison en livrables communicants	Effinergie																													D1																												
T1.2 : Investigation de zones d'ombre de Perf in Mind	Effinergie																													(CR)																												
T1.3 : Echanges avec les régions et autres acteurs	Effinergie																													(CR)																												
Lot 2 : Evaluation par la mesure BBC par étapes et réno "globale"																																																										
T2.1 : Identification et recrutement des maisons	EnerTech																																																									
T2.2 : Instrumentation, mesure 1 an, désinstrum.	EnerTech																																																									
T2.3 : Collecte des données sur les maisons	EnerTech																																																									
T2.4 : Satisfaction et appropriation par les ménages	K. Mamou																																																									
T2.5 : Analyse des données et rapport	EnerTech																																																									
Lot 3 : Confort d'été perçu par les habitants et leurs pratiques																																																										
T3.1 : Méthodologie, métrologie	M. Dupret																																																									
T3.2 : Suivi pendant l'instrumentation	K. Mamou																																																									
T3.3 : Entretiens semi-directifs	K. Mamou																																																									
T3.4 : Analyse et contribution au rapport final	M. Dupret																																																									
Lot 4 : Evaluation carbone, ACV et coût global																																																										
T4.1 : Méthodologie et champs d'étude	Verso																																																									
T4.2 : Collecte des données	EnerTech																																																									
T4.3 : Calcul, analyse et interprétation	Verso																																																									
T4.4 : Rédaction du livrable et synthèse dans le rapport final	Verso																																																									
Lot 5 : Migration de vapeur et biosourcé																																																										
T5.1 : Limites des biosourcés en ITI : synthèse bibliographique	Arcanne																													D5.1																												
T5.2 : Mesure in situ et comparaison au calcul WUFI	EnerTech	(Méthodo)	(Recrut. maisons)	(Instrumentation 1 an)	(Analyse)																																																					
T5.3 : Rédaction du livrable et synthèse dans le rapport final	EnerTech																													D5.2																												

Figure 1: Planning prévisionnel du projet PIM II

5.3 Organisations impliquées

5.3.1 Auteurs

VERSo et RECto sont les auteurs principaux de l'étude Bilan Carbone par l'ACV et Coût Global, Enertech est le second auteur.

5.3.2 Commanditaires

L'étude est réalisée à l'initiative d'Enertech et de RECto-VERSo qui la financent en partie. 70% du financement est apportée par l'ADEME. Dans ce cadre, le service Bâtiment de l'ADEME suit le déroulement de l'étude et apporte conseil et orientation.

5.3.3 Réviseurs

L'étude est suivie par un comité technique qui est composé des membres suivants : l'équipe projet de PIM II, l'AQC, le CSTB, Envirobat Occitanie, le CEREMA et l'ADEME. Ce comité a un rôle de réviseur critique et, en ce sens, est invité à proposer des réorientations sur les choix réalisés par les auteurs. En cas de divergence de point de vue, la décision finale reste dans les mains des auteurs qui devra néanmoins l'argumenter. Le cas échéant, cela sera rapporté en transparence dans le présent rapport.

5.3.4 Publics

Le présent rapport est destiné au réviseur ainsi qu'à toute parties externes intéressées par les travaux qui en fera la demande.

Par ailleurs, les principaux enseignements seront rapportés dans les documents de synthèse PIM II à destination des cibles du projet PIM II : institutionnels, fédérations professionnelles, fédérations bancaires, banques et organismes de financement, régions et collectivités infrarégionales portant des dispositifs d'accompagnement à la rénovation performance et autres acteurs de la rénovation performante.

5.4 Cadre de travail

5.4.1 Analyse du Cycle de Vie

L'empreinte environnementale, dont le Bilan carbone, est évaluée par la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'ACV est une méthode de calcul des impacts environnementaux des produits, des biens et de services. Elle est principalement utilisée à des fins de comparaison entre les produits remplissant la même fonction. L'ACV évalue et additionne les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service sur l'ensemble de son cycle de vie, y compris la fabrication, l'utilisation et la fin de vie. Différents indicateurs sont utilisés pour exprimer les impacts, par exemple : le changement climatique, la consommation d'énergie primaire, la formation de particules fines ou encore l'écotoxicité.

L'ACV est régie par les normes « chapeaux » (ISO 2006a, 14; 2006b) (ISO 14040-44 dans la suite) et, des normes et guides « filles » qui en précise les règles pour un périmètre géographique donnée, par catégorie de produits ou encore par type d'application. Par exemple, l'International Life Cycle Data system (ILCD) Handbook (European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010b) est un guide applicable pour toutes ACV conduites par les pays membres de la Commission Européenne, la norme EN 15978 ('EN 15978 - Sustainability of construction works — Assessment of

environmental performance of buildings — Calculation method', 2011) est une norme qui précise les règles pour des ACV conduites sur des bâtiments et enfin le (« Guidance for the implementation of the EU Product Environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) pilot phase » 2016) est un guide pour les ACV conduites dans le but de faire une déclaration environnementale de produit (BtoB ou BtoC).

On comprend ainsi que les normes ISO 14040-44 propose un cadre général qu'il convient d'adapter au contexte de l'étude tout en y restant conforme. C'est précisément ce que nous entendons faire dans ce chapitre, en s'appuyant sur des normes et guides « filles » existants (cf. analyse bibliographique).

Les normes ISO 14040-44 dresse les grandes phases d'une ACV que nous rappelons ici.

Dans la première phase d'une ACV, l'analyste indique la liste des objectifs visés par l'étude, ainsi que le public cible à qui les résultats de l'étude seront communiqués. Les hypothèses formulées tout au long de l'évaluation environnementale doivent tenir compte des objectifs de l'étude.

Dans la deuxième phase d'une ACV, l'analyste précise l'unité fonctionnelle qui sera étudiée, les limites du système, les catégories d'impacts jugées pertinentes pour l'étude et toutes les limites de l'étude.

Ensuite, l'analyste réalise un inventaire des flux entrants et sortants du système étudié. L'analyse de l'inventaire comprend tous les matériaux, les ressources et l'énergie nécessaires tout au long du cycle de vie d'un produit (par exemple l'extraction des matières premières, la fabrication, le transport, l'utilisation et la fin de vie). A ce stade, l'analyste doit soigneusement veiller à la cohérence des données ainsi qu'à leur fiabilité.

Lors de l'étape d'évaluation des impacts, les impacts environnementaux potentiels des entrants et sortants sont évalués grâce à l'utilisation de méthodes de caractérisation développées par des organismes spécialisés dans ce domaine. A la fin de cette étape, les premières conclusions peuvent être tirées. Ces conclusions doivent être vérifiées et validées lors de l'étape d'interprétation.

Dans la phase d'interprétation, l'analyste vérifie et améliore les hypothèses et les données utilisées durant l'étude, et identifie les paramètres clés du système. À ce stade, l'itération des étapes précédentes est effectuée afin d'améliorer l'exactitude des données, en particulier celle correspondant aux points clés. Ensuite, l'analyste étudie la sensibilité des résultats et des conclusions relatives aux hypothèses et aux incertitudes sur les données. Cette étape a lieu plusieurs fois au cours de l'étude et à la fin, lors d'une dernière itération, lorsque l'analyste expose les conclusions définitives et leurs limites.

Enfin, la réalisation d'une ACV requiert l'utilisation d'une base de données environnementales de procédés (fabrication de matériaux, usage d'énergie, transports, traitement des produits usagés...) intégrée à un logiciel ou un tableau Excel.

5.4.2 Analyse en Coût Global

Le Coût global est évalué par la méthodologie d'Analyse en Coût Global (ACG). L'ACG vise à additionner les coûts actualisés d'un produit durant son cycle de vie, y compris les investissements, l'exploitation, l'entretien et les coûts d'élimination en fin de vie, ainsi que la valeur résiduelle en fin de période d'analyse, le cas échéant. Le principal objectif du processus est de comparer plusieurs alternatives d'investissement sur un produit (visant le même service) en tenant compte de la valeur actuelle des coûts engendrés au cours de la durée de service (DS) du produit. L'intégration des coûts sur le cycle de vie représente le principal intérêt de l'ACG, en particulier lorsque les coûts d'utilisation sont susceptibles de représenter une part importante du coût global du cycle de vie. En conséquence, le processus est significatif pour les produits et les systèmes ayant des coûts d'exploitation et d'entretien importants.

La méthode est utilisée principalement pour les marchés publics et plus particulièrement pour les bâtiments. En effet, seul ce secteur bénéficie d'une norme internationale en ce qui concerne l'évaluation du coût global : la norme ISO 15686-5 (ISO 2017, 15). Sa déclinaison au niveau Européen est (« EN 16627 - Évaluation de la performance économique des bâtiments - Méthodes de calcul » 2015).

Les étapes pour réaliser une ACG décrites dans ces documents normatifs sont très similaires à celles d'une ACV :

- Définition des objectifs en termes d'utilisation et de public cible.

- Définition du champ de l'étude, c'est-à-dire des limites du système, des données économiques et des principales hypothèses.
- Collecte des données de coûts.
- Évaluation globale des coûts : actualisation des coûts et agrégation.
- Interprétation : amélioration et validation des résultats.

De la même manière que pour l'ACV, le cadre général décrit dans cette norme doit être adapté au contexte de l'étude tout en y restant conforme. C'est précisément ce que nous entendons faire dans ce chapitre, en s'appuyant sur des normes et guides « filles » existants (cf. analyse bibliographique).

Enfin, la réalisation d'une ACG requiert l'utilisation non pas d'une base de données mais de scénarios d'évolution des coûts dans le temps : un scénario d'actualisation permettant de comparer des coûts d'une année N avec ceux d'une année N+X, et des scénarios d'évolution des coûts de procédés, c'est-à-dire des prix, des matières premières et de l'énergie en premier lieu.

5.5 Analyse bibliographique

La définition de la méthodologie d'analyse de PIM II a débuté par une analyse bibliographique. Trois types de documents ont été analysés : les normes et règlementations européennes, les textes de lois français et les études déjà conduites par les parties prenantes de l'étude PIM (membre de l'équipe projet, du COTECH ou du COPIL).

La page suivante explicite le contenu des principaux documents analysés et les enseignements pour le présent projet.

En résumé, on distingue les documents :

(a) qui soit décrivent un cadre méthodologique qui répond à des objectifs très similaires aux nôtres et dont on s'est largement inspiré ; soit qui proposent des données d'entrée que l'on a repris dans la présente étude.

(b) qui apportent des ordres de grandeurs de résultats à confronter à ceux que nous obtiendrons dans PIM II

(c) qui ont contribué à nous apporter une culture générale sur le sujet (sans que des hypothèses ou données aient été repris de ces documents).

Ce classement (Cl.) est indiqué dans la dernière colonne.

Tableau 1: Synthèse de l'analyse bibliographique

Références	Auteur	Date	Contenu	Enseignements pour PIM 2	Cl
Normes et règlementations européennes					
(« prEN 17680 - Evaluation of the potential for sustainable refurbishment of buildings » 2022)	CEN	2022	Méthodologie pour définir les objectifs du projet à mener sur le bâtiment existant et évaluer sa performance globale. Indicateurs de performance à chaque étape, de la déconstruction (partielle ou totale) à la planification de la maintenance du bâtiment fonctionnel, en passant par la reconstruction et la mise en service.	1. Des définitions (maintenance, rénovation, réhabilitation...) 2. Les travaux de rénovation & réhabilitation sont vus comme l'association d'une étape de déconstruction partielle et d'une étape de reconstruction partielle. Pour les indicateurs de performance des travaux de déconstruction, la norme renvoi aux indicateurs des EPD, § Fin de vie, conformes EN 15804 et pour les travaux de reconstruction la norme renvoi à l'EN 15978 pour les indicateurs environnementaux et à l'EN 16627 pour les indicateurs économiques	c
(« EN 15978 - Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method » 2011)	CEN	2012	Méthodologie d'ACV de bâtiment : Définition des objectif / Spécification de l'objet de l'évaluation / scénarios permettant de définir le cycle de vie du bâtiment / Quantification du bâtiment et de son cycle de vie / Sélection des données / Calcul des indicateurs / Consignation des résultats / Vérification des résultats	/	c
(« EN 16627 - Évaluation de la performance économique des bâtiments - Méthodes de calcul » 2015, 16627)	CEN	2015	Méthodologie d'ACG de bâtiment : Définition des objectif / Spécification de l'objet de l'évaluation / scénarios permettant de définir le cycle de vie du bâtiment / Quantification du bâtiment et de son cycle de vie / Sélection des données / Calcul des indicateurs / Consignation des résultats / Vérification des résultats	/	c

(« Règlement délégué
No 244/2012 de la
Commission du 16
janvier 2012
complétant la
directive 2010/31/UE
du Parlement
européen et du
Conseil sur la
performance
énergétique des
bâtiments en
établissement un cadre
méthodologique
comparatif de calcul
des niveaux optimaux
en fonction des coûts
des exigences
minimales en matière
de performance
énergétique des
bâtiments et éléments
de bâtiment + M1 »
2013)

Textes de loi français
(« Arrêté du 4 août
2021 relatif aux
exigences de
performance
énergétique et
environnementale des
constructions de
bâtiments en France
métropolitaine et
portant approbation
de la méthode de

UE

2013

Cadre méthodologique à utiliser par les états membres qui précise les règles permettant de comparer les mesures écoénergétiques et les mesures intégrant des sources d'énergie renouvelable appliquées aux bâtiments, sur la base de leur coût global. Les états membres doivent utiliser ce cadre méthodologique pour faire des ACG de bâtiment de référence en comparant divers scénarios de performance énergétique et transmettre le rapport de l'étude à la Commission Européenne tous les 5 ans.

Cadre méthodologique pour une évaluation en coût global focalisé sur la performance énergétique des bâtiments.

Informations et données pour l'estimation du taux d'actualisation, du prix des énergies et de leur évolution, du prix du CO2.

a

Ministère de
la transition
écologique
et du
logement

2021

Méthodologie, données et scénarios pour
l'évaluation environnementale des bâtiments
selon la réglementation dite "RE2020"

Cadre méthodologique d'ACV pour une analyse
visant à dresser le profil environnemental d'un
bâtiment neuf.

Méthode pour agréger les FDES de durée de vie
différente dans l'ACV d'un bâtiment d'une durée de vie
définie

Proposition de méthode pour l'ACV dynamique
qu'on pourrait mettre en application en analyse de
sensibilité si estimé pertinent.

c

calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation » 2021)

Outil français

<https://www.inies.fr/> Alliance HQE-BBC

Depuis 2004

Base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements (PCE) de la construction.

Etudes des parties prenantes PIM

(« Guide méthodologique : Comment analyser les coûts associés à une rénovation énergétique » 2021)

Effinergie

2021

Identification du périmètre d'une rénovation énergétique, clarification des travaux induits indissociablement liés aux travaux d'amélioration de la qualité énergétique. Fournit des exemples concrets de travaux à intégrer ou à exclure suivant le périmètre économique étudié.

(« Prospective de la consommation de matériaux pour la rénovation énergétique BBC des bâtiments résidentiels aux horizons 2035 et 2050 » 2019)

ADEME

2019

Cette étude vise à estimer les quantités de matériaux nécessaires pour rénover l'ensemble du parc de logements Français au niveau BBC d'ici 2050.

Base de données environnementales de PCE (FDES) utilisé dans la présente étude

a

Clarification du périmètre physique de la rénovation énergétique.

a

Catégorisation des MI en typologies dépendant de l'année de construction, du système constructif et du mode de chauffage pour regroupement éventuel des MI PIM.

Définition de matériaux types mis en œuvre pour la rénovation énergétique de chaque catégorie (hors équipement de chauffage), certaines hypothèses ont été reprises pour PIM 2.

Estimation du type et de la quantité de déchets produit par typologie. Non utilisé dans PIM 2 car donnée déjà présente dans les FDES.

c

(« Guide pratique - Pour évaluer la performance environnementale des bâtiments rénovés et comparer leurs niveaux avec E+C- » 2018)	Alliance HQE-GBC France	2018	Guide pratique pour permettre aux concepteurs (MOE, AMO, Constructeurs TCE) de faire l'ACV d'un projet de rénovation. La méthodologie s'appuie sur E+C-	Cadre méthodologique d'ACV pour une analyse visant à dresser le profil environnemental d'un bâtiment rénové. A priori inspiré de l'EN 15978, adapté aux enjeux français.
(« Résultats du test HQE performance ACV rénovation » 2019)	Alliance HQE-GBC France	2019	Premières observations suite à l'application de la méthodologie HQE rénovation à 23 projets (logements collectifs et tertiaire). Chaque projet présente un seul scénario. Les observations comparatives se basent donc surtout sur la confrontation des résultats avec des éléments externes au projet (seuils E+C-, tests HQE neufs des années passées, interviews d'experts).	Pas de MI au sein des 23 projets analysés. Ordre de grandeur de la répartition des E GES entre PCE et Energie mis à jour en 2021 à l'occasion de l'étude NZC Rénovation du même auteur.

(« Programme d'innovation collaborative NZC rénovation - Analyse du Cycle de Vie des cas génériques retenus (Phase II) »
2021)

Alliance
HQE-GBC
France

2021

Le programme NZC Rénovation vise à identifier une méthode cohérente pour augmenter la performance des bâtiments existants sur l'ensemble du cycle de vie et à mettre en évidence des leviers efficaces pour la réduction des émissions de carbone sur le marché français de la rénovation.

Dans ce document (phase II), trois chapitres:

- Un rappel des principales caractéristiques des sept cas d'étude considérés ainsi que de la méthodologie utilisée.
- Une analyse des principaux résultats et singularités observées pour chaque cas d'étude
- Une analyse comparative globale avec une identification des enjeux différenciés pour réduire l'empreinte carbone des projets de rénovation.

Une seule MI au sein des 7 cas d'études. Niveau de rénovation visé inconnu. Des ordres de grandeurs de l'Impact des PCE neuf, de la contribution de chaque lot, du gain en conso à l'usage.

Ordre de grandeur de la répartition des E GES entre PCE et Energie et entre les différents lots de PCE à confronter aux résultats de PIM.

Messages clés et indicateurs de résultats à confronter aux enseignements de PIM II

b

<p>(« Programme d'innovation collaborative NZC rénovation - Carnet des leviers bas-carbone pour la rénovation (Phase III) » 2022)</p>	<p>Alliance HQE-GBC France</p>	<p>2022</p>	<p>L'objectif est de présenter les principaux leviers de réduction des émissions de CO2 applicables au marché de la rénovation en France.</p> <p>Levier 1: Tacticité - rechercher un juste équilibre entre préservation de l'existant et gain de performance sur le long terme</p> <p>Levier 2 : Circularité - inscrire le projet dans une stratégie ambitieuse d'économie circulaire</p> <p>Levier 3: Matérialité - intégrer le bon matériau au bon endroit en s'appuyant sur les singularités du bâti existant et de son contexte</p> <p>Levier 4: Technicité - choisir les systèmes techniques avec discernement en évitant les dispositifs complexes ou surajoutés</p> <p>Levier 5: Externalités - maximiser les émissions évitées ou compensées localement grâce au projet en interrogeant un périmètre urbain élargi</p>	<p>Il est difficile d'être en désaccord avec ces leviers. Ces leviers ne s'appuient pas seulement sur les résultats de la phase II car les chiffres présentés ne sont pas calculés dans le rapport de la phase II. En effet, la plupart des assertions sont comparatives (du type "il vaut mieux faire ceci que cela") alors que l'étude menée en phase II ne compare pas des solutions entre elles toutes choses égales par ailleurs. L'opacité des calculs rend délicat le jugement critique : on peut se demander si la reproductibilité des assertions faites a été étudiée, ou si elles sont basées sur un résultat qui va dans le bon sens.</p> <p>c</p>
<p>Rapport d'étude I3E Rénovation (Cycleco et EnerTech 2017)</p>	<p>Cycleco pour l'ADEME</p>	<p>2017</p>	<p>Comparaison par l'ACV de projets de rénovation et de reconstruction choisis et motivés par l'amélioration énergétique du bâtiment sur des indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux</p>	<p>Méthodologie ACV dont, en particulier, définition du statu quo, réflexion sur l'équivalence fonctionnelle, sur les différentes notions de frontières du système, sur les modèles d'évolution des données.</p> <p>Enseignements des résultats : éclairage sur les paramètres sensibles et non sensible (dégradation des performances des matériaux dans le temps, durée de vie, valeur résiduelle...) sur les étapes du cycle de vie dominant les impacts.</p> <p>a</p>
<p>Etude de rentabilité en coût global pour évaluer l'intérêt de la démarche « bâtiments durables méditerranéens » (Sie et Rieser 2019)</p>	<p>EnerTech, Marion Sié Expertise ACV, Institut Negawatt pour EnviroBAT BDM</p>	<p>2019</p>	<p>Analyse des données économiques et du ressenti qualitatif des utilisateurs, sur 8 bâtiments construits avec pour objectif d'identifier les principaux contributeurs à la valeur ajoutée en coût global étendu de la démarche BDM par rapport à une opération standard et de les quantifier.</p>	<p>Hypothèses sur les données économiques non collectées, en particulier les coûts de maintenance</p> <p>a</p>

(« Prise en compte du carbone dans les projets de rénovation - Etat des lieux et pratiques actuelles en France » 2023)	Cerema	2023	Etabli un état des lieux des pratiques actuelles en France et en ouverture à l'étranger sur la prise en compte du carbone en rénovation	Etat des lieux des méthodes existantes. Ce document nous a permis d'identifier les méthodologies existantes et de repérer celles qui répondent à des objectifs similaires aux nôtres.	c
Impact carbone des rénovations énergétiques. Rapport d'étude (Pouget Consultants 2023)	Pouget Consultants pour l'ANAH	2023	Rapport d'étude sur l'impact carbone des rénovations énergétiques. 4 cas d'étude dont 2 MI, 3 scénarios de rénovation du moins au plus ambitieux par cas d'étude. Méthode d'analyse en partie inspirée de RE2020. Des indicateurs de résultat : temps de retour carbone, carbone évité, impact carbone de la rénovation, variabilité selon les matériaux ou produits utilisés	Messages clés et indicateurs de résultats à confronter aux enseignements de PIM II	b
Comment transformer la rénovation énergétique en rénovation bas carbone ? En route vers la RE(no)2025 (IFPEB et Carbone 4 2025)	IFPEB & Carbone 4 pour le HUB des prescripteurs bas carbone	2025	Rapport d'étude sur l'impact carbone des rénovations énergétiques. 4 cas d'étude, pas de MI. 3 scénarios par cas d'étude: rénovation basique, rénovation dite "bas carbone", démolition reconstruction. Des indicateurs de résultats et plusieurs messages clés.	Messages clés et indicateurs de résultats à confronter aux enseignements de PIM II	b

6. Champ de l'étude

6.1 Etat initial et final

Lorsqu'on réalise l'ACV et l'ACG d'un projet de rénovation, on part d'un état initial existant qui n'est pas l'écosphère. L'état initial du système est le suivant : on dispose d'1m² de surface habitable S de MI en fonctionnement.

6.1.1 ACV

Cela signifie pour l'ACV que sont exclus du système tous les procédés qui concernent cet état initial, y compris la construction de la maison et sa fin de vie. L'impact des produits de construction et équipements existants – impact du berceau à la tombe – est donc ignoré soit parce qu'ils sont amortis (i.e. leur période de présence dans le bâtiment est plus grande que leur durée de vie) soit parce que leur impact résiduel serait le même dans les deux scénarios. En outre, si impact résiduel il y a, c'est plutôt une bonne chose de laisser le produit finir sa vie dans le bâtiment donc on ne souhaite pas afficher un impact qui pénaliserait cette pratique.

En fin de période d'analyse (i.e. Période de Référence pour l'Etude, PER, voir plus loin), l'état final est donc le même bâtiment qu'à l'état initial mais usagé. Ce pour les deux scénarios. Même si dans les faits la dépose de certains composants présents initialement aura été réalisé durant la PER, les impacts liés à cette dépose et au traitement des matériaux présents dans l'état initial sont exclus. Par contre, sont bien inclus la dépose et le traitement des composants mis en œuvre pendant la PER, même si cette dépose et ce traitement sont ultérieurs à la fin de la PER.

6.1.2 ACG

Dans l'ACG nous disposons des données de coûts réellement dépensés pendant la PER, ces derniers pouvant concerner l'achat d'un produit neuf, sa mise en œuvre ou la dépose de l'existant, sans distinction possible. Cela nous impose d'inclure dans les frontières de l'étude les opérations qui ont lieu pendant la PER sans faire la part des composants existants et des composants neufs. Ainsi, on se retrouve avec un état final distinct selon les scénarios. Il sera nécessaire de prendre en compte une valeur verte en fin de période d'étude (cf. chapitre Gestion des multifonctionnalités en p 34).

Par ailleurs, toutes les maisons étudiées dans le cadre de PIM ne sont pas dans le même état de rénovation à t=0 de la PER. Tout d'abord la date de construction peut varier de 1850 à 2000 et on ne connaît pas leur scénario d'usage, mais surtout, certaines ont déjà bénéficié d'actions de rénovation juste avant que le monitoring du projet PIM débute, par exemple le remplacement de la chaudière ou des menuiseries. L'état initial correspond donc parfois à une maison partiellement rénovée. Le bénéfice mesuré dans le cadre de ce projet concernera donc que la dernière étape du parcours de rénovation.

6.2 Scénarios

6.2.1 Définition des scénarios

Cette étude consiste à effectuer un ACV comparative par MI impliquant deux scénarios :

1. La rénovation d'une MI

2. Le statut quo sur cette même MI

Le scénario d'intérêt est défini comme le scénario que les parties prenantes de l'étude ont intérêt à voir plus performant. Il s'agit du scénario 1 de rénovation. Dans la suite, tous les choix de modélisation seront pris de manière à être équitable et cohérent entre les deux scénarios comparés, sinon désavantageux pour le scénario d'intérêt, ce de manière à s'assurer de l'impartialité des résultats comparatifs de l'étude.

6.2.2 *Le scénario de rénovation*

Le scénario de rénovation est celui qui a été effectivement réalisé dans la réalité. On précise que l'action de rénovation est l'occasion de changer des produits et équipements même s'ils ne sont pas arrivés en fin de durée de vie (DV). On considère ainsi qu'un remplacement de chaudière ou de fenêtres dans la maison, observé dans les faits, ne signifie pas systématiquement que la chaudière ou les fenêtres ont terminé leur DV mais juste qu'elles ont vécues au moins la moitié voire les deux tiers de leur DV. Quoi qu'il en soit, on prend en compte dans ce scénario les remplacements qui ont effectivement été réalisés dans la réalité.

Comme indiqué, le niveau performance énergétique atteint par la rénovation peut varier. On liste :

- La rénovation « BBC non conforme »
- La rénovation « Coup de pouce »
- La « Première étape d'une rénovation BBC »⁹
- La « Dernière étape d'une rénovation BBC »¹⁰
- La « Rénovation BBC »¹¹, qu'elle soit calculatoire ou DOREMI STR¹²

6.2.3 *Le statu quo*

Ce scenario est caractérisé par le principe suivant : le propriétaire ne rénove pas sa maison mais souhaite tout de même continuer à l'utiliser. Ces deux postulats sont compatibles à la condition que certains produits de construction et équipements (PCE) soient en état au cours de la période de référence. La liste des éléments entrant dans cette catégorie, que l'on appellera la liste des « éléments absolument fonctionnels » a été défini par les auteurs sur la base de (Cycleco et Enertech 2017) et est la suivante :

- Menuiseries extérieures (y compris (yc) opaques)
- Equipement de production de chaleur gaz, fioul et bois
- Chauffe-eau et ballons de stockage
- Radiateurs électriques et à eau y compris le réseau de distribution hydraulique

On note que le système de ventilation n'a pas été retenu comme un élément absolument fonctionnel, bien que l'absence de système de ventilation dans une maison puisse être vecteur de pathologies.

Dans ce scénario, il n'y a pas d'action de rénovation à t0 qui donne l'occasion de remplacer des éléments. Les éléments installés à t0 dans la réalité ne sont pas nécessairement en fin d'usage. On prend en compte une installation plus tard dans le statu quo. Une autre différence avec le scénario de rénovation est que l'élément installé est similaire alors qu'il peut avoir changé à l'occasion de la rénovation (ex: une chaudière remplacée par une PAC)

Pour déterminer la date de remplacement dans le scénario statu quo, on se base sur la date d'installation du produit existant (réelle ou estimée) avant t0 :

⁹ <https://www.effinergie.org/web/notre-expertise/renos-bbc-par-etape>

¹⁰ Ces projets sont des rénovations BBC de maisons qui ont bénéficiées de travaux antérieurs ou ont été construites plus récemment (1998).

¹¹ Référentiel en vigueur au moment de la conception des rénovations étudiées : <https://www.effinergie.org/web/les-labels-effinergie/effinergie-renovation/1654>

¹² <https://www.renovation-doremi.com/fr/blog/audit-%C3%A9nerg%C3%A9tique-et-str/>

- Pour les équipements de production de chaleur, on dispose de la date réelle d'installation. La date de remplacement dans le statu quo est donc égale à la date d'installation auquel s'ajoute la DV estimée de l'équipement, peu importe que l'équipement ait été effectivement remplacé dans les faits.
- Pour les chauffe-eaux et ballons, on considérera la date d'installation de l'équipement de production de chaleur comme la date d'installation de ces éléments. La date de remplacement dans le statu quo est donc déterminée de la même manière que pour les équipements de production de chaleur.
- Pour les radiateurs et réseaux de distribution hydraulique : on les prend en compte dans le statu quo que si effectivement remplacé en rénovation. Nb : les convecteurs et radiateurs non pas remplacés mais ajoutés à l'occasion de la rénovation ne sont pas pris en compte car on considère qu'ils correspondent à une augmentation de surface habitable (aménagement des combles, de la cave, etc.)
- Pour les fenêtres :
 - Si elles ont été remplacées dans la réalité, on suppose qu'elles étaient en place depuis 20 ans (sur une durée de vie DV de 30 ans) (installation à t0-20). La date de remplacement dans le statu quo est donc égale à t0+10.
 - Si elles n'ont pas été remplacées dans la réalité, on suppose qu'elles avaient 10 ans de DV sur 30 (installation à t0-10). La date de remplacement dans le statu quo est donc égale à t0+20.

Comme on le comprend avec ce qui vient d'être dit pour les menuiseries, qu'il arrive que, dans le scénario de rénovation, certains éléments parmi les « absolument fonctionnels » ne soient pas remplacés à t0. Dans ce cas, ils sont remplacés pendant la PER en suivant les mêmes règles que dans le statu quo.

Par ailleurs, d'après (Cycleco et Enertech 2017), la variation de la performance des menuiseries en fin de DV et du rendement des chaudières (encrassement...) est insignifiante sur les besoins en chauffage, et donc sur les résultats. Ces variations seront donc ignorées dans la présente étude.

NB : ces explications sont communes aux ACV et ACG

6.3 Définition de l'unité fonctionnelle

6.3.1 *Équivalence fonctionnelle*

Il convient de définir ce qui rend les scénarios comparés (rénovation versus statu quo) comparables entre eux, c'est-à-dire la base à partir de laquelle la comparaison pourra être menée. La table suivante liste des caractéristiques qui seront substantiellement différentes, proches et identiques entre les deux scénarios. Ce classement a été réalisé en considération des sources de données spécifiques de premier plan qui utilisées dans l'étude. En effet, le scénario de statu quo est basé sur des factures avant travaux et celui de rénovation sur des factures quelques années après, suite aux travaux. Nous détaillons sous le tableau ce que cela implique comme hypothèses.

Tableau 2: Liste des caractéristiques substantiellement différentes, proches et identiques pour les deux scénarios d'une même MI

Substantiellement différentes	Proches	Identiques
Confort ressenti en hiver	Surface habitable	Surface de plancher
Consigne de température en été	Consigne de température en hiver	Localisation
Confort ressenti en été	Apports en ECS	Type du bâtiment
Qualité de l'air mesurée	Nombre d'habitants	Profil d'usage de MI
		Eclairage et AUE
		Travaux de rénovation d'usage hors énergie

On note que l'on suppose :

- Une certaine maîtrise de la température intérieure en hiver dans les deux scénarios, mais pas en été. Cela signifie que, en hiver, dans le scénario statu quo, la consommation de chauffage est supérieure pour compenser les pertes dues aux défauts d'isolation et d'étanchéité pour avoir la même consigne de température que dans le scénario de rénovation. A savoir que cette compensation n'est pas toujours totale car il a été observé des phénomènes de sobriété subie dans les passoires thermiques due à des coûts énergétiques élevés. En l'absence de données sur ce phénomène, on le néglige, ce qui aura tendance à avantager les scénarios de statu quo qui apparaîtront moins impactant. Le confort ressenti en hiver n'est, par contre, pas le même à cause des différences entre mode de propagation de la chaleur, vitesse de montée en température, etc. En été, à l'inverse, la consigne de température de la MI laissé en statu quo n'est pas maîtrisée contrairement à celle de la MI rénovée qui possèdent en principe des occultations et dont l'isolation protège de la chaleur, ou encore qui peut inclure des dispositifs de brassage d'air plafonniers ou portatifs. Cela signifie que l'on suppose que les factures avant travaux n'incluaient pas ce type de dispositifs qui étaient effectivement moins systématique avant 2017.
- Une qualité de l'air dans le scénario de rénovation assurée par une ventilation qui n'existe pas la plupart du temps (ou est en fin d'usage) dans le scénario de statu quo, et donc effectivement n'apparaît pas dans les factures avant travaux.
- Une rénovation d'usage hors énergie équivalente. En effet, en complément de la rénovation énergétique, les MI ont parfois subi des rénovations d'usage qui n'ont pas été décrites d'un point de vue physique mais dont le coût a été estimé dans une catégorie « Rénovation hors énergie ». Ces travaux ont été inclus dans les deux scénarios dans l'ACV comme dans l'ACG par souci de cohérence.
- Le nombre d'habitants n'est pas nécessairement identique dans les deux scénarios. En effet la consommation d'électricité spécifique est englobée dans les factures, et elle est très impactée par le nombre d'habitants. Or, il est possible que le nombre d'habitants ait évolué entre le temps des travaux, plus spécifiquement, qu'il ait augmenté. C'est un biais qu'il conviendra de détecter en posant la question aux foyers. A savoir qu'en cas d'absence de réponse, on considérera que le nombre d'habitant n'a pas évolué, donc les factures après travaux ne seront pas ajustées et cela tend à défavoriser le scénario d'intérêt. C'est plus un biais à détecter si ce n'est pas le cas.
- Par ailleurs, l'état initial est le même dans chaque scénario : on part d'une MI habitée peu performante en terme énergétique mais fonctionnelle.

6.3.2 Fonction principale et flux de référence

Au regard du paragraphe ci-dessus, la fonction principale remplie par les deux scénarios est de fournir $1m^2$ de surface de plancher de MI pour un usage d'habitat, avec une consigne de $T^\circ C$ en hiver comprise entre T_1 et T_2 , avec un approvisionnement en ECS conforme à la réglementation des bâtiments résidentiels, et avec un approvisionnement en électricité permettant d'assurer l'éclairage et les autres usages de l'énergie.

Cela étant, la surface de plancher n'est pas une donnée disponible. Seule la surface habitable perçue après travaux a été collectée. La surface habitable peut varier avec les travaux : à la baisse et faiblement dans le cas d'une ITI, à la hausse et grandement dans le cas de l'aménagement d'une pièce initialement inhabité, par exemple un garage mais, dans ce dernier cas, prendre en compte la surface habitable perçue après travaux tant à favoriser le scénario de statu quo.

Le flux de référence choisi est donc le m^2 de surface habitable perçue après travaux.

6.3.3 Période de référence

Plusieurs facteurs sont à considérer pour le choix de la période de référence de l'étude (PER). Tout d'abord il convient de s'assurer que la PER est compatible avec la durabilité de la structure de la maison et le maintien des performances des PCE mis en œuvre au début ou en cours de PER. Sur le premier point il semble raisonnable de penser que si la MI a fait l'objet d'une rénovation dans la réalité c'est que la structure a été estimée en assez bon état et peut encore durer au moins 30 ans voire 50 ans. Le maintien des performances des PCE mis en œuvre à l'occasion de la rénovation dépend de leur DV. Ainsi il faudra prendre en compte un remplacement de ces PCE pendant la PER pour couvrir au moins toute cette période (cf. chapitre X).

Aussi, le choix de la PER doit prendre en compte la stabilité des différentes hypothèses et scénarios sur toute la PER comme par exemple les conditions climatiques de la zone géographique, le taux d'actualisation des coûts ou encore l'évolution des prix, sans quoi les résultats ne seront pas fiables. Plus on augmente la PER, plus les incertitudes sont grandes. Cela est vrai en particulier pour l'ACG car l'instabilité des prix est moins prévisible que des évolutions physiques qui, en général, sont soumises à plus d'inertie.

A noter enfin que l'on trouve dans la bibliographie deux choix distincts de PER : 50 ans dans le (« Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation » 2021) qui concerne les bâtiments neufs, et 30 ans dans le (« Règlement délégué No 244/2012 de la Commission du 16 janvier 2012 complétant la directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil sur la performance énergétique des bâtiments en établissant un cadre méthodologique comparatif de calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments et éléments de bâtiment + M1 » 2013) qui concerne les bâtiments rénovés.

Afin de limiter l'incertitude sur les hypothèses et scénarios sur l'ensemble de la PER, surtout pour l'ACG, la PER est fixée à 30 ans.

6.3.4 Unité fonctionnelle

L'état initial du système est le suivant : on dispose d'1m² de surface habitable S de MI en fonctionnement. L'unité fonctionnelle est alors définie de la manière suivante :

« A partir de l'état initial précédemment défini, fournir 1 m² de surface de plancher de MI pour un usage d'habitat, avec une consigne de température en hiver comprise entre T1 et T2, avec un approvisionnement en ECS conforme à la réglementation des bâtiments résidentiels, et avec un approvisionnement en électricité permettant d'assurer l'éclairage et les autres usages de l'énergie, ce pendant 30 ans »

Le scénario de rénovation présente des fonctions secondaires additionnelles :

- Meilleure maîtrise de la température intérieure en été
- T° ressentie plus confortable en hiver
- Meilleure qualité de l'air intérieur assurée par un système de ventilation

NB : ces définitions sont communes aux ACV et ACG

6.4 Frontières du système

6.4.1 Frontières spatiales

ACV

Les parties du bâtiment incluses dans les frontières spatiales de l'ACV sont définies au regard (1) des objectifs et du champ de l'étude préalablement décrits, (2) des données spécifiques collectées dans le

cadre PIM I (ref) et collectables dans le cadre de PIM II (ref) et (3) des données environnementales disponibles (cf. chapitre X).

Le tableau suivant présente pour les deux scénarios les parties du bâtiment incluses dans les frontières du système pour l'ACV. Le découpage proposé correspond à la granulométrie des contributeurs que l'on souhaite a priori observer dans l'analyse des résultats.

Tableau 3: Parties du bâtiment incluses dans les frontières spatiales du système pour l'ACV

	Scénario de rénovation	Scénario statu quo
Bâti	Murs : système complet d'isolation	
	Toiture : système complet d'isolation	
	Planchers bas : système complet d'isolation	
	Menuiseries extérieures (yc opaques)	Menuiseries extérieures (yc opaques)
	Occultations	
Systèmes	Ventilation : Caisson et réseau distribution	
	Chauffage & ECS : Equipements de production de chaleur et de production e/o stockage d'ECS	Chauffage & ECS : Equipements de production de chaleur et de production e/o stockage d'ECS
	Emetteurs de chaleur yc réseau	Emetteurs de chaleur yc réseau

Les systèmes complets d'isolation (macro-composants) sont décrits ci-après :

- Murs :
 - ITI : laine souple ou semi rigide avec ossature métallique, frein-vapeur, plaque de parement type BA13
 - ITE :
 - Isolant dans ossature bois + bardage
- Plancher bas :
 - En sous-face : isolant collé
 - Périphérique : isolant chevillé
 - Périphérique sur terre-plein : il faut creuser (40 à 60 cm) et mettre en place d'un massif de gravier
- Toiture :
 - Comble perdu : isolant seul
 - Rampant : idem ITI : ossature métallique, frein-vapeur, BA13
 - Sarking : PU ou laine de bois haute densité (pas d'ossature), pare-pluie et tasseaux pour retuiler.

Les isolants rencontrés dans les différents scénarios de rénovation sont les suivants :

Tableau 4 : isolants rencontrés pour les maisons PIM I et PIM II

Isolants sols	Isolants murs ITI	Isolants murs ITE	Isolants toits
Polystyrène expansé	Polystyrène expansé	Polystyrène expansé	Polystyrène expansé
Polyuréthane	Laine de verre	Laine de verre	Laine de verre
Laine de verre	Laine de roche	Laine de roche	Laine de roche
Ouate de cellulose	Polyuréthane	Siporex	Ouate de cellulose
Laine de roche		Fibre de bois	Fibre de bois
			Polyuréthane

Les menuiseries peuvent être en bois, aluminium, bois-aluminium ou encore PVC (teinte claire). Les fenêtres sont double ou triple vitrage. Dans le scénario statu quo, la quantité des menuiseries extérieures et le matériau des huisseries sont considérés identiques à ceux du scénario de rénovation, mais le vitrage est toujours double et la performance isolante est estimée moins bonne. Les fiches de la base INIES seront sélectionnées en prenant cela en considération.

Les occultations peuvent être des volets roulants PVC, des volets roulants ou battants bois, des volets roulants aluminium, des volets persienne PVC des volets persienne acier ou des brises soleil aluminium. Les systèmes de ventilation peuvent être des simple flux autoréglables ou hygroréglable ou des doubles flux. Les systèmes de production de chaleur peuvent être :

- Chaudière gaz mixte chauffage et ECS
- Chaudière bois granulés
- Chaudière fioul
- Chaudière électrique
- PAC air eau simple ou double service
- Poêle à bois granulés (acier)
- Poêle à bois bûches (acier)

Les ballons d'ECS peuvent être simples ou thermodynamiques. Certaines maisons sont aussi équipées d'un Chauffe-Eau-Solaire Individuel (CESI)

Les émetteurs de chaleur sont des radiateurs à eau chaude de puissance 1 kW.

Dans le scénario statu quo, les équipements de production de chaleur et de production e/o stockage d'ECS ainsi que les émetteurs de chaleur yc réseau peuvent être distincts car on considère un remplacement par un équipement du même type que celui déposé. En effet, dans le scénario de rénovation à l'inverse, une PAC peut remplacer une chaudière gaz.

ACG

Les parties du bâtiment incluses dans les frontières spatiales de l'ACG sont définies au regard (1) des objectifs et du champ de l'étude préalablement décrits et (2) des données spécifiques collectées.

Le tableau suivant présente pour les deux scénarios les parties du bâtiment incluses dans les frontières du système pour l'ACG. Le découpage proposé correspond à la granulométrie des contributeurs que l'on souhaite a priori observer dans l'analyse des résultats. Il est conforme aux préconisations de (« Guide méthodologique : Comment analyser les coûts associés à une rénovation énergétique » 2021).

Tableau 5: Parties du bâtiment incluses dans les frontières spatiales du système pour l'ACG

	Scénario de rénovation	Scénario statu quo
Périmètre essentiel	Murs : système complet d'isolation	
	Toiture : système complet d'isolation	
	Planchers bas : système complet d'isolation	
	Menuiseries extérieures (yc opaques)	Menuiseries extérieures (yc opaques)
	Ventilation : Caisson et réseau distribution	
Périmètre étendu	Chauffage & ECS : Equipements et régulation	Chauffage & ECS : Equipements
	ECS Solaire	
	Emetteurs de chaleur yc réseau	Emetteurs de chaleur yc réseau
	Divers énergie	Divers énergie
	Travaux hors énergie	Travaux hors énergie

Dans le scénario statu quo, la quantité des menuiseries extérieures et le matériau des huisseries sont considérés identiques à ceux du scénario de rénovation, mais la performance isolante est estimée moins bonne. Le prix du lot sera diminué forfaitairement, par exemple de 10% pour prendre cela en considération. Par ailleurs, le coût de ce lot inclut aussi les occultations qui conviendra de soustraire (si cela n'est pas possible, cela désavantage le scénario d'intérêt).

Aussi, les équipements de production de chaleur et de production e/o stockage d'ECS ainsi que les émetteurs de chaleur yc réseau peuvent être distincts car on considère un remplacement par un équipement du même type que celui déposé. En effet, dans le scénario de rénovation à l'inverse, une PAC peut remplacer une chaudière gaz.

On note que les travaux hors énergie sont inclus dans chaque cas, alors qu'ils sont rigoureusement identiques et pourraient être exclus des deux côtés. Nous avons fait ce choix car il s'agit d'un coût à financer par les ménages qu'il est intéressant d'afficher dans le résultat du coût global.

Cohérence Bilan carbone et Coût global

On note que les frontières spatiales du système sont sensiblement différentes pour chacune des études. En effet, en ACV les appareils de régulation sont exclus, alors que ces éléments sont inclus dans l'ACG qui inclus en plus un lot « divers énergie ». Cela est dû au fait que dans l'ACV nous sommes limités par la disponibilité des données spécifiques physiques et des données environnementales.

6.4.2 Frontières temporelles

L'état initial est le bâtiment avant la rénovation. Les étapes du cycle de vie suivantes sont incluses :

Tableau 6 : Frontières temporelles de l'étude

	ACV	ACG
Année 0	Ajout de PCE réno* neufs A1 – A5	Travaux de rénovation
Années 1 à 30	Consommations d'énergie pendant 30 années	Consommations d'énergie pendant 30 années
Années X, X', X'' (...), Xi compris entre 1 et 30	Maintenance des PCE réno* B	Maintenance des PCE
Années X, X', X'' (...), Xi compris entre 1 et 30	Remplacements des PCE réno* C-A1-A5	Remplacements des PCE
Année 30	Fin de vie des PCE réno* C	Vente de la maison

Les consommations d'énergie considérées sont :

- Chauffage
- ECS
- Ventilation et auxiliaires
- Eclairage
- Autres Usages de l'Energie (AUE)

Les dates de remplacement des PCE pendant la PER sont dépendantes des DV des différents PCE. Les DV sont celles indiquées dans les DED ou FDES des PCE considérées (cf. Chapitre 6.7 Type et source de données plus bas).

Pour la gestion de la multifonctionnalité engendrée par les PCE, mis en œuvre à l'année 0 ou en cours de PER, dont la DV dépasse la fin de la PER, voir le paragraphe « Gestion des multifonctionnalités » dans le chapitre 6.6 Règles de modélisation ci-dessous.

6.5 Points de vue pour le calcul du Coût global

En ACV le point de vue implicite est l'environnement et le but est d'identifier les variantes les plus bénéfiques selon ce point de vue. En ACG le point de vue n'est pas défini de manière implicite mais doit

être choisi par les auteurs de l'analyse. Déterminer le point de vue qui doit être pris en compte pour la réalisation de l'ACG est essentiel puisque cela détermine ce que l'on considère comme un coût et ce que l'on considère comme bénéfice. En effet, les coûts et les bénéfices sont différents pour les différents acteurs impliqués dans le bâtiment.

Dans la présente étude, le Coût global est calculé selon deux points de vue distincts décrit ci-dessous. Dans la vision sociétale on considère les coûts pour la société alors que dans la vision propriétaire, on considère les coûts du point de vue du propriétaire.

Tableau 7: Points de vue adoptés dans l'ACG des rénovations

Vision sociétale	Vision propriétaire
Coûts d'investissement initiaux	Coûts d'investissement initiaux
- Coût total travaux	- Apport initial (Coût total travaux – prêt – subventions)
Coûts de fonctionnement	Coûts de fonctionnement
- Consommation d'énergie	- Consommation d'énergie
- Maintenance	- Maintenance
- Remplacements	- Remplacements
Gains à la vente : valeur verte	- Remboursement + coût du prêt
	Gains à la vente : valeur verte

6.6 Règles de modélisation

6.6.1 Principe de modélisation

Deux principes de modélisation sont possibles : la modélisation attributionnelle et la modélisation conséquentielle. Dans la modélisation attributionnelle les procédés sont modélisés conformément à la chaîne de production existante. Les effets engendrés par une modification de la productivité actuelle due à la réalisation de chaque scénario ne sont pas pris en compte. Dans la modélisation conséquentielle, on suppose que la chaîne de production existante ne peut pas supporter les variations induites sur le marché par les différents scénarios étudiés et on construit les procédés en prenant en compte les conséquences d'une production marginale des produits, c'est-à-dire d'une production en marge du système de production actuel. Le principe de modélisation attributionnelle est adopté dans la présente étude qui consiste, on le rappelle, en une comptabilité environnementale et économique rétrospective, c'est-à-dire en aval de toutes décisions concrètes prises dans la réalité.

Cela étant, la prise en compte de scénarios prospectifs sur l'évolution du mix électrique engendrée par tel ou tel type de rénovation massive (par ex : rénovation massive peu performante avec chauffage électrique), pour autant qu'il soit possible de la réaliser, pourrait s'apparenter à une modélisation conséquentielle.

NB : cette règle est commune aux ACV et Cout Global

6.6.2 Gestion des multifonctionnalités

Cas général

Les situations de multifonctionnalités dans le second plan sont gérées dans la base de données utilisée pour l'étude.

La situation de multifonctionnalités que l'on rencontre dans le premier plan de la présente étude est celle où les travaux réalisés sur le bâtiment engendrent des bénéfices au-delà de la PER. Cette situation est gérée par une allocation physique (on considère une fraction de composants) dans l'ACV et une extension du système (valeur verte) dans le cas de l'ACG.

ACV

Pour tous PCE, mis en œuvre à l'année 0 ou en cours de PER, dont la DV dépasse la fin de la PER, une fraction F de composant est comptabilisée afin d'allouer l'impact au présent système.

$$F = \text{Nombre d'années sous la PER} / \text{DV totale du PCE}$$

ACG

Le fait que des PCE, mis en œuvre à l'année 0 ou en cours de PER, aient une DV qui dépasse la fin de la PER se traduit dans l'ACG par une valeur verte, c'est-à-dire une survalorisation du bâtiment dû à sa meilleure performance énergétique en fin de PER, ce quelle que soit la DV restante des PCE puisqu'on ne considère pas de dégradation progressive de ceux-ci sur leur DV. Ainsi, on considère à l'étape « Année 30 : Vente de la MI » le différentiel de la vente c'est à dire la valeur verte du scénario de rénovation que l'on calcule sur la base de la différence de Diagnostic de Performance Energétique (DPE).

6.6.3 Critères d'exclusion d'intrants et d'extrants

Il n'y a pas de critère d'exclusion systématique. Les exclusions qui ont été opérées par manque de données spécifiques ou environnementales sont listées dans la table ci-après. Il est précisé si cette exclusion avantage le scénario de rénovation, d'intérêt pour les parties prenantes de l'étude, ou le scénario statu quo.

Tableau 8: Liste des éléments exclus

	Avantage le scénario de rénovation	Avantage le scénario statu quo	Sans effet de distorsion
ACV	Appareils de régulation du chauffage Isolation périphérique (sol) Béton de la chape flottante	Aucun	Construction initiale de la MI et traitement en fin de PER
ACG	Filtres VMC	Aucun	Construction initiale de la MI et traitement en fin de PER

6.7 Type et sources de données

6.7.1 Données spécifiques de premier plan

La liste des données spécifiques à chaque opération directement accessible dans le tableau de synthèse est donnée ci-après :

- Quantité et type de matériaux isolants pour les murs, la toiture et le plancher
- Quantité et type de menuiseries et occultations mises en œuvre
- Quantité et type d'équipement mis en œuvre pour la production de chaleur et date d'installation
- Quantité et type d'équipement mise en œuvre production et/ou stockage d'ECS
- Type d'émetteur mis en œuvre
- Quantité et type d'équipement de ventilation mis en œuvre
- Coûts des travaux par poste

Enfin, des scénarios ont été construits par EnerTech sur la base de cas réels pour déterminer :

- Les matériaux additionnels composants le système complet d'isolation pour les murs, la toiture et le plancher (ITI, ITE, isolation sous combles, sarking, isolation sous dalle, sous chape...) Cf. p 30
- Le dimensionnement des réseaux de distribution de chaleur par m² habitable, le cas échéant

- Le dimensionnement des réseaux de ventilation par m² de plancher et type d'équipement [données interne Enertech issues du projet e-LICCO]
- La maintenance des équipements : fréquence et coût d'intervention, par équipement [données interne Enertech]
- Les consommations d'énergie à l'usage du scénario statu quo considérant les remplacements opérés pendant la PER [données calculées par Enertech sur la base de leur outil « Besoins simples »]

6.7.2 Données environnementales

Les données environnementales utilisées pour les PCE sont les fiches de la base INIES.

Pour la première itération, on privilégie la représentativité devant la précision c'est pourquoi :

- Les FDES collectives sont choisies en priorité, mais restent rare pour couvrir le périmètre considéré pour notre étude. Viennent ensuite les Données Environnementales par Défaut (DED) auxquelles une réduction forfaitaire de 30% sera appliquée (pour annuler la majoration automatique réalisée par INIES). Ce type de données est le plus utilisé. Enfin dans le cas où aucune DED ou donnée collective ne sont disponibles, des FDES individuelles sont utilisées.
- Les fiches conformes à l'EN 15804 + A2 sont choisis de préférence mais il n'y a pas, fin 2024, assez de fiches conformes à l'EN 15804 + A2 pour couvrir tout le système. Certaines sont donc conformes à l'EN 15804+A1. Un mélange des fiches « + A1 » et « + A2 » n'est pas souhaitable par soucis de cohérence et aussi car, mis à part l'impact sur le changement climatique et l'utilisation d'énergie primaire, ces deux versions de la norme ne partage pas la même liste d'indicateurs, mais il n'a pas été possible de faire autrement.¹³

Les données environnementales utilisées pour les consommations d'énergie sont des inventaires de la base ecoinvent. Le mix moyen électrique issu de ecoinvent est utilisé pour l'ensemble des usages en base. La prise en compte différenciée de ces différents usages fera l'objet d'un paragraphe spécifique présentant les analyses de sensibilité des résultats aux mix électriques considérés. Ce choix est préféré aux Données Environnementales de service car cela permet :

- Une plus grande cohérence avec les données environnementales utilisés pour les PCE dont les fiches sont construites par des analystes qui utilisent la base ecoinvent en arrière-plan.
- De construire des scénarios d'évolution du mix énergétique français (cf. paragraphe suivant)

6.7.3 Scénarios d'évolution

L'instabilité dans le temps de certaines données nous incite à prendre en compte des scénarios d'évolution, pour autant qu'il soit techniquement possible de le faire. Il s'agit en priorité d'évolution :

- Pour l'ACV : du mix électrique. Les scénarios sont tirés de (« Prospective - Transitions 2050 - Rapport » 2021)
- Pour l'ACG : des prix de chaque vecteur énergétique

La table suivante indique les taux annuels d'augmentation du coût de l'énergie fournis dans (« Cahier des charges Audit énergétique dans les bâtiments » 2020). Une analyse de sensibilité, intégrant les taux de variation présentés, sera menée sur ce point.

Tableau 9: Taux annuel d'augmentation du coût de l'énergie

¹³ Depuis novembre 2022, les fiches de la base INIES doivent être progressivement mis à jour suite à la mise en application d'un amendement de la norme Européenne régissant leur réalisation (« NF EN15804 + A1 /CN - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la NF EN 15804+A1 » 2016; « NF EN 15804 + A2 - Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. » 2019). La période 2023-25 sera donc une période transitoire pendant laquelle la base INIES accueillera en son sein deux versions non compatibles de fiches : celles dites « +A1 » et celles dites « +A2 ».

Type d'énergie	Taux annuel d'inflation des prix ¹
Fioul	2,8%
Gaz	2,2%
Bois	1,2%
Électricité	1,1%

¹ Taux à appliquer sur les tarifs au kWh en euros constants

Les scénarios d'évolution pour l'ACV et l'ACG sont issues de deux sources distinctes. Chacune considère une décarbonation du mix électrique à l'avenir mais mis à part cela, , il est peu probable que les scénarios soient cohérents entre eux. Il est donc risqué de faire une analyse croisée des résultats ACV et ACG prenant en compte cette évolution.

6.8 Méthode de caractérisation des indicateurs

6.8.1 Comptabilité environnementale, y compris du carbone

Les valeurs d'impact environnemental de chaque module, hors module D, des fiches de la base INIES sont agrégées de manière statique pour consolider un indicateur total.

De la même manière, la valeur d'impact changement climatique de chaque module, hors module D, des fiches est agrégée de manière statique pour consolider un indicateur d'impact glissant sur 100 ans après l'émission de GES. Une analyse de sensibilité en prenant en compte une comptabilité dynamique des émissions similaire à la méthode préconisée dans l' (« Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation » 2021) n'a pas pu être réalisée dans le temps du projet.

6.8.2 Comptabilité des euros

Les coûts et gains ayant lieu au cours de la PER sont agrégés en prenant en compte une actualisation des coûts à une date Année 0 donnée. Le taux d'actualisation permet de prendre en compte qu'avoir de l'argent aujourd'hui, génère des revenus demain. Par exemple, si on considère un taux d'actualisation à 1%, alors 1€ dépensé dans 10 ans équivaut à 90 centimes dépensé aujourd'hui.

L'estimation de ce taux est en général basée sur le taux que les propriétaires d'un bien immobilier paient sur leur crédit ou le taux qu'une banque verse aux épargnants sur leurs dépôts. Voici quelques valeurs de taux d'après différentes sources :

- Taux du marché des emprunts interbancaire de la zone euro : 1,403% au 3 novembre 2022.
- Taux emprunts immobiliers particulier 2022 : 1,1% à 3,1%
- Taux d'épargne particulier 2022 : 1% à 4,6%
- Taux de Prêt à Taux Zéro (PTZ) : 0%

Par ailleurs, les textes (« EN 16627 - Évaluation de la performance économique des bâtiments - Méthodes de calcul » 2015; « Règlement délégué No 244/2012 de la Commission du 16 janvier 2012 complétant la directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil sur la performance énergétique des bâtiments en établissant un cadre méthodologique comparatif de calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments et éléments de bâtiment + M1 » 2013) préconisent de faire une étude avec un taux d'actualisation de 3% ainsi qu'une analyse de sensibilité.

En conséquence, il a été décidé de commencer l'étude avec un taux de 3% et de faire une analyse de sensibilité avec un taux de 0% correspondant au PTZ.

Ce taux d'actualisation sera appliqué sur les euros « constants » (i.e. corrigé de l'inflation normale) de l'année de référence. Dans cette hypothèse, tous les coûts différés supportent le même taux d'inflation. Les rénovations de PIM I ont eu lieu en moyenne entre 2015 et 2018 et celles de PIM II entre 2017 et 2020. L'année de référence est fixée en 2018. Ainsi, en pratique, lorsque l'on prend en compte des factures de 2020, les coûts seront actualisés à 2018 et la différence d'inflation observée entre 2020 et 2018 sera soustraite.

Les coûts sont actualisés en appliquant l'Equation 1 (ISO, 2008b).

$$\text{Present Value} = \sum_{x=0}^N \text{Future cost}_x \frac{1}{(1+rd)^x} \quad (1)$$

Dans laquelle :

rd = Taux d'actualisation

7. Inventaire du cycle de vie

7.1 Modélisation ACV

7.1.1 Systèmes constructifs et lots d'équipement

La modélisation des différents modes d'isolation mis en œuvre dans l'ensemble des maison analysés nécessite la prise en compte de complexes. Les tableaux suivants présentent les types de matériaux considérés et les quantités associées.

Tableaux 10 : Modélisation des différents complexes

Flux	Quantité	Unité	Source donnée d'activité
Sortant			
Isolation mur ITI	1	m ²	
Entrant			
Ossature métallique	4,13	ml	Calculatrices et documents en ligne fournissant des ratios d'ossature par m ² de contre cloison. Moyenne
Frein vapeur	1	m ²	
Isolant	1	m ²	

Flux	Quantité	Unité	Source donnée d'activité
Sortant			
Isolation mur ITE	1	m ²	
Entrant			
Bardage	1	m ²	
Ossature	25	dm ³	http://www.arcabois.fr/files/Classement_BCE-3.pdf
Isolant	1	m ²	

Flux	Quantité	Unité	Source donnée d'activité
Sortant			
Isolation sol plancher bas	1	m ²	
Entrant			
Isolant	1	m ²	

Flux	Quantité	Unité	Source donnée d'activité
Sortant			
Isolation combles perdus	1	m ²	
Entrant			
Isolant	1	m ²	

Flux	Quantité	Unité	Source donnée d'activité
Sortant			
Isolation sous rampants	1	m ²	
Entrant			
Ossature métallique	4,13	ml	Expérience Enertech
Pare pluie	1	m ²	

Isolant	1	m ²	
Flux	Quantité	Unité	Source donnée d'activité
Sortant			
Isolation sarking	1	m ²	
Entrant			
Ossature	25	dm ³	http://www.arcabois.fr/files/Classement_BCE-3.pdf
Pare pluie	1	m ²	
Isolant	1	m ²	

L'ensemble des autres éléments intégrés dans notre périmètre sont associés à une FDES unique. Le détail des FDES utilisées est présenté en Annexe 1.

Des hypothèses ont été faites pour déterminer les caractéristiques des émetteurs eau chaude et des réseaux de chauffage :

- 1 radiateur pour 10 m²
- 0,63ml/m²SHAB pour le réseau de distribution

Par ailleurs les quantités de gaines associées aux systèmes de ventilation sont tirés de l'outil e-LICCO :

- 0,45ml/m²SHAB pour une simple flux
- 0,74ml/m² SHAB pour une double flux

7.1.2 Remplacements

Le remplacement de différents composants du bâtiment est considéré selon une fréquence définie par la durée de vie renseignée dans les données environnementales considérées. Celle-ci est présentée en Annexe 1 pour l'ensemble des composants considérés dans notre étude. Ainsi les impacts fournis pour les différentes phases du cycle de vie des composants sont multipliés par $\frac{DV}{30}$ dans le cas d'une installation en t₀, ou par $\frac{DV}{(30-t)}$ dans le cas d'une installation à une année t.

La fraction des impacts totaux sur le cycle de vie complet correspondant aux pourcentages des années de vie des composants non « consommées » (par exemple 20 ans de durée de vie restants pour les isolants d'une durée de vie de 50 ans installés en t₀, soit 40 %) sont donc exclus de notre périmètre.

7.1.3 Mix énergétiques

En base de l'étude, le mix électrique considéré pour l'ensemble des consommations électriques et le mix moyen français basse tension présent dans la base de données ecoinvent 3.10.

7.2 Modélisation ACG

7.2.1 Travaux de rénovation et remplacements

Les données de coûts prises en compte sont les données brutes en €TTC collectées par Enertech sur la base des devis et/ou factures. Les coûts ont été classés par lot. Lorsqu'un composant arrive en fin de vie en cours de période, le coût du lot actualisé à l'année du remplacement est comptabilisé.

Ainsi, lorsque disponibles, car effectivement mis en œuvre à t0 dans la réalité, les coûts des travaux correspondent aux coûts réels. Lorsqu'ils n'ont pas été collectées, les coûts pris en compte sont ceux récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11 : Coûts des éléments considérés dans l'ACG

	Unité	Prix/Unité	Source / mode de calcul
Chaudière gaz mixte chauffage et ECS	U	7200	Rapport PIM I (Enertech et al. 2021)
Chaudière bois granulés	U	26600	Rapport PIM I (Enertech et al. 2021)
Chaudière fioul	U	7200	Rapport PIM I (Enertech et al. 2021), supposé équivalent à chaudière gaz
PAC air eau	U	13700	Rapport PIM I (Enertech et al. 2021)
Poêle à bois granulés (acier)	U	5800	Rapport PIM I (Enertech et al. 2021)
Poêle à bois buches (acier)	U	5800	Rapport PIM I (Enertech et al. 2021)
Ballons d'eau chaude	U	Déterminé sur la base de la collecte de données	Fichiers de collecte PIM I et PIM II
CESI	U	5400	Rapport PIM I (Enertech et al. 2021)
Ballons thermodynamiques	U	2400	Rapport PIM I (Enertech et al. 2021)
Menuiseries bois		Déterminé sur la base de la collecte de données	Fichiers de collecte PIM I et PIM II
Menuiseries bois-alu	m ²	Déterminé sur la base de la collecte de données	Fichiers de collecte PIM I et PIM II
Menuiseries alu	m ²	Déterminé sur la base de la collecte de données	Fichiers de collecte PIM I et PIM II
Menuiseries PVC	m ²	Déterminé sur la base de la collecte de données	Fichiers de collecte PIM I et PIM II

7.2.2 Maintenance des PCE

Les coûts de maintenance des systèmes de production de chaleur sont estimés par Enertech sur la base de projets réels suivis ces dernières années. Les coûts annuels considérés sont :

Tableau 12 : Coût de l'entretien des différents systèmes

Chaudière gaz	Chaudière fioul	Split air-air	PAC air-eau	Poêle buche	Poêle granulés	Chaudière granulés
155 €	150 €	154 €	206 €	81 €	153 €	251 €

7.2.3 Coût de l'énergie en phase d'usage

Coût des énergies : la consommation en énergie finale a été multiplié par le prix du vecteur énergétiques concernés. Les prix sont synthétisés dans la table suivante

Tableau 13 : Coût des énergies considérés pour l'ACG

Prix TTC/kWh	(€)	Source
--------------	-----	--------

Gaz	0,088	Tarif réglementé B1 / B2i 2022 https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/catalogue?page=datafile&datafileId=daf4715a-0795-4098-bdb1-d90b6e6a568d
Fioul	0,135061	https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/catalogue?page=datafile&datafileId=0bf930dc-bfac-4e6f-a063-ec1774c6d029
Bois granulés	0,138456	https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/catalogue?page=datafile&datafileId=0bf930dc-bfac-4e6f-a063-ec1774c6d029
Electricité	0,174	Tarif réglementé Base 2022
Bûches	0,046875	Estimation empirique

En complément, les abonnements suivants sont considérés :

Tableau 14: Coûts des abonnements considérés pour l'ACG

	Prix (€ TTC/an)	Source
Gaz	249,86	Tarif réglementé B1 / B2i 2022
Electricité	<ul style="list-style-type: none"> • 3kVA : 103,49 • 6kVA : 136,12 • 9kVA : 169,89 • 12kVA : 204,03 	Tarif réglementé Base 2022

7.2.4 Valeur résiduelle en fin de période

Les valeurs résiduelles sont estimées en deux temps. Tout d'abord un prix au m² de base est estimé. Ensuite, on définit le pourcentage de gain sur le prix (de vente), c'est-à-dire la « valeur verte », en fonction de l'écart entre l'étiquette DPE avant et après rénovation.

Le prix au m² est estimé par la moyenne des prix au m² d'immeuble à vendre au moment de l'étude dans le département concerné, d'après le site immobilier.notaire.fr¹⁴ consulté le 19/04/2024. La valeur verte est calculée en multipliant le prix au m² par les taux indiqués sur le site notaires.fr¹⁵. La figure suite donne pour exemple ces taux pour les maisons de classes A, B, C, E, F ou G par rapport aux maisons de classe D.

¹⁴ <https://www.immobilier.notaires.fr/fr/prix-immobilier?typeLocalisation=FRANCE&typeBien=MAI&neuf=A>

¹⁵ <https://www.notaires.fr/fr/immobilier-fiscalite/etudes-et-analyses-immobilieres/performance-energetique-la-valeur-verte-des-logements#toc-anchor-0>

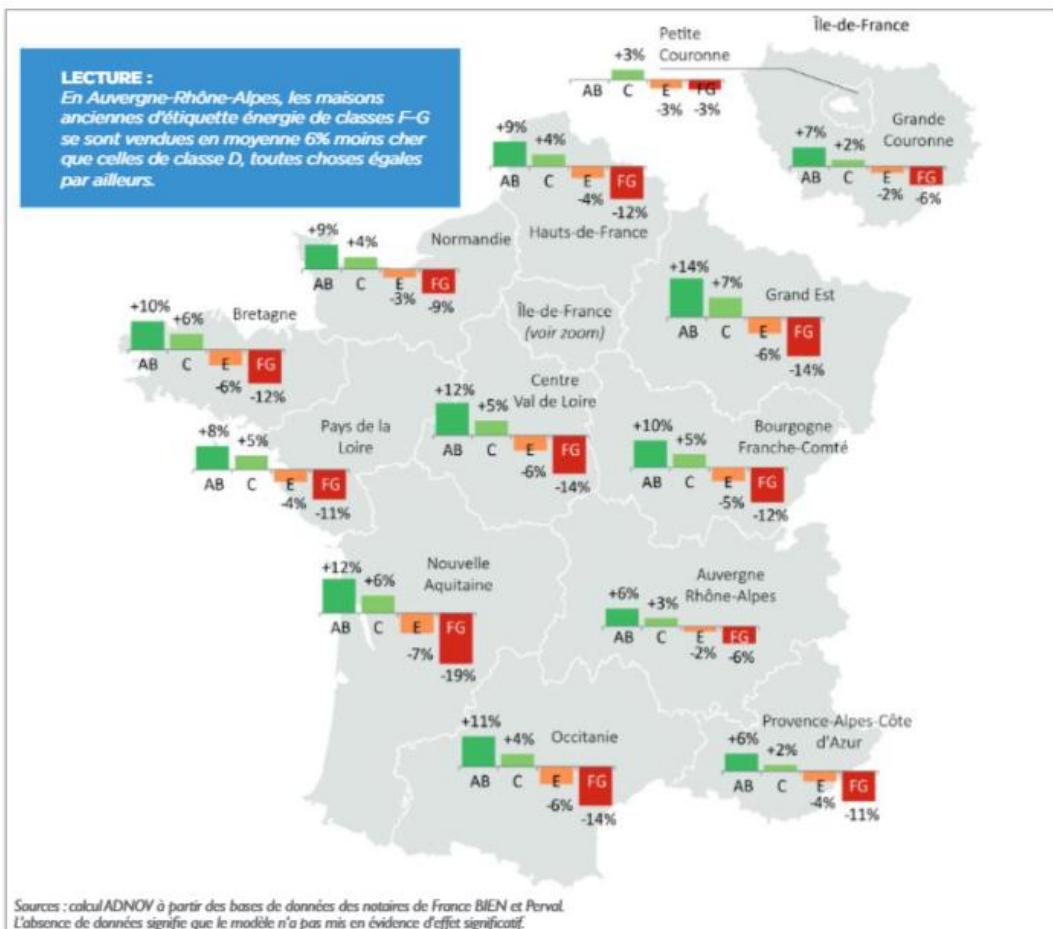


Figure 2: Impact des étiquettes énergie sur le prix de vente des maisons anciennes en 2021 par rapport aux maisons de classe D [Source : notaires.fr]

7.3 Analyse de l'inventaire

Une fois la modélisation de chaque scénario pour chaque MI réalisée, en ACV et en ACG, nous avons pu constater des caractéristiques de l'échantillon qui méritent d'être présentée en amont de l'analyse des résultats en carbone et coût global. Ces caractéristiques sont présentées dans ce chapitre.

7.3.1 Taille de l'échantillon

La collecte de données a porté sur une centaine de MI (PIM I et II) mais elle ne fut pas aussi fructueuse que prévu. En définitive le nombre de MI analysées dans l'ACV et dans l'ACG est résumé dans le tableau suivant.

Tableau 15: Nombre de maisons étudiées en ACV et ACG

Ambition de rénovation	ACV	ACG
Non conforme	2	0
Dernière étape de rénovation	7	7
BBC		

Première étape de rénovation	4	4
BBC		
Coup de pouce	6	5
BBC Rénovation	12	10
Total	31	26

On note qu'il y a 3 MI en moins dans l'ACG que dans l'ACV car, sur ces MI, les actions de rénovations ont pu être collectées mais pas les coûts et/ou aides financières associées.

Conclusion

Face à la réalité du terrain concernant la difficulté à collecter des données auprès des ménages, **l'ambition de mener dans PIM II une analyse statistique par ambition de rénovation est revue à la baisse**. Nous tâcherons par contre de comprendre les paramètres déterminant le bénéfice en carbone et en coût global.

7.3.2 Caractéristiques de la MI avant rénovation

Les tables suivantes présentent les caractéristiques des MI avant rénovation. La première indique pour chaque ambition de rénovation, la classe de Diagnostic de Performance Energétique (DPE) avant rénovation des MI. La seconde indique le système de production de chaleur avant rénovation pour chaque MI.

Tableau 16 : Nombre de MI par classe de DPE, par ambition de rénovation

Ambition de rénovation	Classe de DPE avant rénovation					Total
	C	D	E	F		
1. Réno non conforme		1	1			2
2. Dernière étape BBC Rénovation	4	2	1			7
3. Première étape BBC Rénovation			4			4
4. Coup de pouce		1	4	1		6
5. BBC Rénovation		7	4	1		12
Total	4	11	14	2		31

On note que la classe de DPE des rénovations « coup de pouce » et « première étape de rénovation » est majoritairement E voire F alors que la classe de DPE des rénovations « BBC » est D (7/12).

Tableau 17 : Nombre de MI par système de production de chaleur avant rénovation, par ambition de rénovation

Ambition de rénovation	Système de production de chaleur avant rénovation							Total
	Bois bûches	Bois pellets	Chaudière électrique	Fioul	Gaz	Gaz & Bois bûches	Fioul & Bois bûches	
1. Réno non conforme					1	1		2
2. Dernière étape BBC Rénovation				1	3	3		7
3. Première étape BBC Rénovation	1			1	1		1	4

4. Coup de pouce		1	5			6
5. BBC Rénovation	1	1	4	6		12
Total	1	2	1	11	11	4
						1
						31

On note que le système de production de chaleur des MI avant rénovation est majoritairement le fioul (5/6) pour les « coup de pouce » et le gaz (6/12) puis le fioul (4/12) pour les « rénovations BBC ».

Conclusion

L'échantillon analysé présente un déséquilibre dans l'état initial des MI par ambition de rénovation. En particulier, les rénovations « coup de pouce » incluent majoritairement des MI de DPE de classe E voire F avec un chauffage au fioul alors que les rénovations « BBC » incluent majoritairement des MI de DPE classe D avec soit un chauffage au fioul ou au gaz. **Ainsi, dans l'analyse à suivre, il faudra être prudent dans l'énoncé de conclusions du type « Les rénovations BBC sont ... comparativement au rénovations coup de pouce » et regarder d'abord si ce n'est pas l'état initial qui est en cause.**

7.3.3 Caractéristiques de la rénovation des équipements CVC

Dans ce chapitre on étudie les caractéristiques de la rénovation des équipements CVC dans les MI étudiées. La table suivante indique pour chaque ambition de rénovation, pour combien de MI la rénovation a impliqué le remplacement du système de production de chaleur.

Tableau 18 : Nombre de MI dont la rénovation a impliqué le remplacement du système de production de chaleur, par ambition de rénovation

Nombre de MI pour lesquelles la rénovation a impliqué le remplacement du système de production de chaleur			
Ambition de rénovation	Pas de remplacement	Remplacement	Total
1. Réno non conforme	2		2
2. Dernière étape BBC Rénovation	3	4	7
3. Première étape BBC Rénovation	1	3	4
4. Coup de pouce		6	6
5. BBC Rénovation	4	8	12
Total	10	21	31

On note que de nombreuses rénovations n'ont pas impliqués de changement de système de production de chaleur (au total 10 sur 31). Le remplacement du système est quasi-systématique lors des rénovations « Coup de pouce » et en « première étape BBC rénovation ».

Les différents systèmes de production de chaleur que l'on trouve dans les MI rénovées sont caractérisés dans la table suivante.

Tableau 19: Systèmes de production de chaleur rencontrés dans les MI rénovées PIM I et II

	Intensité carbone	Prix
Bois	Décarboné	Pas cher
PAC air-eau	Décarboné	Cher
Gaz	Carboné	Pas cher

Le bois est une ressource renouvelable, à condition qu'elle soit bien gérée. Le gaz est non renouvelable. La PAC est une énergie particulière : elle produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme (Coefficient de Performance (COP) - énergie produite / énergie consommée - supérieur à 1) car son fonctionnement est basé sur la récupération de chaleur déjà contenu dans un élément (ici l'eau). En ce sens elle est très intéressante. Par contre elle fonctionne à l'électricité qui aujourd'hui est, certes, décarbonée mais qui est aussi produite en grande partie à partir de ressources non-renouvelables (nucléaire) avec un rendement faible (2,88 kWh d'énergie primaire consommée pour 1 kWh d'énergie finale récupérée selon ecoinvent v3.10) et qui génère des déchets dont la gestion est problématique.

La table suivante indique le système de production de chaleur après rénovation pour chaque MI.

Tableau 20 : Nombre de MI par système de production de chaleur après rénovation, par ambition de rénovation

Ambition de rénovation	Système de production de chaleur dans la MI rénovée					
	1. Bois bûches	2. Bois pellets	3. PAC Air Eau	4. Gaz & Bois bûches	5. Gaz	Total
1. Réno non conforme				1	1	2
2. Dernière étape BBC Rénovation			1	4	2	7
3. Première étape BBC Rénovation			3		1	4
4. Coup de pouce			6			6
5. BBC Rénovation	1	1	4		6	12
Total	1	1	14	5	10	31

On note la mise en place d'une PAC quasi-systématiquement lors des rénovations « Coup de pouce » et en « première étape BBC rénovation ».

L'échantillon analysé présente les caractéristiques suivantes : une sur-représentation de la mise en place de PAC Air-Eau dans les rénovations « Coup de pouce » et « première étape de rénovation », peu de système à base de bois en général, une majorité de chaudière gaz dans les rénovations « BBC ». Or, les « rénovations BBC » en général ne sont pas caractérisés par une chaudière gaz, de même que les rénovations « coup de pouce » ne signifient pas systématiquement la mise en place d'une PAC.

Conclusion

L'échantillon analysé présente les caractéristiques suivantes : une sur-représentation de la mise en place de PAC air-eau dans les rénovations « Coup de pouce » et « première étape de rénovation », peu de systèmes à base de bois en général et une majorité de chaudière gaz dans les « rénovations BBC ». Ainsi, **dans l'analyse à suivre, il faudra être prudent dans l'énoncé de conclusions du type « Les rénovations BBC sont ... comparativement aux rénovations coup de pouce » et regarder d'abord si ce n'est pas le système de production de chaleur qui est en cause.**

7.3.4 Caractéristiques du gain en consommation d'énergie finale avant / après rénovation

Pur chaque MI on regarde le gain de consommation en énergie finale et on le qualifie. Le gain est classé en 5 catégories allant de très faible à très fort : un gain « moyen » se situe autour de la valeur moyenne des gains observés, les gains « fort » et « très fort », respectivement « faible » et « très faible », s'éloignent progressivement de la moyenne en suivant des écarts réguliers.

La table suivante présente la valeur du gain pour chaque qualification employée.

Tableau 21: Valeur du gain pour chaque qualification employée

Qualification du gain	Valeur du gain (kWh/m ² SHAB.an)
Très faible	< 63
Faible	63 – 104
Moyen	104 – 188
Fort	188 – 230
Très fort	> 230

On souligne que, en général :

- Un gain très faible correspond à un saut de 1 niveau dans le DPE
- Un gain faible correspond à un saut de 1 ou 2 niveaux dans le DPE
- Un gain moyen correspond à un saut de 2 ou 3 niveaux dans le DPE
- Un gain fort correspond à un saut de 3 niveaux dans le DPE
- Un gain très fort correspond à un saut de 2, 3 ou 4 niveaux dans le DPE (sans que cela puisse s'expliquer)

Tableau 22: Nombre de MI présentant les différents types de gain de consommation en énergie finale après rénovation, par ambition de rénovation

Ambition de rénovation	Type de gain					Total
	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	
1. Réno non conforme	2					2
2. Dernière étape BBC Rénovation	2	4		1		7
3. Première étape BBC Rénovation			1	1	2	4
4. Coup de pouce		1	2	2	1	6
5. BBC Rénovation		4	7		1	12
Total	4	9	10	4	4	31

On note dans ce tableau que les rénovations « Coup de pouce » présentent dans 3 cas sur 6 un gain de consommation fort ou très fort. De la même manière, les rénovations « première étape » incluent dans 3 cas sur 4 un gain de consommation fort ou très fort. Cela s'explique principalement par le fait que les rénovations coup de pouce :

- Partent d'un état initial plus consommateur (classe DPE E voire F), cf. chapitre 7.3.2
- Impliquent la mise en place d'une PAC dont le facteur de conversion énergie consommée / énergie restituée est inférieur à un, cf. chapitre 7.3.3.

On note que d'après le Tableau 20, quatre MI ont été rénovées au niveau « BBC Rénovation » avec une PAC et qu'on ne les retrouve pas dans le Tableau 22 sous la colonne « Fort » ou « Très fort ». Cela s'explique par l'état initial avant rénovation : trois de ces quatre MI étaient étiqueté « D » avant rénovation.

Les deux paramètres listés ci-dessus apparaissent donc autant importants l'un que l'autre pour maximiser le gain de consommation en énergie finale. En outre, ils semblent plus prépondérants que le fait de procéder à une isolation complète de l'enveloppe comme c'est le cas des rénovations « BBC ».

Conclusion

Les gains de consommation en énergie finale observés sont, en moyenne, plus importants pour les rénovations partant d'un état initial étiquette DPE E (plutôt que D) et incluant la mise en place d'une PAC air-eau. Ces deux caractéristiques sont sur-représentées dans l'ambition « coup de pouce » de l'échantillon. Ainsi, dans l'analyse à suivre, il faudra être prudent dans l'énoncé de conclusions du type « Les rénovations BBC sont ... comparativement aux rénovations coup de pouce » et regarder d'abord si ce n'est pas ces deux aspects qui sont en cause.

8. Analyse des résultats

8.1 ACV

8.1.1 Analyse des paramètres clés de l'impact carbone

PCE versus Usage

Le graphe suivant montre, pour chaque MI, l'impact carbone du statu quo versus de la rénovation, avec dans chaque cas, le détail de la contribution Produit de Construction et Equipement (PCE) et Vie en Œuvre (VEO). Les MI sont classées par ambition de rénovation.

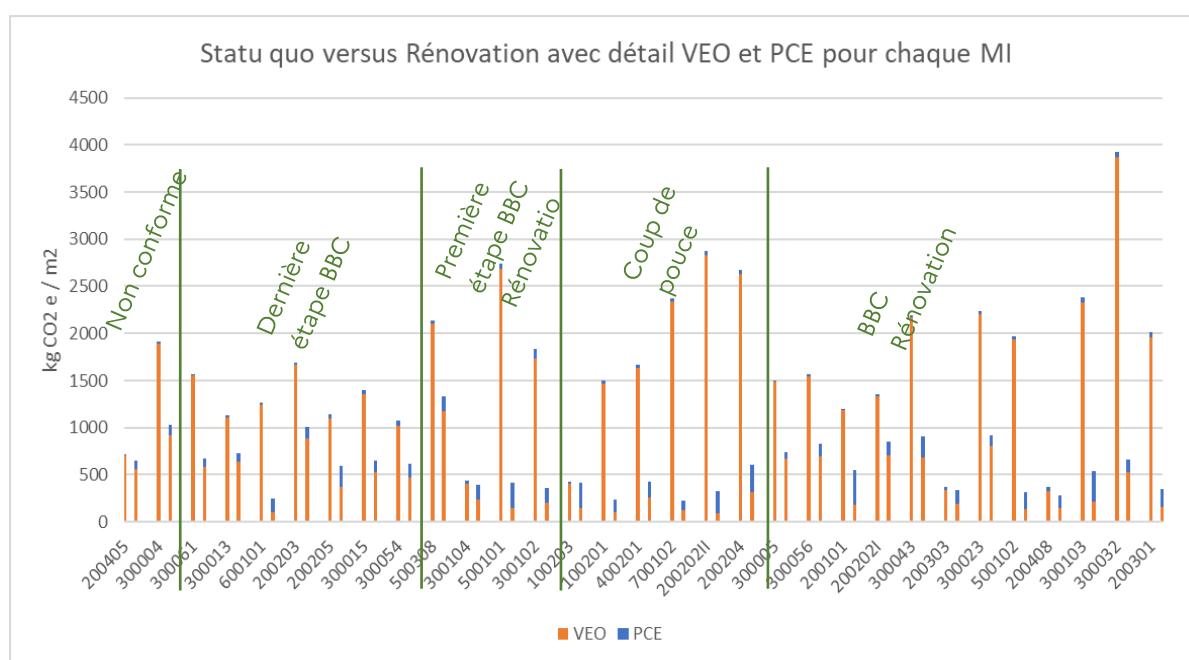


Figure 3: Impact carbone du statu quo versus rénovation pour chaque MI avec détail PCE VEO

On note que la part PCE des scénarios de statu quo est négligeable, ce qui est logique, alors qu'elle est très variable dans les scénarios de rénovation, ce quelle que soit l'ambition de rénovation.

Le tableau suivant présente la part des PCE dans la rénovation pour chaque ambition de rénovation.

Tableau 23: Part des PCE dans la rénovation pour chaque ambition de rénovation

Ambition de rénovation	MIN	MAX	MOY
Non conforme	11%	15%	13%
Dernière étape BBC Rénovation	12%	60%	25%
Première étape BBC Rénovation	12%	64%	40%
Coup de pouce	38%	71%	54%
BBC Rénovation	8%	66%	36%

Il ressort que la part PCE est plus importante en moyenne pour l'ambition « première étape de rénovation » que pour l'ambition « dernière étape de rénovation ». Ensuite, la part PCE des MI rénovées au niveau « BBC Rénovation » est en moyenne de 36% alors que la part PCE des MI « Coup de pouce » est de 54%.

Afin de mieux comprendre ces résultats, nous affichons la part moyenne des trois principaux groupes de PCE au sein de chaque ambition de rénovation.

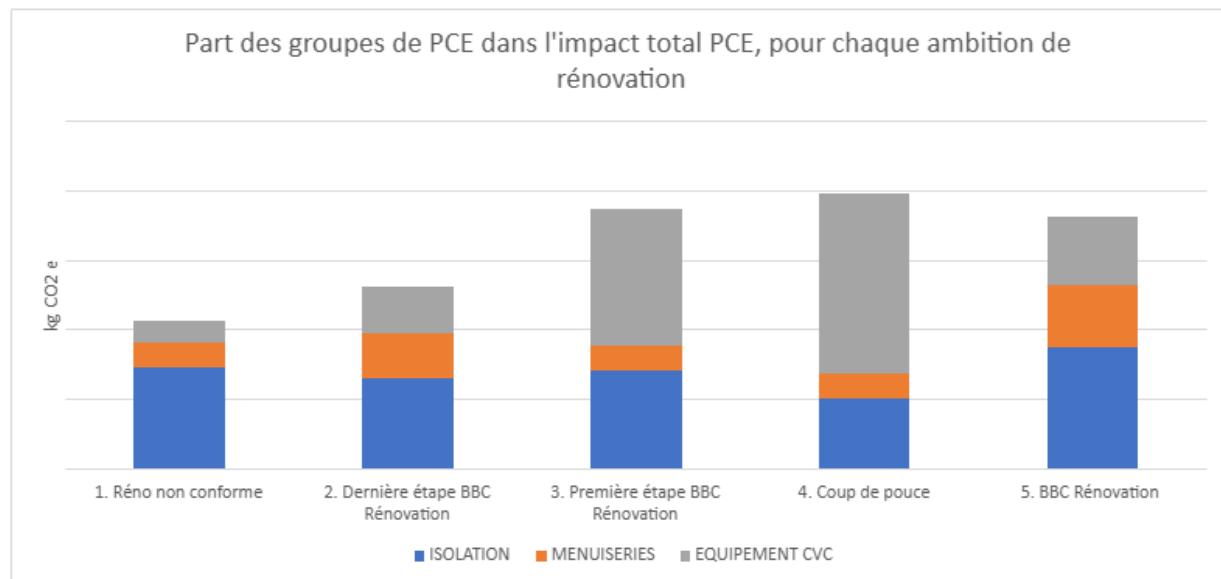


Figure 4: Part moyenne des 3 grands groupes de PCE dans l'impact total PCE, pour chaque ambition de rénovation

La proportion très variable du groupe « Equipement CVC » selon l'ambition de rénovation s'explique par le fait que de nombreuses rénovations n'ont pas impliqués de changement de système de production de chaleur (au total 10 sur 31). Le remplacement du système par une PAC air-eau est quasi-systématique lors des rénovations « Coup de pouce » et en « première étape BBC rénovation » (cf. chapitre 7.3.3 Caractéristiques de la rénovation des équipements CVC). Ces deux ambitions ont l'impact carbone des PCE les plus élevés. Attention, cela ne dit rien sur le bénéfice global des rénovations avec PAC car il faut le mettre en regard des gains à l'usage (voir plus loin).

Par ailleurs, on note que :

- L'isolation représente une part importante des rénovations « non conformes ». Effectivement, les deux projets concernés n'incluent pas de changement de système de production de chaleur et peu de remplacement de menuiseries.
- Les équipements CVC dominent l'impact pour les ambitions « Première étape de rénovation » et « Coup de pouce ». Or, dans les deux cas, il s'agit majoritairement de PAC : ces équipements ont un impact carbone important (relativement à d'autres équipements de production de chaleur). On comprend mieux le résultat observé dans le Tableau 23 pour ces deux ambitions : un investissement carbone important associé à un gain carbone en VEO abouti à une proportion PCE/VEO proche du 50/50.
- Pour les MI en « dernière étape de rénovation » et « BBC Rénovation », les proportions de chaque groupe de PCE Isolation/Menuiseries/ Equipment sont de 50%/25%/25% environ.
- L'impact carbone moyen de la rénovation la plus ambitieuse, c'est à dire "BBC Rénovation", n'est pas le plus élevé. En outre, on mesure grâce à ce graphe que l'impact carbone moyen des PCE des MI "première étape" plus celui des "dernière étape BBC rénovation" est égal à 1,76 fois celui des MI rénové en une seule fois au niveau "BBC rénovation". Bien que ce calcul ne soit pas

rigoureusement pertinent car les "première" et "dernière étape" ne s'additionnent pas nécessairement (il ne s'agit pas des mêmes MI), cela donne tout de même une idée de l'économie d'échelle à réaliser la rénovation en une seule fois.

Enfin, de manière générale, dans la rénovation, l'impact carbone des PCE reste plus faible que celui de la VEO même limitée et (généralement) décarbonée (par l'action de rénovation). Les PCE qui ressortent le plus sont les équipements de production de chaleur, en particulier les PAC, ainsi que les bardages et menuiseries en aluminium.

Conclusion

La part PCE des rénovations est très variable, ce quelle que soit l'ambition de rénovation (8 % à 71 % de l'impact carbone total, toutes ambitions confondues).

Lorsqu'il y a mise en place d'une PAC air-eau, les équipements CVC sont plus visibles et représentent environ 50% de l'impact carbone des PCE. En outre, les rénovations qui comprennent la mise en place d'une PAC ont un impact carbone des PCE plus élevés que les autres. Il est donc important que les industriels mettent tout en œuvre pour éco-concevoir ce type de produit. Attention, cela ne dit rien sur le bénéfice global des rénovations avec PAC car il faut le mettre en regard des gains à l'usage (voir plus loin).

Mis à part les équipements, c'est l'isolation de l'enveloppe (sol, mur, toiture) qui représente la part carbone la plus importante, devant le remplacement des menuiseries.

L'impact carbone moyen de la rénovation la plus ambitieuse, c'est à dire "BBC Rénovation", n'est pas plus élevé que celui des autres ambitions. En outre, il est bien inférieur à l'impact carbone moyen des PCE des MI "première étape" plus celui des "dernière étape BBC rénovation". Bien que ce calcul ne soit pas rigoureusement pertinent car les "première" et "dernière étape" ne s'additionnent pas nécessairement (il ne s'agit pas des mêmes MI), cela donne tout de même une idée de l'économie d'échelle à réaliser la rénovation en une seule fois.

Gap entre statu quo et rénovation

Le graphe suivant présente le gap, c'est-à-dire l'écart, entre l'impact carbone sur le cycle de vie complet – PCE + exploitation sur 30 ans – du statu quo et celui de la rénovation pour l'ensemble des maisons analysées. Les plus petits gaps signifient un bénéfice faible par rapport au statu quo. En particulier, un gap inférieur à zéro signifie que l'impact carbone de la rénovation est plus important que celui de la maison laissée en statu quo. A l'inverse, les plus gros gaps signifient un important bénéfice par rapport au statu quo. On précise que ce résultat ne dit rien sur la performance carbone de la maison rénovée dans l'absolu ou comparativement à un seuil.

Les maisons sont classées par ambition de rénovation.

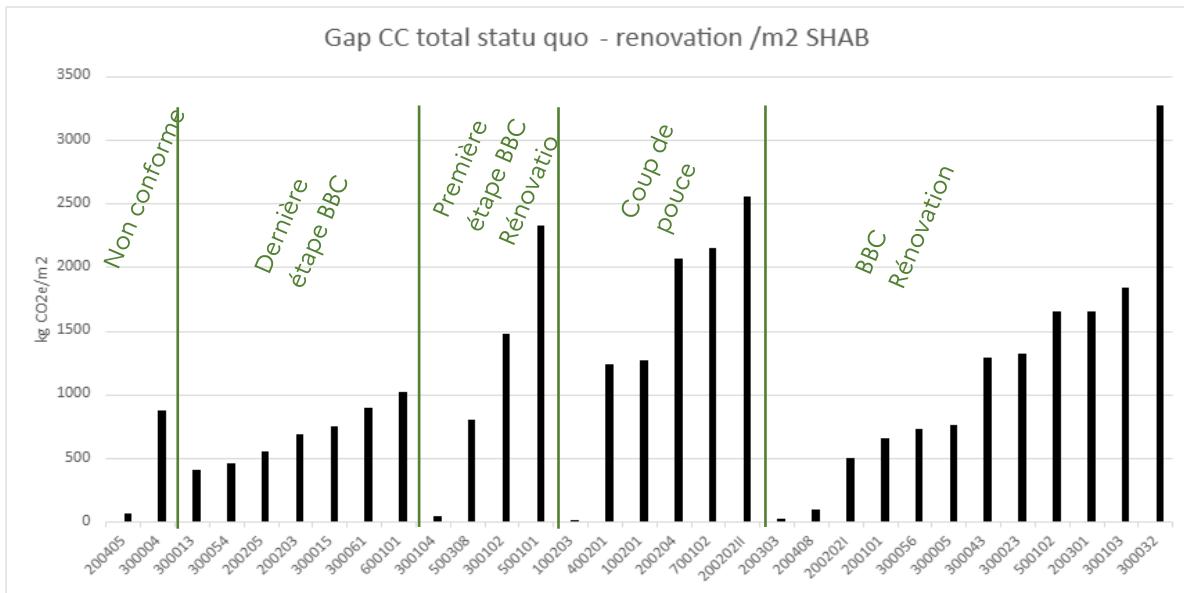


Figure 5: Gap d'impact carbone statu quo versus rénovation

On note tout d'abord que toutes les MI présentent un GAP supérieur à zéro, c'est-à-dire que dans 100% des cas, le carbone émis lors des travaux est compensé sur 30 ans par le gain carbone réalisé en exploitation après rénovation.

Par ailleurs, on observe que les ambitions étiquetées « non conforme » et « dernière étape BBC rénovation » ne présentent pas de projets avec un gap important. Parmi les projets « première étape BBC rénovation », « coup de pouce » et « BBC Rénovation », tous les ordres de grandeurs de gaps sont observés, de 18 à 3265 kg CO2/m2.

La table suivante donne pour information le gap moyen par ambition de rénovation. Le gap moyen le plus important est obtenu pour l'ambition « coup de pouce », suivi de « première étape de rénovation », puis BBC rénovation.

Tableau 24:: Gap de l'empreinte carbone moyen par ambition de rénovation

Ambition	GAP moyen (kg CO2e /m2 SHAB)
Non conforme	471
Dernière étape	678
Première étape	1160
Coup de pouce	1550
BBC Rénovation	1148

Une analyse plus fine des résultats permet de voir que ce gap est intimement lié au vecteur énergétique utilisé avant la rénovation. La figure suivante présente le même graphe que précédemment mais avec des couleurs correspondant au vecteur énergétique avant rénovation :

- Jaune : bois ou électricité (faible impact carbone au kWh)
- Orange : gaz
- Rouge : fioul (fort impact carbone au kWh)

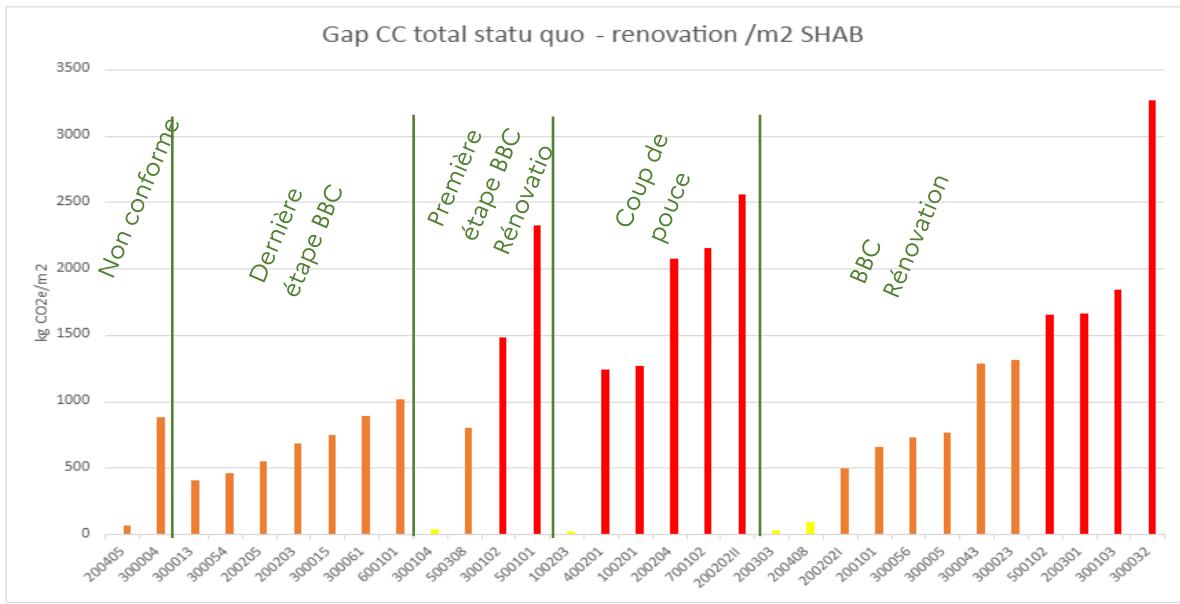


Figure 6: Gap d'impact carbone statu quo vs rénovation avec indications sur le vecteur énergétique du chauffage avant rénovation. Jaune : bois ou électricité ; Orange : gaz ; Rouge : fioul

On note que les projets présentant le plus gros gap sont ceux incluant un chauffage au fioul avant rénovation. A l'inverse, les projets au gap le plus faible sont ceux incluant un chauffage peu carboné avant rénovation : bois ou électricité.

Plusieurs projets n'incluaient pas de changement du système de production de chaleur à l'occasion de la rénovation. La figure suivante présente le même graphe que précédemment mais sur lequel les maisons avec un système de production de chaleur identique dans les deux scénarios statu quo et rénovation ont été entourées en noir.

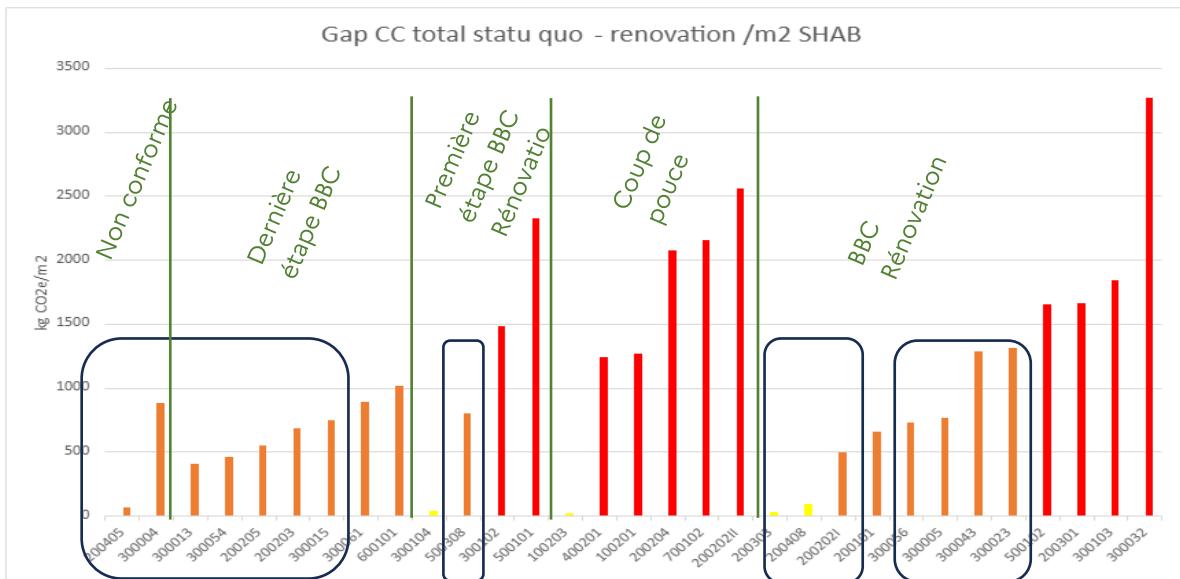


Figure 7: Gap d'impact carbone statu quo vs rénovation avec indications sur le système de chauffage avant rénovation (Jaune : bois ou électricité ; Orange : gaz ; Rouge : fioul) et sur le changement du système de production de chaleur au cours de la rénovation (entouré en noir : pas de changement)

On note que les cas où il n'y a pas de remplacement du système de production de chaleur avant – après rénovation sont ceux avec les gaps le plus faible.

Ainsi, le bénéfice carbone de la rénovation est dépendant du changement d'énergie en phase d'usage : (1) le type d'énergie à savoir passe-t-on d'un vecteur énergétique carboné à un vecteur énergétique décarboné, et (2) la quantité d'énergie en kWh, c'est-à-dire le gain en énergie finale avant/après rénovation.

Dans la table suivante on retrouve le gap d'impact carbone de toutes les MI, classé par ambition de rénovation. Au sein de chaque ambition, les gains sont classés par ordre croissant. Enfin, on affiche les deux paramètres susmentionnés : le type d'énergie et le type de gain.

Tableau 25 : Gap d'impact carbone des MI, classé par ambition de rénovation, avec précision du type d'énergie et du type de gain

Ambition de rénovation	Gap carbone statu quo - rénovation /m ² SHAB	Intensité carbone du système avant → après	Gain de consommation	N°
1. Réno non conforme	6.31E+01 8.78E+02	Carb --> Carb Carb --> Carb	Très faible Très faible	200405 300004
2. Dernière étape BBC Rénovation	4.05E+02 4.58E+02 5.47E+02 6.84E+02 7.47E+02 8.92E+02 1.02E+03	Carb --> Carb Carb --> Carb Decarb --> Carb Carb --> Carb Carb --> Carb Carb --> Carb Carb --> Decarb	Très faible Faible Fort Faible Faible Très faible Faible	300013 300054 200205 200203 300015 300061 600101
3. Première étape BBC Rénovation	4.10E+01 7.96E+02 1.48E+03 2.32E+03	Decarb --> Decarb Carb --> Carb Carb --> Decarb Carb --> Decarb	Très fort Moyen Très fort Fort	300104 500308 300102 500101
4. Coup de pouce	1.81E+01 1.24E+03 1.26E+03 2.07E+03 2.15E+03 2.55E+03	Decarb --> Decarb Carb --> Decarb Carb --> Decarb Carb --> Decarb Carb --> Decarb Carb --> Decarb	Faible Moyen Moyen Fort Fort Très fort	100203 400201 100201 200204 700102 200202II
5. BBC Rénovation	2.52E+01 9.53E+01 4.98E+02 6.53E+02 7.30E+02 7.63E+02 1.29E+03 1.32E+03 1.65E+03 1.66E+03 1.84E+03 3.27E+03	Decarb --> Decarb Decarb --> Decarb Carb --> Carb Carb --> Decarb Carb --> Carb Carb --> Carb Carb --> Carb Carb --> Carb Carb --> Decarb Carb --> Decarb Carb --> Decarb Carb --> Carb	Faible Faible Moyen Moyen Faible Faible Moyen Moyen Moyen Moyen Moyen Très fort	200303 200408 200202I 200101 300056 300005 300043 300023 500102 200301 300103 300032

On peut voir que, au sein de chaque ambition, les plus gros gaps sont d'abord observés pour les MI qui ont opéré un changement de vecteur énergétique d'une énergie carbonée à une énergie décarbonée (en gras). Et, si ce n'est pas le cas le gros gap s'explique par un gain de consommation en énergie finale très fort (en rouge). Le cas exceptionnel de la maison 200101 (en violet) - qui présente un changement vers une énergie décarbonée avec un gain dans la moyenne, sans que le gap soit dans les plus importants – peut s'expliquer par le recours à des PCE à l'impact carbone se situant dans la fourchette haute de notre étude (laine de roche, menuiseries aluminium, PAC et ballon thermodynamique).

On rappelle que, d'après les données présentées au chapitre 7.3.4 Caractéristiques du gain en consommation d'énergie finale avant / après rénovation, le gain en énergie finale est maximisé tout d'abord en s'attaquant aux passoires thermiques en priorité (MI de classe DPE E voire F) et en favorisant la mise en place d'une PAC air-eau à Coefficient de Performance (COP) maximal.

Le gap est lié au Temps de Retour Carbone (TRC). Par la formule suivante, on peut calculer en combien d'années le gain carbone des consommations à l'usage compense l'impact carbone des PCE, c'est-à-dire le TRC.

$$TRC \text{ [années]} = \frac{\text{GAP PCE [kg CO}_2\text{e]}}{\text{GAP Vie en oeuvre [kg CO}_2\text{e]}/\text{PER [années]}}$$

Tableau 26: Temps de retour carbone des projets

Temps de retour carbone (TRC)	Part de l'échantillon
<=5 ans	74%
5 < TRC <=10 ans	10%
10 < TRC < 25 ans	10%
25 <= TRC < 30 ans	6%

On note que 74% de l'échantillon a un TRC inférieur ou égal à 5 ans. Le TRC est d'autant plus faible que le GAP total présenté dans les Figure 5, Figure 6 et Figure 7 est élevé. Plus exactement, toutes les MI au gap supérieur à 500 kg CO₂e environ ont un TRC inférieur ou égal à 5 ans. On note que cette part de l'échantillon inclut tous types d'ambition, de système de chauffage avant ou après rénovation, de gain. Il est donc difficile de dire le ou les paramètres à optimiser pour obtenir un TRC inférieur ou égal à 5 ans. On peut juste dire que les paramètres clés identifiés ci-dessus pour maximiser le GAP sont donc ceux à optimiser pour réduire le TRC.

Par contre, une analyse des 16% de l'échantillon au TRC supérieur à 10 ans permet de constater que ce sont les maisons qui étaient sur un système de production de chaleur décarboné et qui y restent, ou qui étaient qualifiées de « non conforme ».

Conclusion

Pour l'ensemble de l'échantillon, le carbone émis lors des travaux est compensé sur 30 ans par le gain carbone réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour carbone est toujours inférieur à 30 ans pour l'ensemble des MI analysées. Pour 74% de l'échantillon le TRC est inférieur ou égal à 5 ans.

Les économies de carbone les plus importantes sont réalisées lors du passage d'une énergie carbonée et une énergie décarbonée tel que le bois ou l'électricité. Le second paramètre clé pour maximiser les économies de carbone et donc minimiser le TRC est de viser le plus gros gain possible en énergie finale, notamment en s'attaquant aux passoires thermiques en priorité (MI de DPE E voire F) et en favorisant la mise en place d'une PAC air-eau à COP maximal.

Les projets au TRC > 10 ans sont ceux qui étaient sur un système de production de chaleur décarboné et qui y restent, ou qui étaient qualifiées de « non conforme ».

Enfin, on précise que des corrélations entre le gap carbone et les autres paramètres des MI tels que les suivants ont été recherchées sans résultats probants :

- La surface habitable
- L'année de construction
- La zone climatique
- L'altitude
- Le système constructif

Pour exemple on affiche ci-dessous le gap d'impact carbone en fonction de la SHAB et de l'année de construction : aucune corrélation n'apparaît.

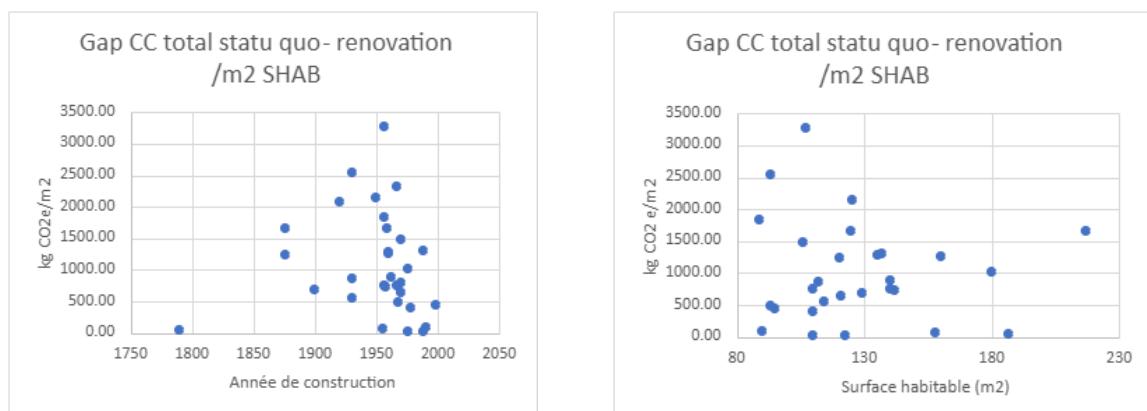


Figure 8 : Recherche de corrélation entre le GAP d'impact carbone des MI et l'année de construction ou la surface habitable

Conclusion

Le gap carbone avant / après rénovation ne semble pas corrélé à la surface habitable, l'année de construction, la zone climatique, l'altitude ou encore le système constructif.

Performance carbone de la maison rénovée

Pour finir, on regarde ici la performance carbone de la MI rénové, indépendamment de son état initial. Pour cela, on compare l'impact carbone du cycle de vie de la MI rénovée (PCE + VEO) avec un seuil calculé sur la base de la méthode en base du label BBCA Rénovation, dont le référentiel est disponible sur le site web de l'association. Le seuil est estimé à partir du sous-seuil de l'exploitation ramené à 30 ans d'usage auquel on ajoute les sous-seuils des lots :

- 05: Cloisonnement - Doublage - Plafonds suspendus - Menuiseries intérieures
- 06 : Façades et menuiseries extérieures
- 08 : CVC (chauffage, ventilation, refroidissement, eau chaude sanitaire)

Faute de mieux, la typologie « Bâtiment à usage collectif » est considérée.

On obtient un seuil à 910 kg CO₂e émis par m² SHAB de MI rénovée. Au-dessus de ce seuil, la MI ne pourrait pas espérer atteindre le label BBC Rénovation (s'il était applicable pour cette typologie). Pour information ce seuil est à peine plus bas que le seuil nommé « Carbone 2 » lors de l'expérimentation E+C- portant sur les bâtiments neufs qui a précédé la mise en place de la RE2020.

La figure suite présentent l'impact carbone des MI toujours classées par ambition de rénovation, vis-à-vis de ce seuil.

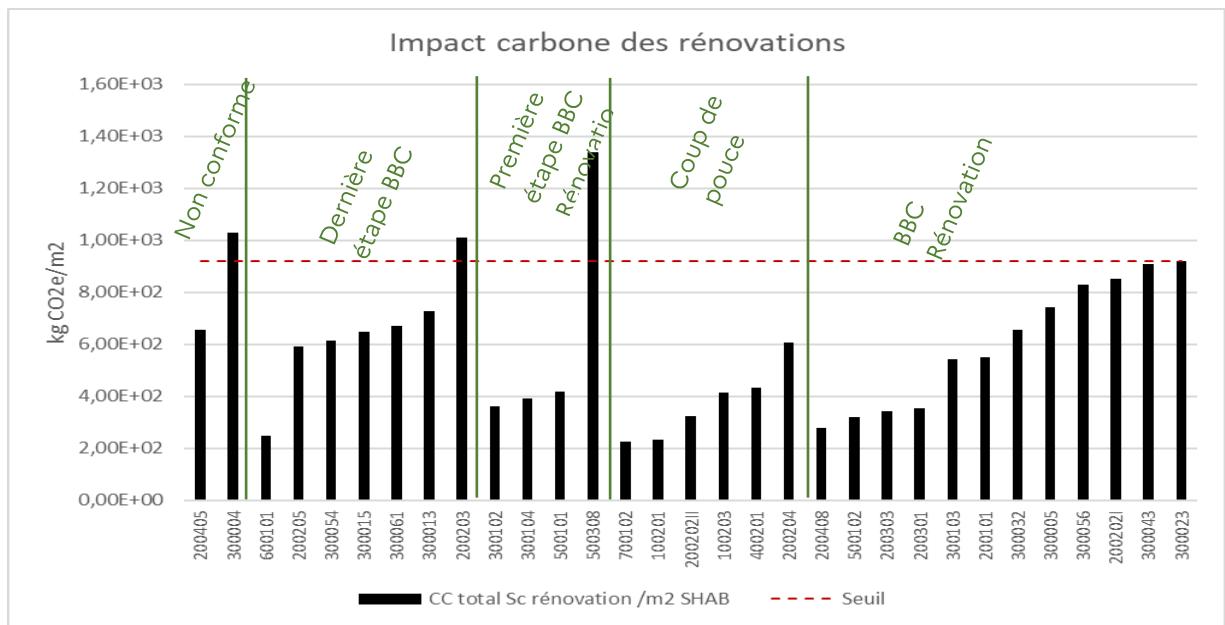


Figure 9 : Impact carbone des rénovations classées par ambition, comparativement à un seuil

On note que 3 MI se situent au-dessus du seuil établi : une MI "non conforme", une autre en "dernière étape de rénovation" et une autre en « première étape de rénovation ». Dans ces trois projets de rénovation il n'y a pas de remplacement du système de production de chaleur avant – après rénovation : il s'agit de MI chauffées au gaz et qui restent au gaz lors après rénovation.

On présente maintenant l'impact carbone des rénovations en classant les MI par vecteur énergétique après rénovation.

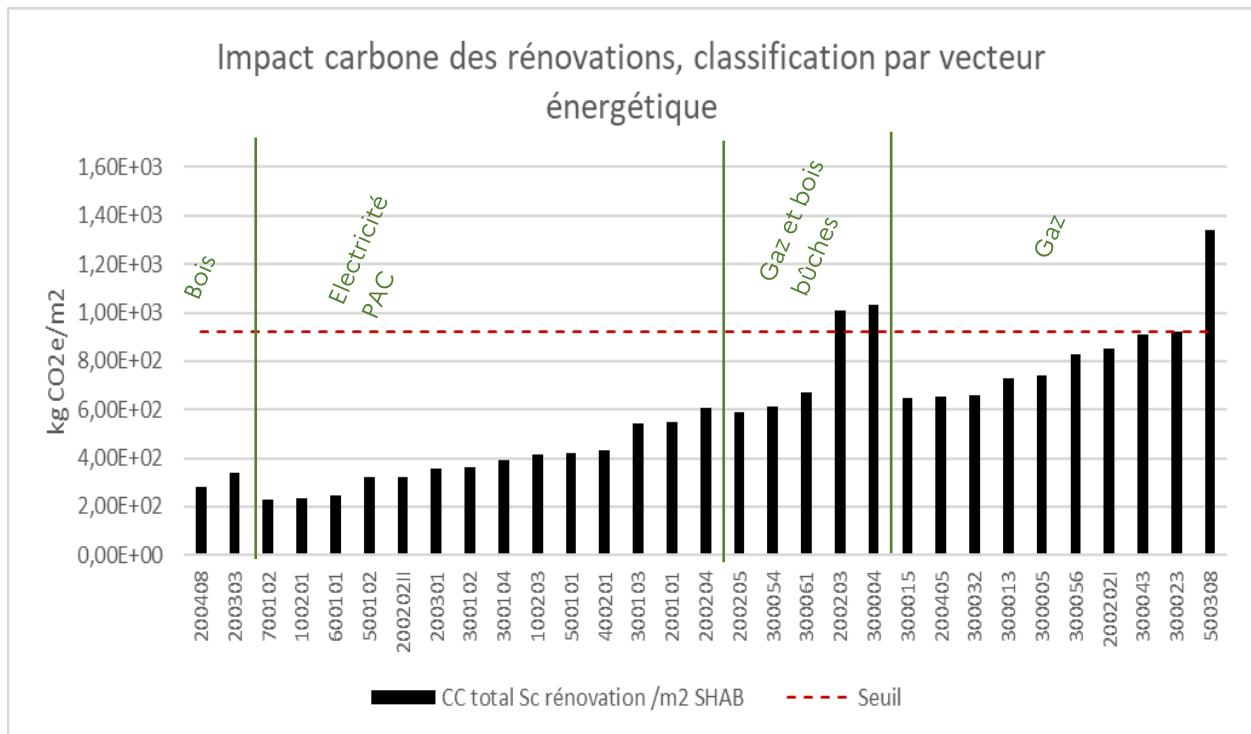


Figure 10 : Impact carbone des rénovations classées par vecteur énergétique après rénovation, comparativement à un seuil

On note ainsi une corrélation directe entre le vecteur énergétique choisi à l'occasion de la rénovation et la performance carbone de la maison rénovée : avec le choix d'une énergie décarbonée (bois, électricité), l'impact carbone de la MI rénové sur 30 ans est inférieur ou égal à 600 kg CO₂e/m² SHAB. Plus exactement, les MI rénovés avec du chauffage bois sont celles qui émettent le moins de GES leur cycle de vie. A l'inverse, toutes les rénovations ayant conservées le gaz comme vecteur énergétique ont une performance carbone supérieure ou égale à 600 kg CO₂e/m² SHAB.

Conclusion

En termes de performance carbone sur 30 ans, toutes les MI rénovées en « Coup de pouce » et « BBC rénovation » se situent sous le seuil de 910 kg CO₂e/m² SHAB (nb : seuil établi sur la base de la méthode en base du label BBCA Rénovation).

Il existe une corrélation directe entre le vecteur énergétique choisi à l'occasion de la rénovation et la performance carbone de la maison rénovée : avec le choix d'une énergie décarbonée (bois, électricité), l'impact carbone de la MI rénové sur 30 ans est inférieur ou égal à 600 kg CO₂e/m² SHAB. Plus exactement, les MI rénovés avec du chauffage bois sont celles qui émettent le moins de GES leur cycle de vie. A l'inverse, toutes les rénovations ayant conservées le gaz comme vecteur énergétique ont une performance carbone supérieure ou égale à 600 kg CO₂e/m² SHAB.

8.1.2 Analyse de sensibilité : mix électriques considérés pour les consommations en VEO

Mix électrique différencié par usage

L'étude de base considère un mix moyen pour l'ensemble des usages de l'électricité ayant lieu dans les maisons individuelles étudiées tiré de la base ecoinvent 3.10. Cette approche est en cohérence avec les recommandations de l'ADEME lorsqu'il est question de réaliser un bilan GES selon la documentation associée aux données de mix électrique présentée sur la base EMPREINTE (« Nous rappelons que pour la réalisation d'un Bilan GES, le contenu moyen doit être utilisé et non les contenus par usage qui ne peuvent être utilisés à titre « indicatif », en information complémentaire de l'estimation via le contenu moyen du réseau. »¹⁶).

Néanmoins, il existe aujourd'hui un consensus sur le fait que les différents usages de l'électricité n'impliquent pas la mobilisation des mêmes modes de production, de par leurs caractéristiques (dynamiques notamment, en lien par exemple avec la saisonnalité et les conditions climatiques, mais aussi avec contraintes techniques de consommation et de production de l'électricité). Ainsi, dans le cadre de l'usage résidentiel de l'électricité, plusieurs méthodes fournissent des émissions de CO₂eq par kWh d'électricité consommée selon des usages différenciés (chauffage, ECS, climatisation, éclairage et Autres Usages de l'Electricité (AEU) notamment).

Nous nous proposons ici d'analyser l'influence de ces mix différenciés sur notre étude. Aucune méthodologie ne faisant aujourd'hui consensus, nous intégrons dans cette analyse de sensibilité quatre approches :

- Celle considérée pour les calculs d'émissions de gaz à effet de serre pour un bâtiment sur son cycle de vie complet dans la RE2020, issue de la base EMPREINTE (mix par usage)
- La méthode saisonnalisée par usage tel qu'implémentée dans la base EMPREINTE, pour l'année 2016
- La méthode saisonnalisée par usage tel qu'implémentée dans la base EMPREINTE, pour l'année 2023

¹⁶ https://base-empreinte.ademe.fr/documentation/base-carbone?docLink=Electricite_reglementaire

- Une méthode marginale, développée par (Roux 2016). Celle-ci cherche à tenir compte de l'impact d'une consommation additionnelle d'électricité soumise au réseau électrique français. On notera que cette approche n'est appliquée ici que pour les consommations de chauffage, les autres usages de l'électricité étant considérés dans ce cas comme relevant du mix moyen issu de ecoinvent 3.10

Les facteurs de caractérisation associés aux différents usages de l'électricité sont résumés dans la table ci-dessous.

Tableau 27 : Emissions de GES selon le scénario pour les différents usages de l'électricité considérés

Vecteurs \ Approches	Mix moyen ecoinvent 3.10 (kg CO2eq/kWh)	Mix par usage RE2020 (kg CO2eq/kWh)	Base empreinte saisonnalisée année 2016 (kg CO2eq/kWh)	Base empreinte saisonnalisée année 2023 (kg CO2eq/kWh)	Mix marginal [Roux, 2016] (kg CO2eq/kWh)
Electricité chauffage principal et d'appoint dans scénarios de rénovation	8,95E-02	7,90E-02	1,57E-01	1,15E-01	6,05E-01
Electricité ECS dans scénarios de rénovation	8,95E-02	6,50E-02	5,03E-02	5,43E-02	8,95E-02
Electricité éclairage/AUE dans scénarios de rénovation	8,95E-02	6,90E-02	8,87E-02	6,68E-02	8,95E-02
Electricité chauffage principal dans scénarios de statu quo	8,95E-02	7,90E-02	1,57E-01	1,15E-01	6,05E-01
Electricité chauffage d'appoint, ECS et éclairage / AUE dans scénarios de statu quo	8,95E-02	6,90E-02	8,87E-02	6,68E-02	8,95E-02

On constate ici une certaine proximité entre l'approche mix moyen et celle retenue dans le cadre de la RE2020. En effet on note une relative faible disparité entre les valeurs d'émissions de GES selon les usages dans l'approche RE2020. En revanche, les approches saisonnalisée et marginales montrent elles des écarts pouvant atteindre un ordre de grandeur entre les usages de chauffage de l'électricité et les autres usages résidentiels.

Par ailleurs, on note que si la granulométrie des données collectées après rénovation a permis de différencier finement les différents usages de l'électricité, ce n'est pas le cas pour les données collectées (factures) avant rénovation qui ont servies à construire le scénario statu quo. Les consommations d'électricité dans le scénario statu quo sont considérées comme des consommations pour AUE, sauf s'il est clair que le chauffage principal est alimenté à l'électricité (convecteurs). Cette approche est conservative : elle tend à défavoriser le scénario d'intérêt.

L'influence de ces variations sur les résultats de notre étude est montrée dans le graphe suivant, portant sur le gap sur l'indicateur changement climatique entre statu quo et rénovation.

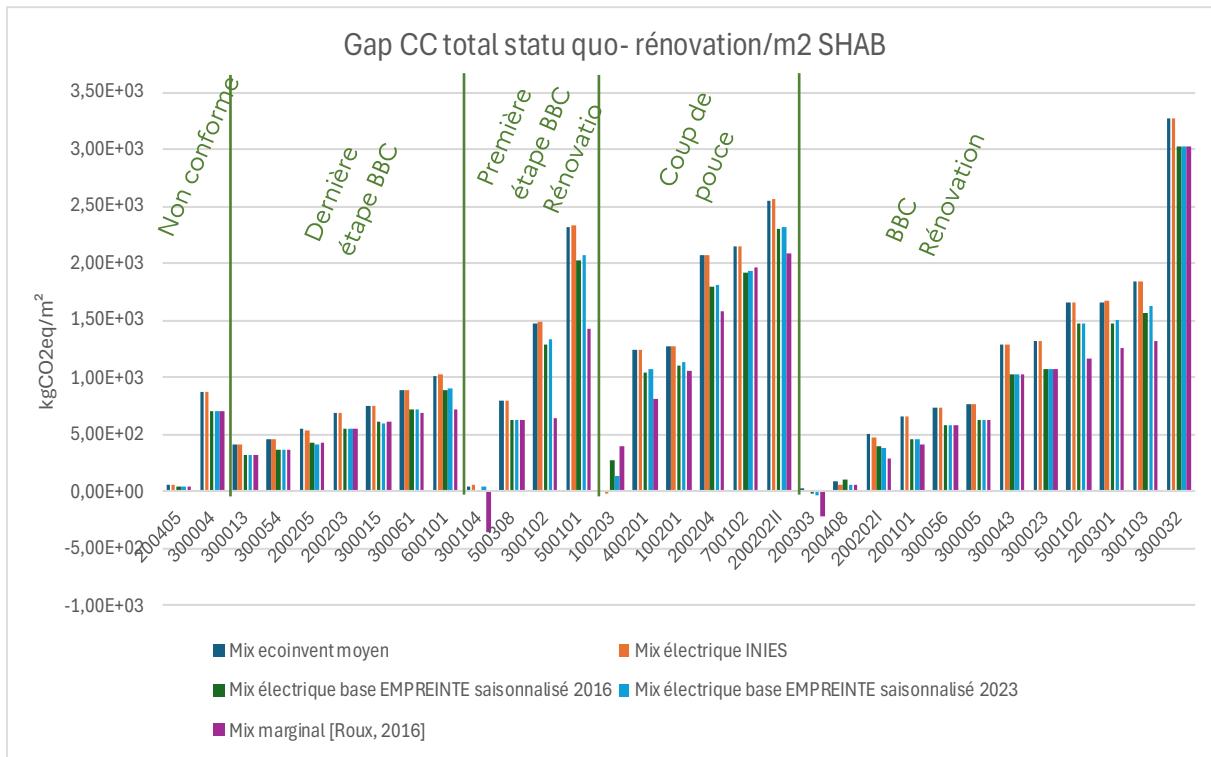


Figure 11 : Comparaison du gap d'impact carbone entre statu quo et rénovation selon le mix électrique considéré

On constate que les variations de gap entre l'approche moyenne et celle retenue dans le cadre de la RE2020 sont minimes. L'écart entre rénovation et statu quo est globalement légèrement supérieur dans le cas de la méthode RE2020. On constate par ailleurs une réduction du gap dans les approches saisonnalisées et marginales. Cette réduction est directement liée à l'impact plus élevé de la consommation d'électricité pour le chauffage pour ces méthodes. Pour comprendre cela il faut se rappeler que la plupart des MI font apparaître une consommation d'électricité après rénovation sur laquelle il a été possible d'appliquer les mix par usage, saisonnalisées et marginaux (contrairement à la consommation d'électricité avant rénovation).

Ainsi, si l'impact de l'électricité est plus faible (approche RE2020), le gap (après-avant rénovation) augmente ; s'il est plus élevé (approche saisonnalisée et marginale), le gap diminue.

On constate par ailleurs que deux MI présentent un gap qui devient négatif dans le cas de l'approche marginale :

- La rénovation de la MI 300104 a impliqué le changement du mode de production de chaleur de poêle à bois à PAC. Ainsi dans les émissions liées à 1 kWh de chauffage passent dans le cas de l'approche marginale de 3,00E-02 kg CO₂ eq / kWh de bois à 6,05E-01 kgCO₂eq / kWh d'électricité.
- Concernant la MI 200303, il n'y a pas de changement de système de production de chaleur : bois pellets en principal + électricité en appoint. Cette MI est pénalisée du fait qu'il n'a pas été possible d'appliquer le mix marginal aux consommations d'électricité du chauffage d'appoint dans le scénario statu quo.

Globalement, cette analyse de sensibilité apporte peu d'enseignements dans la mesure où elle est biaisée du fait que la granulométrie de la collecte ne permet pas d'appliquer des facteurs d'émissions différencié par usage, saisonnalisé ou marginaux au scénario statu quo.

On note tout de même une certaine sensibilité (jusqu'à 20% selon les scénarios) au mode de prise en compte de l'électricité selon les usages et il apparaît que considérer un poids carbone moyen de l'électricité a tendance à majorer le gap entre statu quo et rénovation. A l'inverse, considérer un poids carbone saisonnalisé permet de relativiser le bénéfice de passer ou rester à un chauffage consommant de l'électricité après rénovation. En outre, dans le cas où la rénovation implique le passage d'un chauffage au bois à l'électricité via une PAC, le bilan carbone de la rénovation peut être supérieur à celui du statu quo (i.e. gap négatif).

Conclusion

Le facteur d'émissions de GES de l'électricité est très variable selon les usages et saisons (écart observable x10) et c'est un paramètre sensible dans les études ACV de bâtiment impliquant un changement de vecteur énergétique pour le chauffage, dont l'électricité, distinct selon dans différents usages, distincts selon les scénarios étudiés.

A titre d'exemple, lorsque les mix marginaux sont considérés, le passage d'un chauffage au bois avant rénovation à l'électricité via une PAC air-eau après rénovation peut mener à un bilan carbone de la rénovation supérieur à celui du statu quo (gap négatif) ; alors qu'il apparaît positif lorsque l'on considère le mix électrique moyen (qui a un facteur d'émission plus faible).

Evolution du mix électrique dans le temps

L'approche retenue en base pour notre étude considère un mix électrique stable et constant sur les 30 ans d'analyse considérés. Cette approche, commune en ACV, permet d'adopter une approche à priori conservatrice, en considérant que l'état actuel du mix électrique constitue, notamment en ce qui concerne les contributions au réchauffement climatique, la configuration la plus impactante pouvant être rencontrée à l'avenir. L'hypothèse sous-jacente à cet aspect conservatif est que le mix de production électrique français, et les mix de production électriques de façon globale suivront à l'avenir une tendance de décarbonation, afin de répondre aux enjeux liés au changement climatique.

Cette tendance à la décarbonation n'est pas nécessairement applicable aux autres vecteurs énergétiques, ou en tous cas dans une moindre mesure. Ainsi si dans le cas de l'électricité la façon dont celle-ci est produite et les vecteurs énergétiques mobilisés peuvent être modifiés, la contribution au changement climatique du gaz naturel, du fioul, des pellets et du bois est-elle principalement liée à la nature même de ces vecteurs, ce qui ne laisse que peu de perspectives de modification de l'impact GWP associé (limité à l'introduction de gaz d'origine biogénique dans le cas du gaz naturel ou à l'optimisation/modification des process de production et transport).

Nous cherchons donc ici à analyser la sensibilité de notre étude à l'impact associé au mix électrique, et à l'évolution de celui-ci sur 30 ans. Nous exploitons ici les scénarios TRANSITION(S) 2050 développés par l'ADEME, qui visent à atteindre la neutralité carbone en France en 2050 (« Prospective - Transitions 2050 - Rapport » 2021).

Ils reposent sur des visions diverses en termes d'orientations économiques, techniques et de choix de société, volontairement contrastées. Les données macroéconomiques, démographiques et les perspectives d'évolution climatique (+2,1°C en 2100) restent constantes quel que soit les scénarios.

L'exercice se décline en 4 scénarios, dont la description est reprise du site de l'ADEME¹⁷ :

- S1 : Génération frugale. La transition est conduite principalement par la contrainte et par la sobriété. De nouvelles attentes des consommateurs, mais surtout de nouvelles pratiques, s'expriment rapidement dans les modes de consommation. La croissance de la demande énergétique qui épouse

¹⁷ <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/les-scenarios/>

les ressources s'interrompt grâce à des innovations comportementales, organisationnelles autant que technologiques.

- S2 : Coopérations territoriales. Pour atteindre la neutralité carbone, la société mise sur une évolution progressive mais à un rythme soutenu du système économique vers une voie durable alliant sobriété et efficacité. La consommation de biens devient mesurée et responsable, le partage se généralise. L'évolution des valeurs de la société permet des investissements massifs dans les solutions d'efficacité et d'énergies renouvelables.
- S3 : Technologies vertes. Le développement technologique permet de répondre aux défis environnementaux. Les métropoles se développent. Les technologies et le numérique, qui permettent l'efficacité énergétique, sont dans tous les secteurs. Les meilleures technologies sont déployées largement et accessibles de manière généralisée aux populations solvables. Les manières d'habiter, de se déplacer ou de travailler se rapprochent beaucoup de celles d'aujourd'hui mais gagnent en sobriété.
- S4 : Pari réparateur. Les enjeux écologiques globaux sont perçus comme des contreparties du progrès économique et technologique : la société place sa confiance dans la capacité à gérer, voire à réparer, les systèmes sociaux et écologiques avec plus de ressources matérielles et financières pour conserver un monde vivable. Les modes de vie du début du XXI^e siècle sont sauvegardés. Mais le foisonnement de biens consomme beaucoup d'énergie et de matières avec des impacts potentiellement forts sur l'environnement.

L'exploitation de ces scénarios repose sur celle des données publiées par l'ADEME¹⁸, concernant :

- Le volume de production électrique pour chacun des scénarios, aux échéances 2015, 2030 et 2050
- Les émissions de CO₂eq pour chacun des scénarios, pour l'ensemble de la production d'électricité, aux échéances 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, 2050, 2055 et 2060

Sur cette base, et en procédant à des interpolations linéaires de ces données, une donnée moyenne d'émissions de CO₂eq/kWh sur la période 2030/2050 est calculée, est considérée dans le cadre de cette analyse de sensibilité pour chacun des scénarios, en comparaison avec notre approche base. On notera que le scénario S3 est décomposé en deux variantes, l'une orientée nucléaire (construction de 6 nouvelles centrales nucléaires EPR2) et l'autre reposant sur l'éolien offshore.

L'impact carbone associé au kWh électrique correspond à la moyenne des émissions sur 30 ans entre 2020 et 2050, ce pour chaque scénario. Ils sont indiqués dans la table suivante.

Tableau 28 : Emissions de GES considérées pour l'électricité selon les scénarios

Scénario	Base ecoinvent 3.10 (kg CO ₂ eq)	S1 (kg CO ₂ eq)	S2 (kg CO ₂ eq)	S3EnR- offshore (kg CO ₂ eq)	S3Nuc (kg CO ₂ eq)	S4 (kg CO ₂ eq)
Electricité (1 kWh)	8,95E-02	7,15E-03	6,79E-03	1,14E-02	1,12E-02	1,88E-02

S'agissant de scénarios dit de « décarbonation », on observe en toute logique que les facteurs d'émissions sont tous supérieurs au facteur moyen considéré en base.

La comparaison des approches est présentée dans la figure suivante :

¹⁸ <https://data.ademe.fr/>

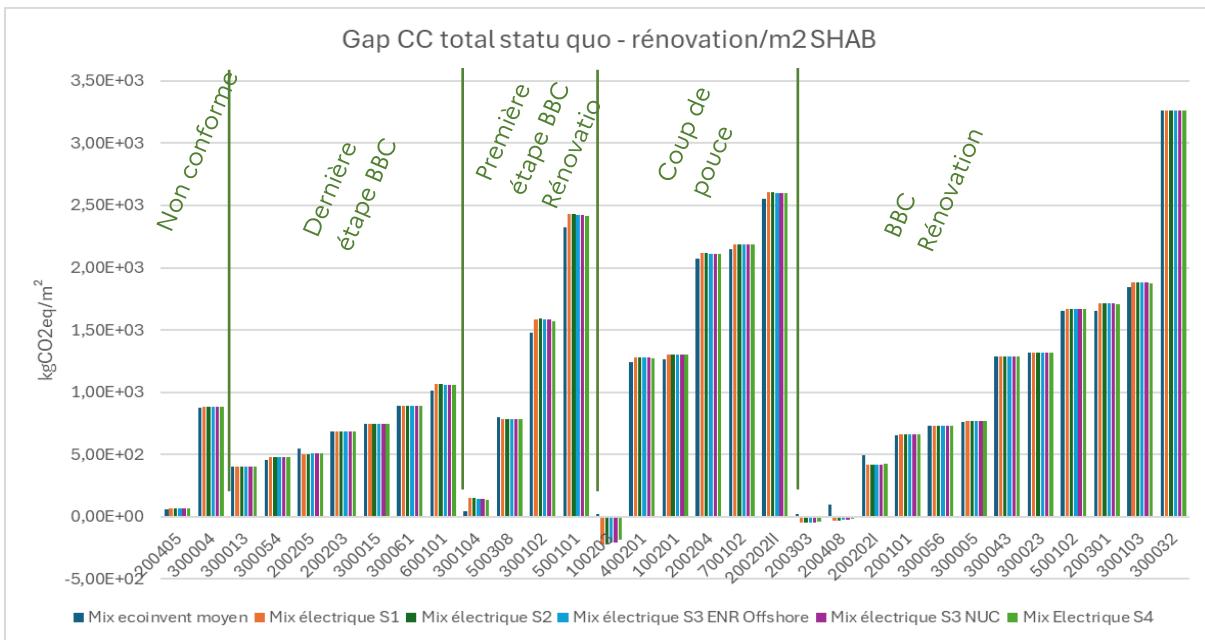


Figure 12 : Comparaison du gap d'impact carbone entre statu quo et rénovation, selon le scénario d'évolution du mix considéré

On constate ainsi que dans la majorité des cas, les mix prospectifs renforcent le bénéfice de la rénovation, en augmentant la valeur du gap entre statu quo et rénovation. Ceci s'applique aux MI surtout aux MI ayant changés de vecteur vers l'électricité. L'électricité ayant moins d'impacts, l'impact du scénario de rénovation est moins élevé, et l'écart avec la situation avant rénovation est donc plus important.

On observe néanmoins quelques cas de figure où le gap est réduit voire négatif c'est-à-dire que la tendance entre statu quo et rénovation s'inverse. Il s'agit :

- De la MI 100203. Ici, la rénovation implique le passage d'une chaudière électrique à une PAC. Dans ce cas de figure, dans le cas de mix prospectifs décarbonés le gain de performance lié à la rénovation ne compense pas l'impact associé à la rénovation en tant que tel.
- Des MI 200303 et 200408. Ici, l'inversion de tendance peut être ignoré car ces deux MI ont rajouté des convecteurs électriques lors de la rénovation pour augmenter la SHAB. Or, cette consommation additionnelle aurait dû être distincte et enlevée, ce qui n'a pas été techniquement possible.

Conclusion

L'évolution de facteur d'émissions de GES de l'électricité selon différents scénarios prospectifs de décarbonation de l'électricité est un paramètre sensible dans les études ACV de bâtiment impliquant changement de vecteur énergétique pour le chauffage, dont l'électricité, distinct selon les scénarios étudiés.

A titre d'exemple, lorsque les mix prospectifs encore plus décarbonés sont considérés, le passage d'une chaudière électrique avant rénovation à une PAC air-eau après rénovation peut mener à un bilan carbone de la rénovation supérieur à celui du statu quo (gap négatif) car le gain de performance lié à la rénovation ne compense pas l'impact associé à l'action de rénover ; alors qu'il apparaît positif lorsque l'on considère le mix électrique moyen d'aujourd'hui (qui a un facteur d'émission plus élevé).

8.1.3 Analyses de sensibilité : utilisation de données individuelles

Une analyse de sensibilité a porté sur le type de données utilisées pour la comparaison entre scénario de rénovation et statu quo. Ainsi, en base l'étude utilise des données collectives ou des DED, généralement construite sur la base de plusieurs données archivées ou sur une modélisation spécifique « moyenne ». En effet, l'objectif de ce projet n'est pas d'estimer l'influence du choix d'un matériau spécifique fourni par un producteur spécifique, mais de comparer un scénario de rénovation à un scénario de statu quo selon les typologies de rénovation menées.

Néanmoins une analyse de sensibilité a ici été menée sur la base de l'utilisation de données individuelles (lorsque disponibles) pour l'ensemble des contributeurs considérés. Cette analyse de sensibilité a pour objectif de mettre cette étude en perspective de la pratique actuelle de l'ACV bâtiment dans le secteur opérationnel, et de l'enjeu de la disponibilité des données individuelles.

Le choix des données individuelle a reposé dans un premier temps sur les caractéristiques attendues des matériaux ou systèmes (résistance thermique, U_w , puissance, ...). Une fois les données disponibles correspondant à ces caractéristiques identifiées, une donnée a été sélectionnée de façon aléatoire. On retiendra donc ici que le choix n'a pas porté sur la donnée la moins impactante disponible, et n'obéit pas véritablement à la logique qui tend à prévaloir dans le cadre des calculs et choix menés dans le cadre de la RE2020.

La comparaison des gaps entre rénovation et statu quo pour l'ensemble des maisons considérées, selon que des données collectives/des DED ou des données individuelles sont utilisées, et présentée dans le graphique suivant.

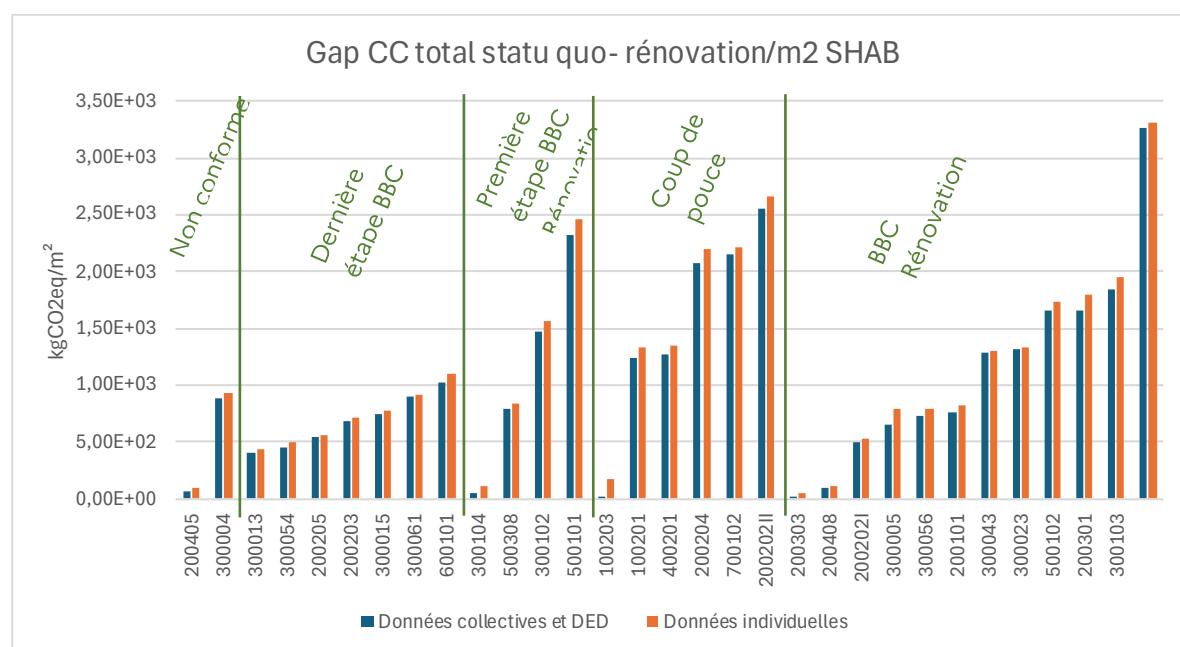


Figure 13 : Comparaison du gap d'impact carbone entre statu quo et rénovation, selon le type de données INIES utilisé pour les PCE

On constate ainsi que les tendances restent cohérentes quelle que soit le choix de type de données considéré. Pour l'ensemble des maisons, le gap entre statu quo et rénovation est toujours revue à la hausse avec les données individuelles et la variation est en moyenne de 13%, plus exactement inférieure à 20% sauf pour les 4 MI au gap le plus faible en base pour lesquelles l'écart peut atteindre + 90% (MI 100203). Ce résultat est lié à un poids important des PCE dans l'impact de la rénovation.

Conclusions

L'utilisation de DED corrigées et de FDES collectives, plutôt que de FDES individuelles, a tendance à réduire le gap entre rénovation et statu quo de 13% en moyenne (i.e. la rénovation apparaît comme encore plus performante).

Ce choix de données est estimé pertinent pour l'étude PIM car cela a permis d'être plus efficace dans la modélisation sans que les enseignements de l'étude ne soient modifiés.

8.1.4 Analyse complémentaire sur l'impact en EPNR totale

L'ACV étant par principe une approche multicritères, reposant sur plusieurs indicateurs et catégories d'impact, il apparaît pertinent de comparer les scénarios rénovation et statu quo sur d'autres types d'indicateurs.

La structuration de notre base de données, et la coexistence dans celles-ci de données conformes aux deux versions de la norme NF EN 15804 (+A1 et +A2) limite néanmoins ces possibilités. Ainsi, il n'était pas possible, vu la disponibilité des données sur INIES, de mener une étude complète reposant uniquement sur des données cohérentes d'un point de vue normatif. La base INIES était encore en effet, à l'aboutissement du projet PIM II, encore en phase de transition. Cet état de fait réduit significativement les autres indicateurs pouvant être calculés dans le cadre de notre étude, le nombre d'indicateurs communs aux deux versions de la norme étant assez restreint.

Nous avons choisi ici de mener cette étude de sensibilité sur l'indicateur de consommation d'Energie Primaire Non Renouvelable (EPNR) Totale, rendant compte dans un indicateur agrégé de la consommation de l'ensemble des consommations de ressources énergétiques épuisables (tant pour la production d'énergie qu'en tant que matière première). La figure suivante présente les gaps entre scénario statu quo et rénovation pour l'indicateur EPNR. Les MI sont classées par ambition de rénovation.

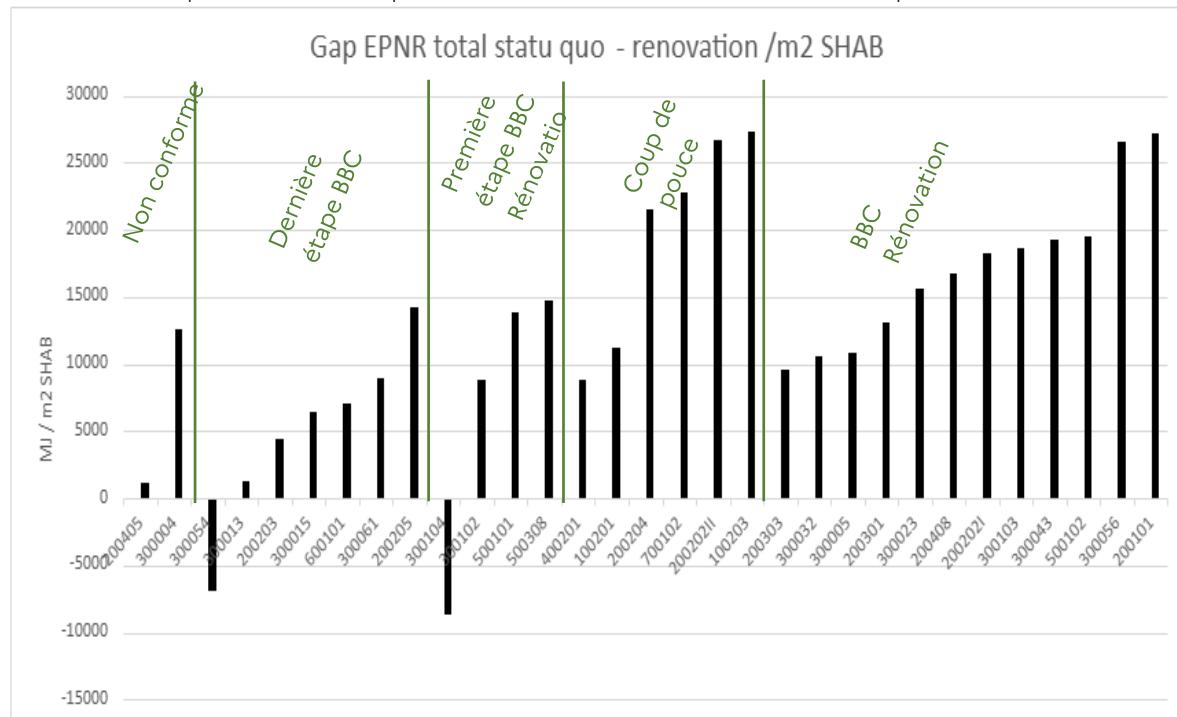


Figure 14: Gap d'EPNR statu quo vs rénovation

On note tout d'abord que toutes les MI sauf deux présentent un gap supérieur à zéro, c'est-à-dire que dans 94% des cas, l'énergie primaire non renouvelable consommée lors des travaux est compensé sur 30 ans par le gain réalisé en exploitation après rénovation.

Par ailleurs, on observe que les MI aux ambitions étiquetées « coup de pouce » et « BBC Rénovation » présentent toutes des gaps positifs importants. Les gaps négatifs sont observés pour une MI à l'ambition « dernière étape de rénovation » et une MI à l'ambition « première étape de rénovation ».

La table suivante donne pour information le gap moyen par ambition de rénovation. Le gap moyen le plus important est obtenu pour l'ambition « coup de pouce », suivi de « BBC rénovation » puis de « première étape de rénovation ».

Tableau 29 : Gap d'EPNR moyen par ambition de rénovation

Ambition	GAP moyen (MJ primaire /m ² SHAB)
Non conforme	6902
Dernière étape	5061
Première étape	7153
Coup de pouce	19762
BBC Rénovation	17160

Afin de mieux comprendre ces résultats, on affiche ici la classification des vecteurs énergétiques selon leur impact carbone d'une part, et leur consommation en énergie primaire non renouvelable d'autre part.

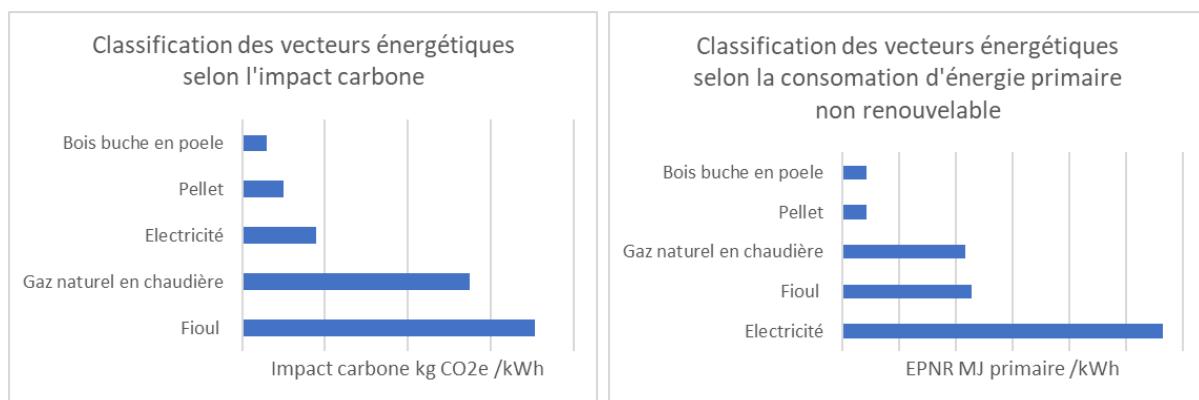


Figure 15 : Classification des vecteurs énergétiques selon leur impact carbone (à gauche) et leur consommation d'EPNR (à droite)

Le tableau suivant donne les valeurs numériques des impacts de ces vecteurs pour information.

Tableau 30 : Impacts associés au différents vecteurs énergétiques pour le GWP et l'EPNR

	GWP ecoinvent 3.10 (kgCO2eq)	EPNR ecoinvent 3.10 (MJ)
Gaz naturel en chaudière	2,75E-01	4,34E+00
Electricité	8,95E-02	1,13E+01
Fioul	3,53E-01	4,57E+00
Pellet	4,99E-02	8,70E-01
Bois buche en poèle	3,00E-02	8,70E-01

On constate ainsi que là où l'électricité apparaît comme moins carbonée que les vecteurs d'origine fossile (gaz naturel et fioul) et est caractérisée par un facteur d'émission du même ordre de grandeur que les vecteurs d'origine biogénique (pellet, bois) dans le cas de l'indicateur de réchauffement climatique, elle devient plus contributrices que l'ensemble des autres vecteurs et montre un écart de deux ordres de grandeur avec les vecteurs d'origine biogénique dans le cas de l'indicateur EPNR. Cela illustre le faible rendement de l'électricité énergie finale sur énergie primaire non renouvelable évoqué au chapitre 7.3.3.

Cet aspect constitue une explication pour l'inversion de tendance entre statu quo et rénovation pour les deux maisons présentant un gap négatif pour l'EPNR (300054 et 300104). Plus précisément, la maison 300054 montre, après rénovation, une consommation de gaz bien plus faible mais une consommation d'électricité plus élevée que dans le scénario statu quo. La rénovation de la maison 300104 quant à elle implique le remplacement d'une chaudière bois (conservée dans le statu quo) par une PAC, et donc une modification de vecteur énergétique utilisé pour le chauffage, qui se répercute dans la comparaison des deux scénarios sur l'indicateur EPNR.

Un autre cas intéressant est la MI 100203, ambition « coup de pouce » : cette MI présente le gap le plus faible selon l'impact carbone (cf. Figure 5: Gap d'impact carbone statu quo versus rénovation) alors qu'elle présente le gap le plus élevé de sa catégorie (et même de tout l'échantillon) sur l'énergie primaire non renouvelable. Dans cette rénovation, on passe d'une chaudière électrique à une PAC air-eau dans une MI de classe DPE E avant travaux.

Enfin, on regrette l'absence de MI pour lesquelles la rénovation aurait consisté en un passage du fioul, gaz ou chaudière électrique au bois. Cela nous aurait permis de constater l'ampleur du gap sur cette indicateur et de le mettre en face du gap observé pour les MI ayant installées une PAC air-eau. On constate que ces MI présentent aussi un gap en énergie primaire non renouvelable important, ce malgré le fort impact de l'électricité qui est largement compensé par le COP important de ce type de PAC.

En conclusion, cette analyse montre que l'indicateur EPNR est particulièrement sensible aux consommations d'électricité, et peut mener à un bilan en défaveur du scénario rénovation lorsqu'il implique le vecteur électrique pour le chauffage, selon les caractéristiques et performances de la rénovation mais aussi l'état initial de la maison et le vecteur initial utilisé pour le chauffage.

Conclusion

Pour 94% de l'échantillon, l'énergie primaire non renouvelable consommée pour les travaux est compensée sur 30 ans par le gain en énergie primaire non renouvelable réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour en énergie primaire non renouvelable est presque toujours inférieur à 30 ans pour l'ensemble des MI analysées.

La performance en énergie primaire non renouvelable est moins importante pour les MI rénovées consommant beaucoup d'électricité. Cela n'est pas préjudiciable néanmoins sur les MI ayant installées une PAC air-eau car la consommation en électricité reste faible après rénovation grâce au COP élevé de ce type de PAC.

8.2 ACG

8.2.1 Analyse des paramètres clés du coût global

PCE versus Usage

Le graphe suivant montre, pour chaque MI, le coût global de la rénovation vision propriétaire vs rénovation vision sociétale vs statu quo, avec dans chaque cas, le détail de la contribution travaux, usage et valeur verte. Les MI sont classées par ambition de rénovation.

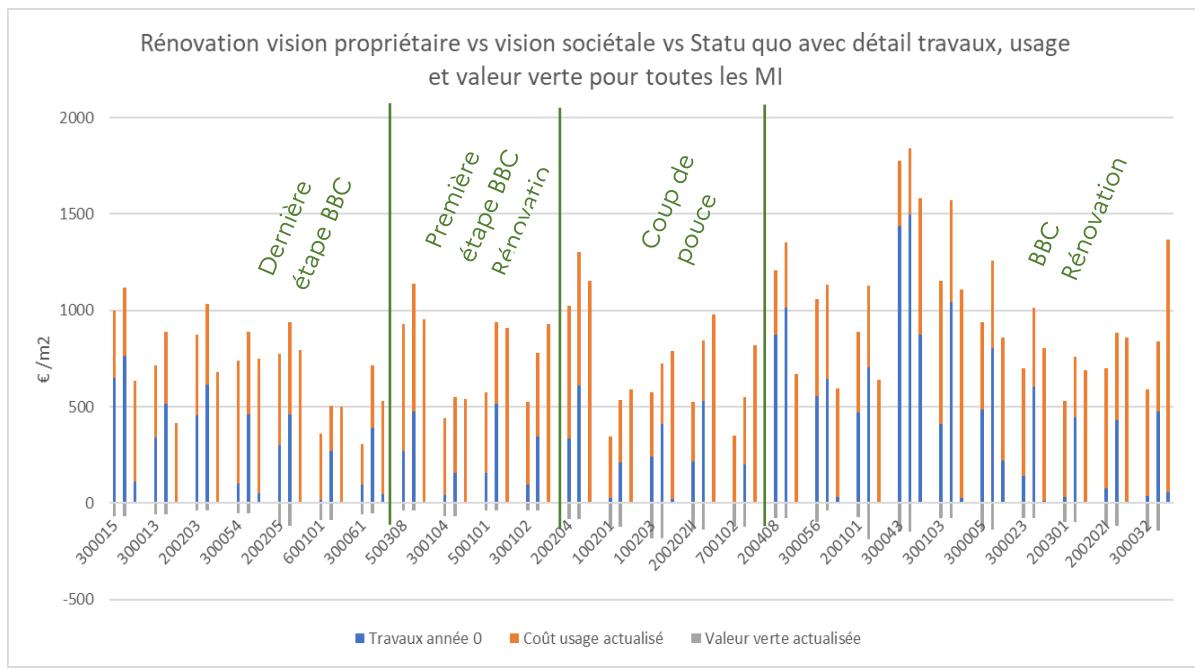


Figure 16: Coût global de la rénovation vision propriété vs vision sociétale vs Statu quo pour chaque MI avec détail travaux, usage et valeur verte

On note que la part travaux des scénarios de statu quo est négligeable, ce qui est logique, alors qu'elle est très variable dans les scénarios de rénovation, ce quelle que soit l'ambition de rénovation. Au sein des scénarios de rénovation, la part des travaux est toujours plus importante dans la vision sociétale que dans la vision propriété, ce qui est conforme aux attentes. En effet, dans la vision propriété, ce que l'on voit sous « travaux année 0 » c'est le montant des travaux moins les aides (apport et prêt) reçues à l'année 0.

Les tableaux suivants présentent la part des travaux à l'année 0 dans le coût global, ce pour chaque ambition de rénovation, selon les deux visions propriété et sociétale.

Tableau 31: Part des travaux dans la rénovation vision propriété pour chaque ambition de rénovation

Ambition de rénovation	MIN	MAX	MOY
Dernière étape BBC Rénovation	5%	65%	36%
Première étape BBC Rénovation	10%	29%	21%
Coup de pouce	1%	42%	25%
BBC Rénovation	6%	81%	39%

Tableau 32: Part des travaux dans la rénovation vision sociétale pour chaque ambition de rénovation

Ambition de rénovation	MIN	MAX	MOY
Dernière étape BBC Rénovation	49%	68%	56%
Première étape BBC Rénovation	28%	55%	42%
Coup de pouce	36%	63%	48%

BBC Rénovation

48%

81%

63%

La variabilité de la part des travaux (i.e. différence entre le minimum et le maximum) est plus grande dans la vision propriétaire que dans la vision sociétale. Cela reflète la disparité entre l'ampleur des aides que les propriétaires peuvent obtenir : plus elles sont importantes, plus la part des travaux réduit dans le coût global. La moyenne de la part des travaux dans le coût global de la rénovation dans la vision propriétaire est de 33%.

Afin de mieux comprendre la part des travaux dans le coût global de la rénovation, analysons la vision sociétale, qui ignore les aides reçues. On note dans le Tableau 32 que la part des travaux correspond à peu près à 50% du coût global. Elle est plus importante pour l'ambition BBC Rénovation que pour l'ambition Coup de pouce, ce qui est conforme aux attentes. Elle est aussi plus importante pour la dernière étape de rénovation que pour la première. Afin de mieux comprendre cela et les différences entre première et dernière étape de rénovation, nous affichons la part moyenne de chaque lot de travaux au sein de chaque ambition de rénovation.

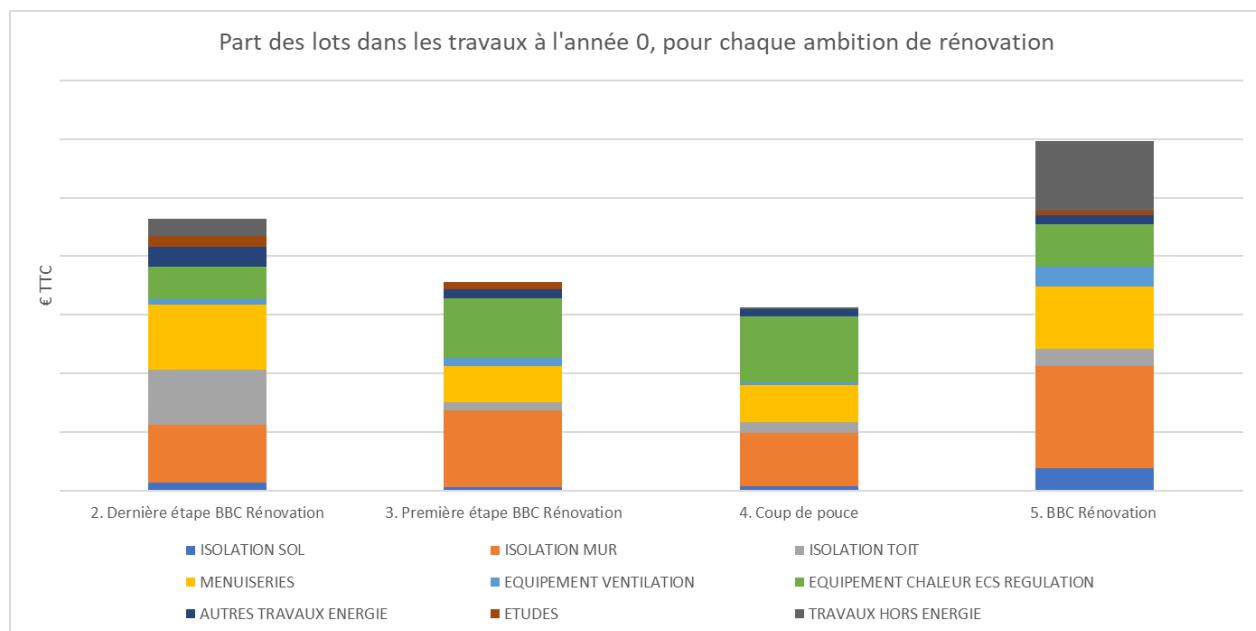


Figure 17: Part moyenne de chaque lot dans les travaux à l'année 0, pour chaque ambition de rénovation

On note que :

- Quelle que soit l'ambition de rénovation, les lots 'isolation mur', 'menuiseries' et 'équipement chaleur ECS régulation' sont les plus onéreux
- Le lot 'isolation toit' prend une importance notable uniquement pour les maisons en 'dernière étape de rénovation' (20%). Le tableau suivant montre les types de rénovation de toiture rencontrés dans chaque cas. On peut observer que la mise en place d'une isolation type sarking, qui est effectivement plus onéreuse que combles perdus et sous-rampants, est sur-représentée dans la catégorie « dernière étape BBC Rénovation ».

Tableau 33 : Types de rénovation de toiture rencontrés dans les projets de rénovation

Ambition de rénovation	Isolation toiture	Nombre de MI
Dernière étape BBC Rénovation	Combles perdus	2
	Sarking	3

	Sous rampants	2
Première étape BBC Rénovation	Combles perdus	4
Coup de pouce	Combles perdus	3
	Sous rampants	2
BBC Rénovation	Combles perdus	4
	Combles perdus & sous rampants	1
	Sarking	1
	Sous rampants	4
Total général		26

- On observe que les lots 'isolation mur' et 'équipement ventilation' sont légèrement plus élevés pour l'ambition BBC rénovation, ce qui s'explique par une légère sur-représentation des ITE et ventilation double flux sur cette ambition.
- Le lot 'équipement chaleur ECS régulation' est plus important pour les maisons en « première étape de rénovation » et « coup de pouce » que pour les autres. Effectivement, ces MI incluent la mise en place d'une PAC qui sont des équipements chers relativement aux autres équipements de production de chaleur. On note que la présente analyse est similaire à celle réalisée sur l'impact carbone des PCE, c'est-à-dire que les PAC ressortent comme un équipement particulièrement carboné et onéreux. Cela étant, le coût moyen des travaux à l'année zéro de ces MI en « première étape de rénovation » et « coup de pouce » est plus faible que celui des autres ambitions, ce car les autres lots sont relativement plus faibles.
- Le lot 'travaux hors énergie' prend une importance notable uniquement pour les maisons 'BBC rénovation' (20%). Ces projets plus ambitieux sont apparemment l'occasion de conduire des travaux hors rénovation énergétique. **Cela étant il est aussi possible que les propriétaires concernés aient été plus studieux dans le remplissage des données que ceux des autres rénovations moins ambitieuses.** On rappelle que ce lot est considéré car on souhaite observer sa contribution dans le coût global vision propriétaire. Mais ce lot est bien présent dans tous les scénarios – yc le statu quo quand bien même cela ne correspond pas à la philosophie du scénario – de manière à ne pas créer de distorsion : le périmètre différenciant est bien celui de la rénovation énergétique.
- Le coût des travaux à l'année 0 de la rénovation la plus ambitieuse, c'est à dire "BBC Rénovation", est le plus élevé. Cela étant dit, on mesure grâce à ce graphe que l'impact carbone moyen des travaux à l'année 0 des MI "première étape" + "dernière étape BBC rénovation" est égal à 1,38 fois celui des MI rénové en une seule fois au niveau "BBC rénovation". Bien que ce calcul ne soit pas rigoureusement pertinent car les "première" et "dernière étape" ne s'additionnent pas nécessairement (il ne s'agit pas des mêmes MI), cela donne tout de même une idée de l'économie d'échelle à réaliser la rénovation en une seule fois.

Conclusion

La part des travaux de rénovation¹⁹ (i.e. à l'année 0) dans le coût global (i.e. incluant en plus 30 ans d'exploitation) perçu par le propriétaire est très variable, ce quelle que soit l'ambition de rénovation : 33% en moyenne avec des valeurs allant de 5 % à 81 %, toutes ambitions confondues. Dans la vision sociétale la part des travaux correspond à peu près à 50% du coût global.

Lorsqu'il y a mise en place d'une PAC air-eau, les équipements CVC sont plus visibles représentent 30 à 40% du coût des travaux à l'année 0 (exclusion des aides). Attention, cela ne dit rien sur le bénéfice global des rénovations avec PAC car il faut le mettre en regard des gains à l'usage (voir plus loin).

Mis à part les équipements, c'est l'isolation des murs et le remplacement des menuiseries qui représentent le coût le plus important plus important, devant les équipements de ventilation et l'isolation du sol et du

¹⁹ Les rénovations sont avant tout énergétiques mais sont inclus dans le périmètre les coûts induits, ceux des études et ceux des travaux hors énergie engagés à l'occasion de la rénovation énergétique.

toit. Il existe une exception cependant à ce dernier point où, en cas d'isolation sarking, l'isolation de la toiture peut être aussi importante que l'isolation des murs ou que le remplacement des menuiseries. Le coût moyen des travaux de la rénovation la plus ambitieuse, c'est à dire "BBC Rénovation", est plus élevé que celui des autres ambitions. Il reste cependant bien inférieur au coût moyen des travaux des MI "première étape" plus celui des "dernière étape BBC rénovation". Bien que ce calcul ne soit pas rigoureusement pertinent car les "première" et "dernière étape" ne s'additionnent pas nécessairement (il ne s'agit pas des mêmes MI), cela donne tout de même une idée de l'économie d'échelle à réaliser la rénovation en une seule fois.

Gap entre statu quo et rénovation

Le graphe suivant présente le gap, c'est-à-dire l'écart, entre le coût global – travaux année 0 + usage sur 30 ans + valeur verte – du statu quo et celui de la rénovation vision propriétaire pour l'ensemble des maisons analysées. Les plus petits gaps signifient un bénéfice faible par rapport au statu quo. En particulier, un gap inférieur à zéro signifie que le coût global de la rénovation est plus important que celui de la maison laissée en statu quo, même en prenant en compte les réductions de consommation et la valeur verte. A l'inverse, les plus gros gaps signifient un important bénéfice par rapport au statu quo. On précise que ce résultat ne dit rien sur le coût global de la maison rénovée dans l'absolu ou comparativement à un seuil.

Les maisons sont classées par ambition de rénovation.

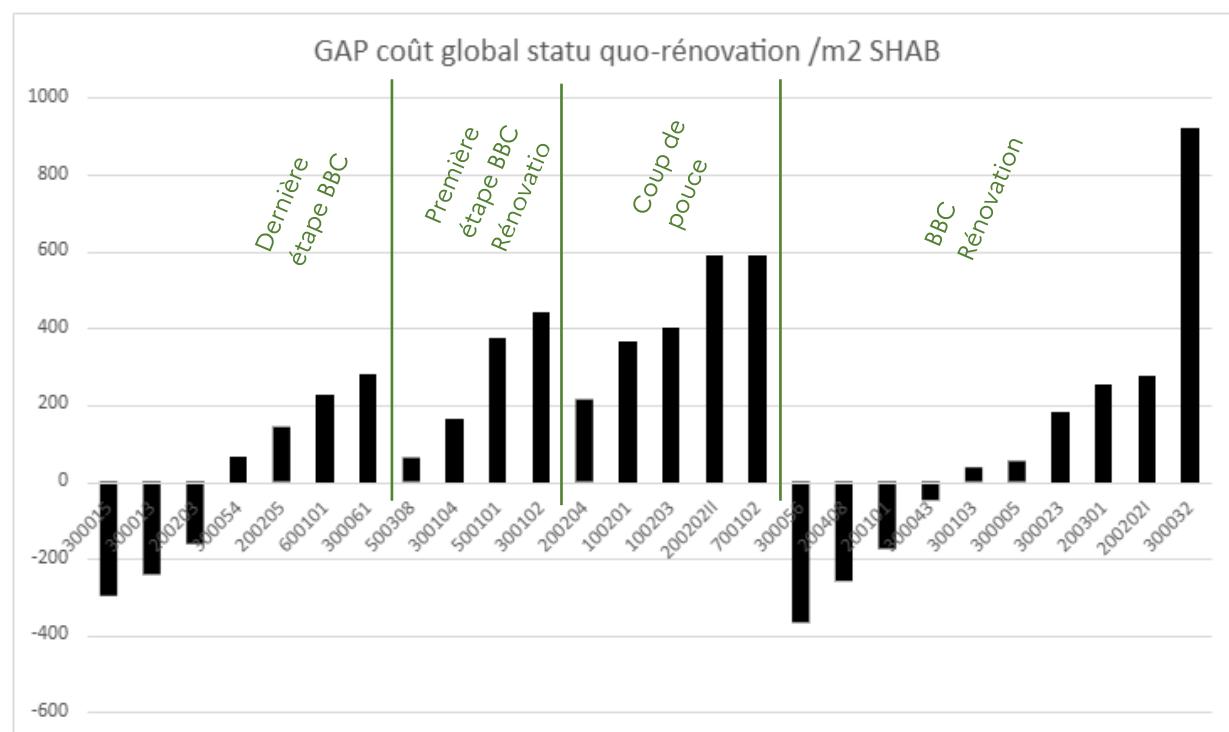


Figure 18: Gap de coût global statu quo versus rénovation (vision propriétaire)

On note les MI en « première étape BBC rénovation » et « coup de pouce » présentent toutes un gap supérieur à zéro alors que les MI en « dernière étape BBC rénovation » et « BBC rénovation » présentent tous types de valeurs de GAP. Plus exactement, 19 MI sur 26 présentent un GAP supérieur à zéro, c'est-à-dire que dans 73% des cas, le coût des travaux est compensé sur 30 ans par l'économie réalisée en exploitation après rénovation.

Une analyse plus fine des résultats permet de voir que ce gap est intimement lié au montant des travaux à l'année zéro. La figure suivante présente le même graphe que précédemment mais avec le code couleur suivant :

- Argenté : le montant des travaux est inférieur à la moyenne du montant des travaux observés pour l'ensemble des MI PIM II
- Doré : le montant des travaux est supérieur à la moyenne du montant des travaux observés pour l'ensemble des MI PIM II. Parmi ceux-là, les MI pour lesquelles la part des travaux représente plus de 50% du coût global total sont entourés en noir.

On parle à chaque fois ici du montant des travaux auquel on a soustrait les aides car le gap présenté est celui entre le statu quo et le scénario rénovation dans la vision propriétaire. Il ne s'agit donc pas du montant des travaux réels.

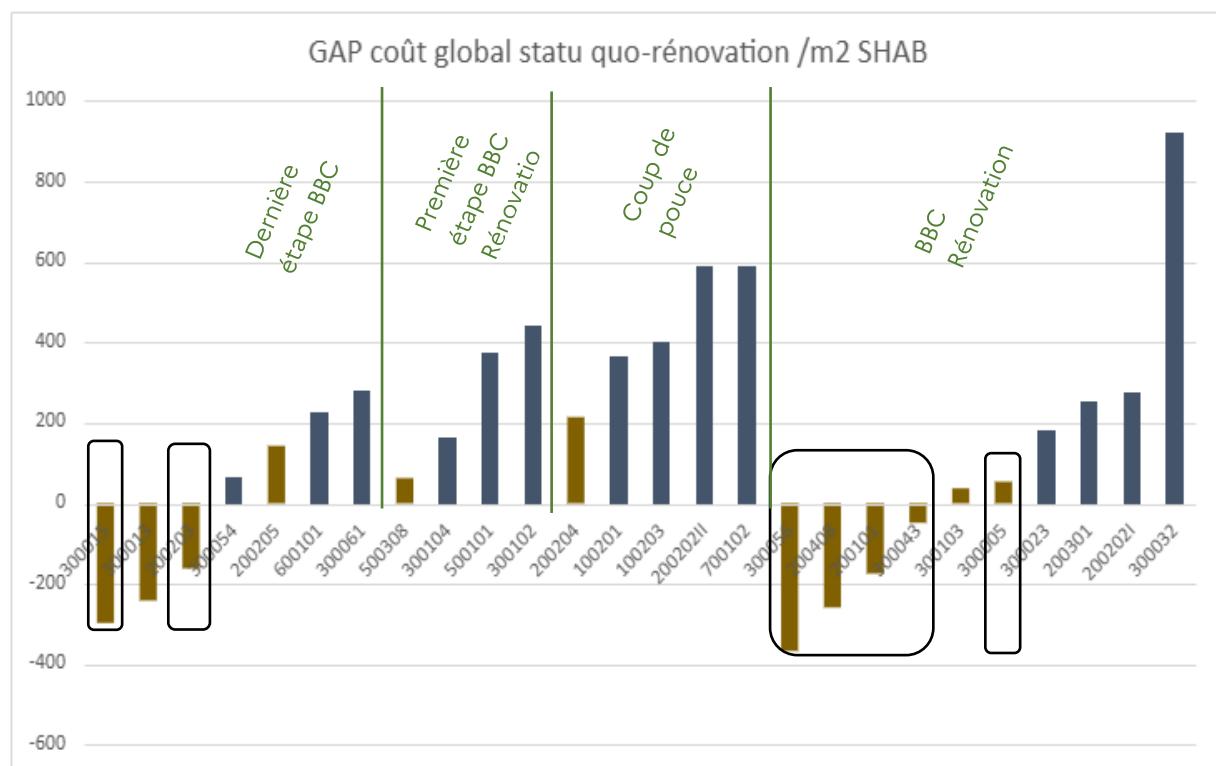


Figure 19: Gap de coût global statu quo versus rénovation (vision propriétaire) avec indications sur le montant des travaux à l'année zéro. Argenté : inférieur à la moyenne ; Doré : supérieur à la moyenne. MI entourées en noir : la part des travaux à l'année zéro représente plus de 50% du coût global

On note que tous les projets à gap négatif sont en doré, c'est à dire qu'elles ont un montant de travaux à l'année zéro supérieur à la moyenne de l'ensemble des projets PIM II. Aussi, sauf une exception (MI 300013), toutes les MI à gap négatif ont une part de travaux qui représente plus de la moitié du coût global. **A noter que le projet 300056 est un projet « expérimental » porté par un maître d'ouvrage qui intègre des solutions plus riches qu'un projet classique de rénovation.**

Ainsi, le bénéfice en coût global de la rénovation semble déterminé d'abord par le montant des travaux à l'année zéro. Comme nous l'avons vu précédemment ce montant des travaux est lié aux solutions retenues (sarking, ITE, ventilation double flux ...) mais aussi au montant facturé par les artisans qui est très hétérogène d'après les données collectées. Afin d'étudier l'influence des économies à l'usage sur ce bénéfice, on étudie deux autres paramètres : (1) le type d'énergie à savoir si on passa à une énergie plus ou moins chère, (2) la quantité d'énergie en kWh, c'est-à-dire le gain en énergie finale avant/après

rénovation, et (3) la valeur verte, c'est à dire la valeur économique ajoutée à avoir rénové lors de la revente du bien.

De même que dans l'ACV, le gain est classé en 5 catégories allant de très faible à très fort : un gain moyen se situe autour de la valeur moyenne des gains observés. On souligne que, en général :

- Un gain très faible correspond à un saut de 1 niveau dans le DPE
- Un gain faible correspond à un saut de 1 ou 2 niveaux dans le DPE
- Un gain moyen correspond à un saut de 2 ou 3 niveaux dans le DPE
- Un gain fort correspond à un saut de 3 niveaux dans le DPE
- Un gain très fort correspond à un saut de 2, 3 ou 4 niveaux dans le DPE (sans que cela puisse s'expliquer)

Dans la table suivante on retrouve le gap en coût global de toutes les MI, classées par montant des travaux à l'année 0 : inférieur ou supérieur à la moyenne. Au sein de chaque catégorie, les gains sont classés par ordre croissant. Aussi, on affiche les deux paramètres susmentionnés : le type d'énergie et le type de gain. Enfin, on ajoute le paramètre ampleur de la valeur verte, à savoir si elle est inférieure ou supérieure à la moyenne des valeurs vertes observées pour les MI PIM II.

Tableau 34 : Gap de coût global des MI, classé par ordre de grandeur du montant des travaux à l'année 0, avec précision du type d'énergie, du type de gain et du type de valeur verte

Ordre de grandeur montant travaux	Gap statu quo-réno P €/m ² SHAB	Coût de l'énergie	Gain consommation	Valeur verte	N°
Inférieur à la moyenne	66	Idem chère	pas	2. Faible	Inférieure à la moyenne 300054
	165	Plus chère		5. Très fort	Inférieure à la moyenne 300104
	182	Idem chère	pas	3. Moyen	Supérieure à la moyenne 300023
	227	Plus chère		2. Faible	Supérieure à la moyenne 600101
	252	Plus chère		3. Moyen	Supérieure à la moyenne 200301
	276	Idem chère	pas	3. Moyen	Supérieure à la moyenne 200202I
	281	Moins chère		1. Très faible	Inférieure à la moyenne 300061
	367	Plus chère		3. Moyen	Supérieure à la moyenne 100201
	373	Plus chère		4. Fort	Inférieure à la moyenne 500101
	401	Idem chère		2. Faible	Supérieure à la moyenne 100203
	441	Plus chère		5. Très fort	Inférieure à la moyenne 300102

	590	Plus chère	5. Très fort	Supérieure à la moyenne	200202II
	592	Plus chère	4. Fort	Supérieure à la moyenne	700102
	923	Moins chère	5. Très fort	Supérieure à la moyenne	300032
Supérieur à la moyenne	-367	Idem chère	pas	2. Faible	Supérieure à la moyenne
	-297	Idem chère	pas	2. Faible	Inférieure à la moyenne
	-259	Idem chère	pas	2. Faible	Supérieure à la moyenne
	-242	Idem chère	pas	1. Très faible	Inférieure à la moyenne
	-175	Plus chère		3. Moyen	Inférieure à la moyenne
	-162	Idem chère	pas	2. Faible	Inférieure à la moyenne
	-48	Idem chère	pas	3. Moyen	Supérieure à la moyenne
	37	Plus chère		3. Moyen	Supérieure à la moyenne
	54	Idem chère	pas	2. Faible	Supérieure à la moyenne
	63	Idem chère	pas	3. Moyen	Inférieure à la moyenne
	143	Plus chère		4. Fort	Supérieure à la moyenne
	214	Plus chère		4. Fort	Supérieure à la moyenne

On peut voir que, au sein de chaque ambition, les plus gros gaps sont d'abord observés pour les MI qui présentent un gain de consommation en énergie finale fort et très fort (en gras). Le bénéfice ne semble pas corrélé au fait de passer à une énergie moins chère ou encore de disposer d'une valeur verte supérieure à la moyenne. **Ce dernier point est à nuancer car nous appliquons ici la valeur verte au terme des 30 ans. Mais dans une vision « rénover pour revendre » la valeur verte doit être introduite à l'année 1 après les travaux, ou encore en prenant en compte la durée moyenne de détention d'un bien d'environ 8 ans [source : Effinergie], elle est introduite à l'année 8. Cela engendre un temps de retour sur investissement plus rapide combiné à une valeur verte plus importante en valeur absolue (car l'actualisation est donc moins élevée que lorsqu'on la considère à l'année 30).** Ce phénomène est plus visible dans les graphes présentés dans le chapitre suivant.

Conclusion

Pour 73% de l'échantillon, le coût des travaux est compensé sur 30 ans par le bénéfice réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour coût global est inférieur à 30 ans pour 73% des MI analysées.

Les économies les plus importantes sont réalisées lorsque le montant des travaux n'excède pas le montant des consommations énergétiques annuelles actualisées, pendant 30 ans. L'équation à vérifier pour remplir cette condition est indiquée ci-dessous :

$$\text{Coût des travaux [€TTC]} < \sum_{i=0}^{30} \text{Coût consommation annuelle} [\frac{\text{€TTC}}{\text{an}}] \times \frac{1}{(1,03)^i}$$

Le second paramètre clé pour maximiser les économies est de viser le plus gros gain possible en énergie finale, notamment en s'attaquant aux passoires thermiques en priorité (MI de DPE de niveau E voire F) et en favorisant la mise en place d'une PAC air-eau à COP maximal.

Les paramètres clés de la rénovation à faible coût global sont donc le coût des travaux et l'ampleur du gain à l'usage. Le prix relatif de chaque énergie (i.e. le fait de passer à une énergie plus chère après rénovation, par ex du gaz vers l'électricité) et la valeur verte (i.e. le bénéfice à la revente d'avoir augmenté la classe de DPE) appliquée en fin de période d'analyse ne sont pas ressortis comme paramètres déterminants. Sur ce dernier point, on précise bien « appliquée en fin de période d'analyse » car dans une vision « rénover pour revendre » la valeur verte doit être introduite à l'année 1 après les travaux, ou encore en prenant en compte la durée moyenne de détention d'un bien d'environ 8 ans [source : Effinergie], elle est introduite à l'année 8. Cela engendre un temps de retour sur investissement plus rapide combiné à une valeur verte plus importante en valeur absolue (car l'actualisation est donc moins élevée que lorsqu'on la considère à l'année 30). Dans ce cas la valeur verte peut être un paramètre déterminant.

Performance en coût global de la maison rénovée

Dans les figures suivantes, on présente pour les deux cas extrêmes des ambitions de rénovation "coup de pouce" et "BBC rénovation", le graphe des coûts cumulés pour les trois scénarios. Les graphes de toutes les MI étudiées sont rapportés en annexe 2.

Lorsque la courbe du statu quo passe au-dessus de la courbe de la rénovation, cela signifie que son coût cumulé devient plus élevé. L'année que l'on peut lire en abscisse correspond alors au temps de retour en coût global. Dans le cas présent, il y a un temps de retour en coût global selon la vision propriétaire et un autre selon la vision sociétale. A noter que si la courbe statu quo ne passe jamais au-dessus de la courbe rénovation, c'est que le temps de retour est supérieur à 30 ans, période de référence de l'étude.

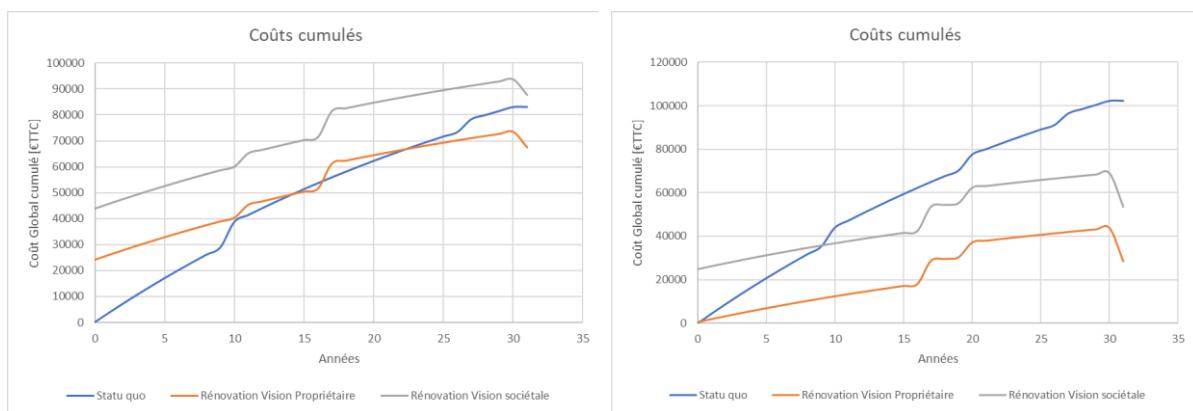


Figure 20: Coûts cumulés pour les 2 cas extrêmes des MI "Coup de pouce": 200204 : MI au GAP le plus petit, 700102 : MI au GAP le plus élevé

Tout d'abord, on observe sur ces graphes l'ampleur des aides accordées en notant le point de départ sur l'axe vertical à l'année t0 des courbes orange versus grise. En l'occurrence, ces deux MI ont bénéficié de financements via Certificats d'Economie d'Energie et Ma Prime Rénov. Ensuite on observe un abaissement des courbes « Rénovation » à l'année 31 qui correspond au bénéfice « valeur verte ».

La table suivante résume les temps de retour dans chaque cas.

Tableau 35 : Temps de retour en coût global de 2 MI "Coup de pouce"

	Temps de retour en coût global vision propriétaire	Temps de retour en coût global vision sociétale
MI au GAP le plus petit	22 ans	> 30 ans
MI au GAP le plus grand	0 ans	9 ans

On note que l'intégration de la « valeur verte » plus tôt au cours de la période d'analyse (à l'année 1 dans une vision « rénover pour revendre » ou à l'année 8 si on prend en compte la durée moyenne de détention d'un bien) permettrait d'obtenir des temps de retour en coût global plus faible.

On note que pour la MI au gap le plus grand, le temps de retour en coût global dans la vision propriétaire est à l'année zéro car les aides apportées au propriétaire correspondent exactement à l'investissement initial de la rénovation.

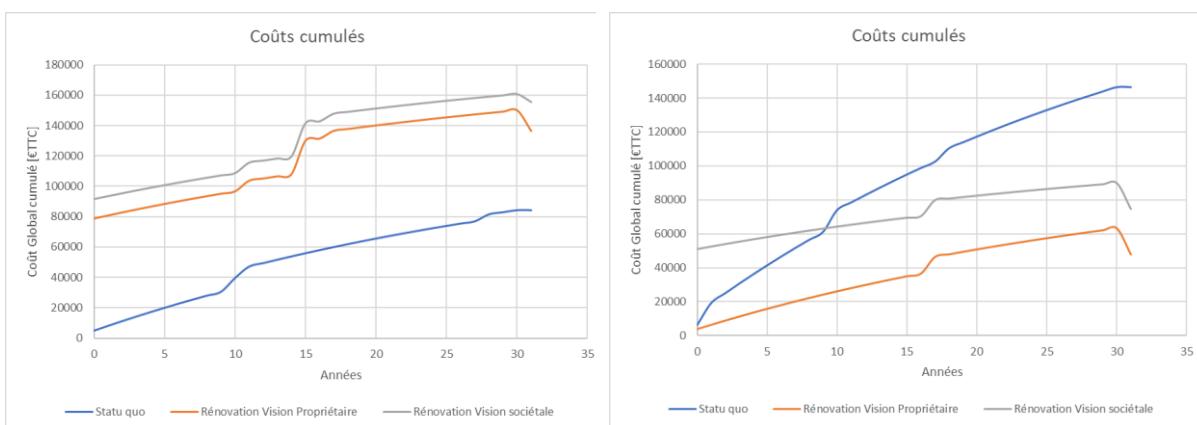


Figure 21: Coûts cumulés pour les 2 cas extrêmes des MI "BBC Rénovation" : 300056 :MI au GAP le plus petit, 300032 : MI au GAP le plus élevé

Ici aussi on observe l'ampleur des aides accordées en notant le point de départ sur l'axe vertical à l'année t0 des courbes orange versus grise. En l'occurrence, ces deux MI ont bénéficié de financements à peu près équivalents en termes de montant /m² (origine non identifiée) mais la MI au gap le plus élevé a, en complément, bénéficiée d'un prêt à taux zéro. On remarque aussi l'ampleur de la valeur verte en fin de période d'analyse.

La table suivante résume les temps de retour dans chaque cas.

Tableau 36 : Temps de retour en coût global de 2 MI "BBC Rénovation"

	Temps de retour en coût global vision propriétaire	Temps de retour en coût global vision sociétale
MI au GAP le plus petit	> 30 ans	> 30 ans
MI au GAP le plus grand	0 ans	9 ans

On note que l'intégration de la « valeur verte » plus tôt au cours de la période d'analyse (à l'année 1 dans une vision « rénover pour revendre » ou à l'année 8 si on prend en compte la durée moyenne de détention d'un bien) permettrait d'obtenir des temps de retour en coût global plus faible.

On note que pour la MI au gap le plus grand, le temps de retour en coût global dans la vision propriétaire est à l'année zéro car les aides apportées au propriétaire, notamment le prêt à taux zéro, correspondent

exactement à l'investissement initial de la rénovation. D'ailleurs, la différence de pente des courbes rénovation vision sociétale et vision propriétaire illustre le remboursement du prêt.

Cette analyse permet de constater le rôle des aides (financements et prêts) pour avoir un temps de retour en coût global le plus faible possible. Le graphe suivant montre le gap coût global statu quo versus rénovation en vision propriétaire avec indications sur le montant des travaux à l'année zéro déjà affiché en Figure 19, auquel on a ajouté le gap coût global statu quo versus rénovation en vision sociétale.

Le code couleur est le suivant :

- Argenté : le montant des travaux est inférieur à la moyenne du montant des travaux observés pour l'ensemble des MI PIM II
- Doré : le montant des travaux est supérieur à la moyenne du montant des travaux observés pour l'ensemble des MI PIM II.

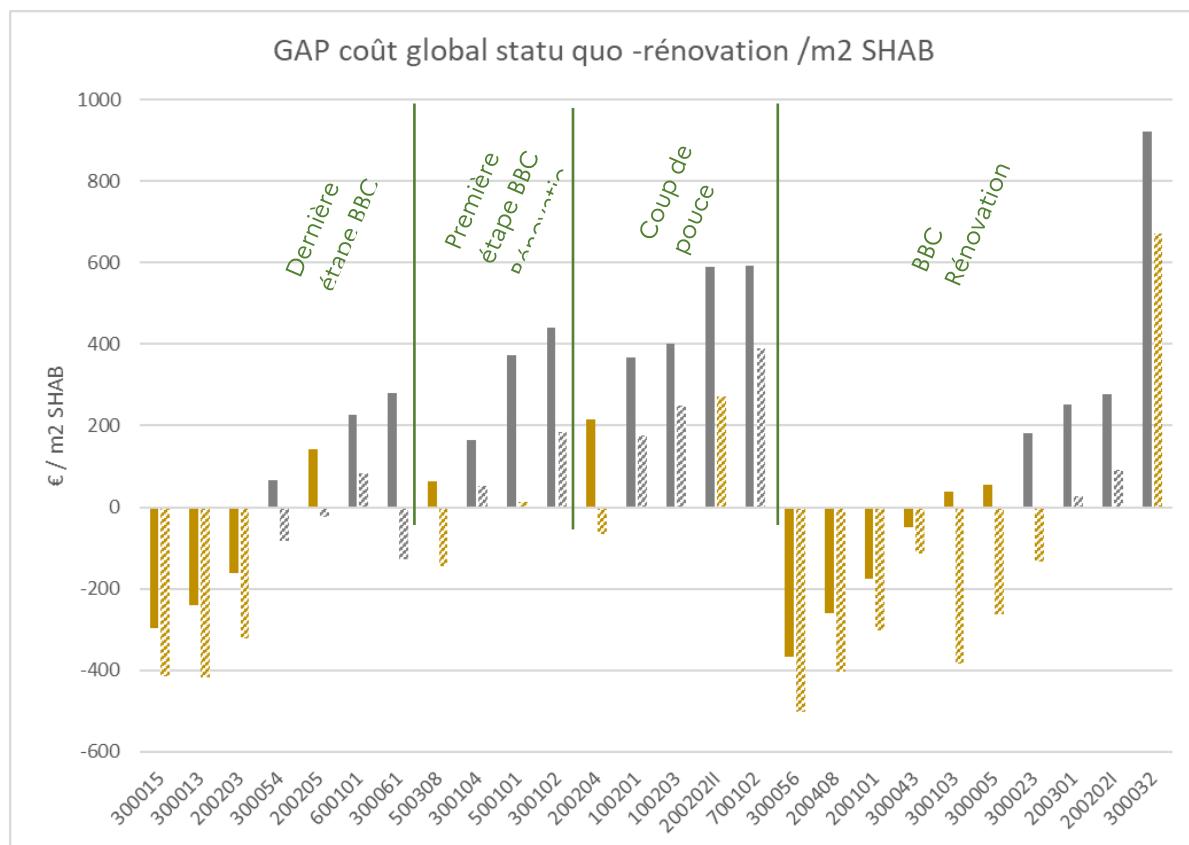


Figure 22: Gap coût global statu quo versus rénovation (vision propriétaire en plein et vision sociétale en hachuré) avec indications sur le montant des travaux à l'année zéro. Argenté : inférieur à la moyenne ; Doré : supérieur à la moyenne.

Comme anticipé, le gap en vision sociétale est bien plus faible qu'en vision propriétaire. On note que le gap sociétal est généralement inférieur à zéro lorsque le montant des travaux est supérieur à la moyenne. Les deux exceptions, MI 200202II et 300032, s'expliquent par un gain de consommation à l'usage « très fort » (cf. Tableau 34).

La table suivante indique le nombre de MI présentant un gap statu quo - rénovation supérieur à zéro pour chaque ambition de rénovation.

Tableau 37 : Nombre de MI présentant un GAP de coût global Statu quo - Rénovation supérieur à zéro

	Vision propriétaire	Vision sociétale
Dernière étape de rénovation	4 sur 7	1 sur 7
Première étape de rénovation	4 sur 4	3 sur 4
Coup de pouce	5 sur 5	4 sur 5
BBC Rénovation	6 sur 10	3 sur 10

Si une majorité de MI présentent un gap positif au sein de chaque ambition de rénovation dans la vision propriétaire, ce n'est plus le cas dans la vision sociétale où ce taux devient minoritaire pour les ambitions "dernière étape de rénovation" et "BBC rénovation". A l'inverse, les « première étape de rénovation » et les rénovations « Coup de pouce » conservent pour la plupart un gap positif dans la vision sociétale. On rappelle (cf. Tableau 25) que les rénovations « Coup de pouce » présentent dans 3 cas sur 7 un gain de consommation fort ou très fort. De la même manière, les rénovations « première étape » incluent dans 3 cas sur 4 un gain de consommation fort ou très fort. Ces proportions avantageuses ne se retrouvent pas dans l'ambition « BBC Rénovation ». Cela est combiné avec un coût des travaux relativement faible. Cela explique probablement les résultats observés.

En conclusion, les aides (prêts et financements) sont capitales pour espérer obtenir un temps de retour en coût global inférieur à 30 ans, notamment pour les rénovations à ambition "BBC Rénovation". Si le montant des aides (financements + prêt) reçues à l'année zéro correspond au montant des travaux, et que le remboursement annuel du prêt (le cas échéant) ne dépasse pas le gain annuel en facture d'énergie, le temps de retour du point de vue du propriétaire est immédiat.

Conclusion

Les aides à la rénovation (prêts et financements) sont capitales pour espérer obtenir un temps de retour en coût global inférieur à 30 ans du point de vue du propriétaire, notamment pour les rénovations à ambition "BBC Rénovation". Si le montant des aides (financements + prêt) reçues à l'année zéro correspond au montant des travaux, et que le remboursement annuel du prêt (le cas échéant) ne dépasse pas le gain annuel en facture d'énergie, le temps de retour du point de vue du propriétaire est immédiat. Sans aller jusque-là, les aides publiques pourraient être calculées de manière à assurer un retour sur investissement en un délai limité, par exemple 10 ans.

8.2.2 Analyses de sensibilité évolution du prix de l'énergie

L'étude en base considère un prix fixe pour l'ensemble des vecteurs énergétiques. Ces prix sont issus du tarif réglementé pour l'électricité et le gaz, et de données statistiques pour le fioul, les pellets et le bois. Une variation de ces prix est prise en compte pour cette analyse de sensibilité, selon les paramètres précédents présentés dans le chapitre 36 pour l'évolution annuelle des prix par vecteurs.

La comparaison des gaps en cout global entre statu quo et rénovation est présentée dans la figure suivante.

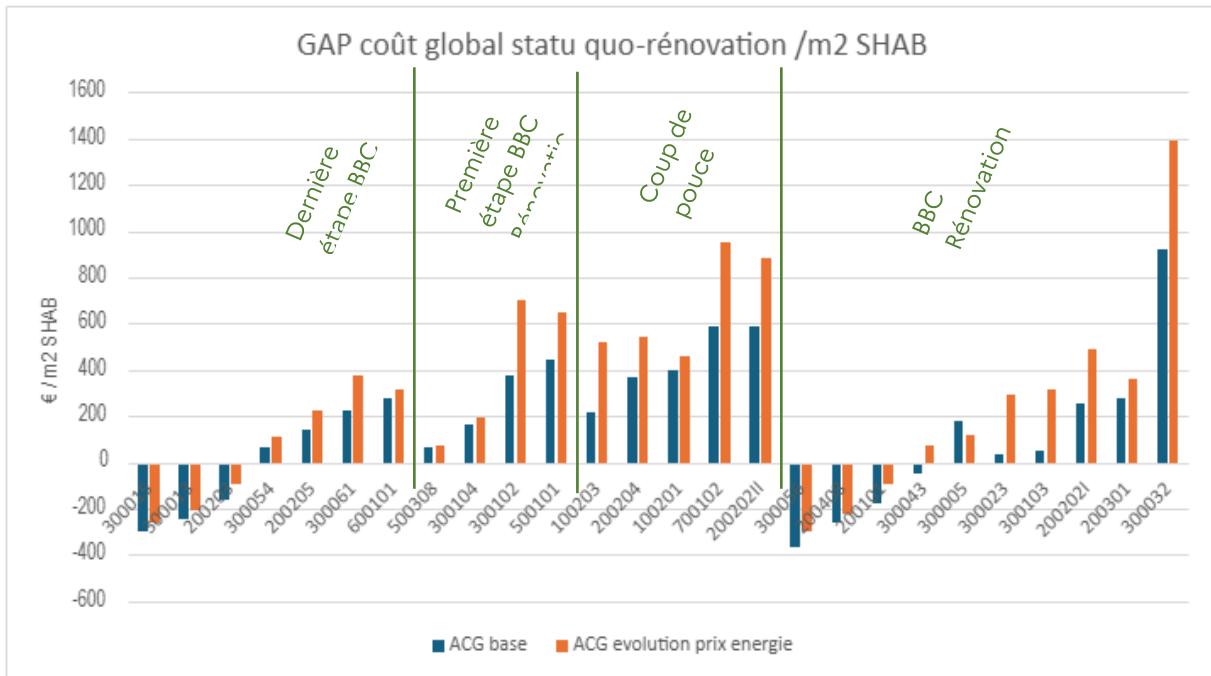


Figure 23: Variation du GAP de coût global entre le statu quo et la rénovation vision propriétaire lorsque l'on prend en compte l'évolution des prix de l'énergie

On constate ainsi que le gap évolue en faveur du scénario de rénovation. Ainsi dans les cas où le gap était négatif en base, sa valeur absolue se réduit. Par ailleurs, pour la majorité des maisons présentant un gap positif en base, celui-ci tend à augmenter. Un maximum est observé pour la MI 300103 où le gap est multiplié par 8,5.

Une maison présente une inversion de tendance : la maison 300043, qui passe d'un gap négatif à un gap positif. Cette rénovation fait partie de celles présentant un montant de travaux supérieur à la moyenne, mais avec un écart relativement faible à cette moyenne. Ainsi l'évolution du prix du gaz, conservé et donc présent à la fois en rénovation et statu quo, amplifie dans ce cas l'effet des économies réalisées grâce à l'amélioration de la performance de la maison, et ici permet au scénario rénovation de devenir plus favorable, les économies compensant désormais le coût des travaux.

Conclusion

La prise en compte de l'augmentation des prix de l'énergie entraîne une augmentation du bénéfice en coût global liée à la meilleure performance énergétique des maisons rénovées, le différentiel du coût de l'exploitation avant / après rénovation s'en trouvant amplifié. L'introduction de scénarios prospectifs à la hausse pour l'ensemble des vecteurs favorise ainsi la rénovation dans l'ensemble des cas en multipliant au maximum par 8,5 le gap entre statu quo et rénovation.

8.2.3 Analyses de sensibilité taux d'actualisation

Le graphe suivant montre la variation du GAP de coût global entre le statu quo et la rénovation vision propriétaire lorsque l'on passe d'un taux d'actualisation de 3% (ACG de base) à un taux de 0% (variante).

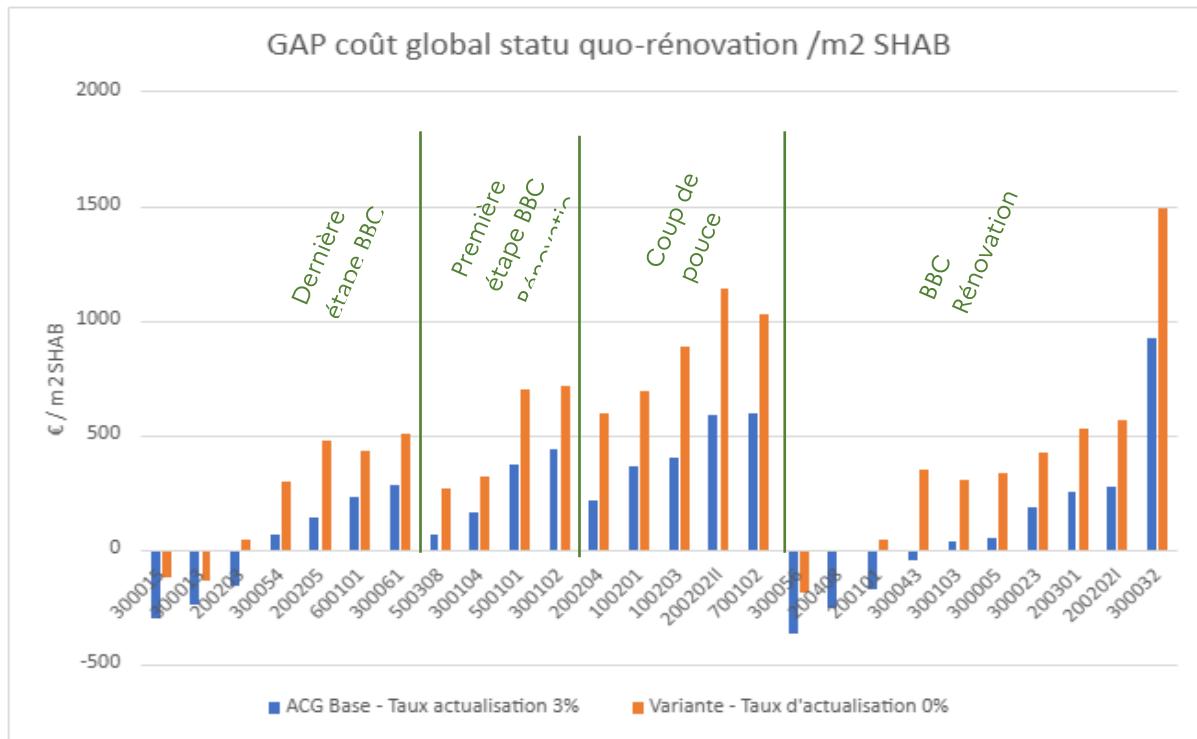


Figure 24: Variation du GAP de coût global entre le statu quo et la rénovation vision propriétaire lorsque l'on passe d'un taux d'actualisation de 3% (ACG de base) à un taux de 0% (variante)

On note une nette augmentation du gap pour l'ensemble des scénarios. En particulier, 7 MI présentent un gap négatif avec un taux d'actualisation de 3% alors qu'il n'en reste que 4 avec un GAP négatif en prenant en compte un taux de 0% : les MI 200203, 200101, 300043 ont maintenant un gap supérieur à zéro. En effet, plus le taux est élevé, plus les consommations à l'usage ayant lieu dans le futur sont abaissées, le bénéfice de les réduire devient donc moins visible.

Avec un taux d'actualisation de 0%, 22 MI sur 26 présentent un GAP supérieur à zéro, c'est-à-dire que dans 85% des cas, le coût des travaux est compensé sur 30 ans par l'économie réalisée en exploitation après rénovation.

Conclusion

Le coût global est fortement sensible au taux d'actualisation choisi. Avec un taux d'actualisation de 0%, pour 85% de l'échantillon, le coût des travaux est compensé sur 30 ans par le bénéfice réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, avec un taux d'actualisation de 0%, le temps de retour coût global est inférieur à 30 ans pour 85% des MI analysées.

Ainsi, vu qu'il est impossible de connaître ce paramètre pour les 30 ans à venir, si le coût global d'un projet de rénovation est un critère d'aide à la décision, deux mesures, a minima, de ce coût global devraient être effectuées, avec un taux d'actualisation minimum et un maximum, afin de vérifier que les conclusions sont similaires dans les deux cas en amont de la prise de décision. Par exemple, dans le cas présent, il n'est pas possible de se prononcer sur le scénario présentant le meilleur cout global pour 3 MI dont le gap entre statu quo et rénovation change de signe avec le changement du taux d'actualisation.

9. Comparaison des enseignements avec la bibliographie

La table suivante présente les enseignements des différentes études ACV portant sur la rénovation de bâtiments anciens identifiées dans la bibliographie (cf. chapitre 5.5 en p18) comparés aux enseignements de PIM II. Trois études sont analysées :

- « NZC Rénovation phase II » de l'Alliance HQE-GBC France (2022), ci-après nommée : NZC Réno 2022
- « Impact carbone des rénovations énergétiques » de Pouget Consultants pour l'ANAH (2023), ci-après nommée : ANAH 2023
- « Comment transformer la rénovation énergétique en rénovation bas carbone ? » de l'IFPEB & Carbone 4 pour le HUB des prescripteurs carbone (2025), ci-après nommée : HUB 2025

Les thèmes retenus sont ceux commun à PIM et à l'étude analysée, ce dans chaque cas. Ainsi, on retrouve à chaque fois le « temps de retour carbone » car il est évoqué dans chaque étude. Par ailleurs, les thématiques sont uniquement liées à l'impact carbone car aucune autre étude n'a étudié le coût global de manière comparable à la nôtre.

Tableau 38 : Comparaison des enseignements de PIM II avec ceux des études ACV portant sur la rénovation de bâtiments anciens identifiées dans la bibliographie

Thèmes \ Etudes	NZC Réno 2022	ANAH 2023	HUB 2025	PIM II
Poids carbone des PCE dans le bilan total	Varie fortement d'un cas à l'autre. Il est compris entre 40 et 70% du bilan global sur 50 ans	/		Varie fortement d'un cas à l'autre. Il est compris entre 8 % à 71 % du bilan global sur 30 ans (36% en moyenne)

Temps de retour carbone	De 7 à 127 ans selon les typologies (MI non évaluées)	De 1 an à + de 50 ans selon les cas. En tous les cas, il est maximisé (< 2 ans) quand on passe d'une énergie carbonée à une énergie peu carbonée	Toujours < 30 ans quelle que soit les typologies (MI non évaluées)	Inférieur ou égal à 5 ans pour 74% de l'échantillon. Toujours inférieur à 30 ans, plus favorable quand on passe d'une énergie carbonée à une énergie peu carbonée
Gap avant après rénovation ou carbone total évité	/	Les économies de carbone les plus importantes sont réalisées lors du passage d'une énergie carboné et une énergie décarbonée tel que le bois ou la PAC air /eau	/	Les économies de carbone les plus importantes sont réalisées lors du passage d'une énergie carboné et une énergie décarbonée tel que le bois ou la PAC air /eau
Variabilité selon les matériaux et équipements utilisés	/	Variabilité selon : <ul style="list-style-type: none"> • le type d'isolant : faible • le type de bardage en ITE : élevée • le type de menuiseries : faible • le type de fluide frigorigène de la PAC : élevée 	/	Matériaux et équipement à impact carbone prépondérant sur l'impact carbone total des PCE : bardage et menuiseries en aluminium, PAC.
Paramètres clés de la rénovation / bas carbone	/		1.Réduire la consommation en énergie finale par des leviers de sobriété et d'efficacité cumulés (sobriété des usages, isolation, optimisation des systèmes) 2.Passer d'une énergie fossile à une énergie non fossile 3.Préserver l'existant au maximum (réduire le volume)	Rénover d'abord les passoires énergétiques (étiquette E ou F du DPE) Passer d'une énergie fossile à une énergie non fossile

des matériaux installés et leur intensité carbone)



Conclusion

L'analyse croisée des enseignements de la présente étude avec trois autres études françaises portant sur le bilan carbone de la rénovation de bâtiments anciens (études HQE/GBC, ANAH et HUB des prescripteurs) aboutie aux constats suivants. Tout d'abord, la part des PCE est variable mais, dans tous les cas, ne semble pas être le paramètre le plus important pour garantir une rénovation bas carbone. Les paramètres clés de la rénovation bas carbone semblent plutôt être : le passage d'une énergie carboné et une énergie décarbonée tel que le bois ou la PAC air /eau et la réduction de la consommation énergétique à l'usage. Ce dernier point est atteint en rénovant d'abord les passoires énergétiques et par la sobriété des usages, l'isolation complète de l'enveloppe (notamment via une rénovation ambitieuse comme la rénovation BBC) et l'optimisation des systèmes. On rappelle que sur le plan technique, il est préférable de réduire les consommations avant de changer d'équipements techniques afin que ces derniers soient bien dimensionnés.

10. Conclusions

Echantillon analysé

Le nombre de MI à analyser initialement prévu, entre 60 et 80, a fortement été revu à la baisse au regard des difficultés à collecter les données auprès des ménages. Face à cette réalité de terrain, l'ambition de mener dans PIM II une analyse statistique par ambition de rénovation n'a pas été possible. Nous avons surtout mené une analyse fine des résultats comparatifs obtenus afin de bien comprendre les paramètres déterminant le bénéfice global en carbone et en coût global.

L'échantillon analysé présentait un déséquilibre : l'état initial des MI par ambition de rénovation n'était pas similaire. En particulier, les rénovations « coup de pouce » incluaient majoritairement des MI de classes E voire F avec un chauffage au fioul alors que les rénovations « BBC » incluaient majoritairement des MI de classe D avec un chauffage au fioul ou au gaz. **Aussi, l'échantillon analysé présentait une sur-représentation** de la mise en place de PAC Air-Eau dans les rénovations « Coup de pouce » et « première étape de rénovation », peu de systèmes à base de bois en général et une majorité de chaudière gaz dans les « rénovations BBC ». **Ainsi, nous avons évité l'énoncé de conclusions par ambition de rénovation (du type « Les rénovations BBC sont ... comparativement au rénovations Coup de pouce ») dans l'analyse des résultats.**

Sur l'analyse en cout global en particulier, nous attirons l'attention du lecteur sur les difficultés rencontrées : les difficultés à collecter des données fiables auprès des ménages a réduit considérablement l'échantillon analysé (26 MI contre 60 à 80 prévues initialement), ce qui pose un problème statistique. Cet échantillon réduit présente une certaine hétérogénéité des ambitions énergétiques et un déséquilibre entre les équipements présents dans les cas initiaux. De plus, il intègre une sur-représentation de solutions techniques onéreuses, un projet expérimental et donc non reproductible, ainsi que des chiffrages et métrés incohérents sur certains lots (ITE pouvant aller de 90 €/m² à 750 €/m² par exemple).

Impact carbone des produits et équipements

La part PCE des rénovations est très variable, ce quelle que soit l'ambition de rénovation (8 % à 71 % de l'impact carbone total, toutes ambitions confondues).

Lorsqu'il y a mise en place d'une PAC air-eau, les équipements CVC sont plus visibles et représentent environ 50% de l'impact carbone des PCE. En outre, les rénovations qui comprennent la mise en place d'une PAC ont un impact carbone des PCE plus élevés que les autres. Il est donc important que les industriels mettent tout en œuvre pour éco-concevoir ce type de produit. Attention, cela ne dit rien sur le bénéfice global des rénovations avec PAC car il faut le mettre en regard des gains à l'usage (voir plus loin). Mis à part les équipements, c'est l'isolation de l'enveloppe (sol, mur, toiture) qui représente la part carbone la plus importante, devant le remplacement des menuiseries.

L'impact carbone moyen de la rénovation la plus ambitieuse, c'est à dire "BBC Rénovation", c'est à dire "BBC Rénovation", n'est pas plus élevé que celui des autres ambitions. En outre, il est bien inférieur à l'impact carbone moyen des PCE des rénovations "première étape" plus celui des "dernière étape BBC rénovation". Bien que ce calcul ne soit pas rigoureusement pertinent car les "première" et "dernière étape" ne s'additionnent pas nécessairement (il ne s'agit pas des mêmes MI), cela donne tout de même une idée de l'économie d'échelle à réaliser la rénovation en une seule fois.

Enfin, l'analyse croisée des enseignements de la présente étude avec trois autres études françaises portant sur le bilan carbone de la rénovation de bâtiments anciens (HQE/GBC, ANAH et HUB des prescripteurs) vient confirmer ce constat : la part des PCE est variable mais, dans tous les cas, ne semble pas être le paramètre le plus important pour garantir une rénovation bas carbone.

Temps de retour carbone

Pour l'ensemble de l'échantillon, le carbone émis lors des travaux est compensé sur 30 ans par le gain carbone réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour carbone est

toujours inférieur à 30 ans pour l'ensemble des MI analysées. Pour 74% de l'échantillon le TRC est inférieur ou égal à 5 ans.

Les économies de carbone les plus importantes sont réalisées lors du passage d'une énergie carbonée et une énergie décarbonée tel que le bois ou l'électricité. Le second paramètre clé pour maximiser les économies de carbone et donc minimiser le TRC est de viser le plus gros gain possible en énergie finale, notamment en s'attaquant aux passoires thermiques en priorité (MI de DPE de niveau E voire F) et en favorisant la mise en place d'une PAC air-eau à COP maximal.

Les projets au TRC > 10 ans sont ceux qui étaient sur un système de production de chaleur décarboné et qui y restent, ou qui étaient qualifiés de « non conforme ».

A l'inverse, le gap carbone avant / après rénovation ne semble pas corrélé à la surface habitable, l'année de construction, la zone climatique, l'altitude ou encore le système constructif.

Enfin, l'analyse croisée des enseignements de la présente étude avec trois autres études françaises portant sur le bilan carbone de la rénovation de bâtiments anciens (HQE/GBC, ANAH et HUB des prescripteurs) a permis de confirmer ces conclusions : les paramètres clés de la rénovation bas carbone que l'on retrouve dans chaque cas sont : le passage d'une énergie carboné et une énergie décarbonée tel que le bois ou la PAC air /eau, et la réduction de la consommation énergétique à l'usage. Ce dernier point est atteint en rénovant d'abord les passoires énergétiques et par la sobriété des usages, l'isolation complète de l'enveloppe (notamment via une rénovation ambitieuse comme la rénovation BBC) et l'optimisation des systèmes. On rappelle que sur le plan technique, il est préférable de réduire les consommations avant de changer d'équipements techniques afin que ces derniers soient bien dimensionnés.

Emissions de GES du cycle de vie des MI rénovées

En termes de performance carbone sur 30 ans (PCE + VEO), toutes les MI rénovées en « Coup de pouce » et « BBC rénovation » se situent sous le seuil de 910 kg CO₂e/m² SHAB (nb : seuil établi sur la base de la méthode en base du label BBCA Rénovation).

Il existe une corrélation directe entre le vecteur énergétique choisi à l'occasion de la rénovation et la performance carbone de la maison rénovée : avec le choix d'une énergie décarbonée (bois, électricité), l'impact carbone de la MI rénovée sur 30 ans est inférieur ou égal à 600 kg CO₂e/m² SHAB. Plus exactement, les MI rénovées avec du chauffage bois sont celles qui émettent le moins de GES leur cycle de vie. A l'inverse, toutes les rénovations ayant conservées le gaz comme vecteur énergétique ont une performance carbone supérieure ou égale à 600 kg CO₂e/m² SHAB.

Sensibilité des résultats au facteur d'émissions en GES de l'électricité

Le facteur d'émissions de GES de l'électricité est très variable selon les usages et saisons (écart observable x10) et c'est un paramètre sensible dans les études ACV de bâtiment un changement de vecteur énergétique pour le chauffage, dont l'électricité, distinct selon les scénarios étudiés. A titre d'exemple, lorsque les mix marginaux sont considérés, le passage d'un chauffage au bois avant rénovation à l'électricité via une PAC air-eau après rénovation peut mener à un bilan carbone de la rénovation supérieur à celui du statu quo (gap négatif) ; alors qu'il apparaît positif lorsque l'on considère le mix électrique moyen (qui a un facteur d'émission plus faible).

De manière similaire mais inverse, l'évolution de facteur d'émissions de GES de l'électricité selon différents scénarios prospectifs de décarbonation de l'électricité est un paramètre sensible. A titre d'exemple, lorsque les mix prospectifs encore plus décarbonés qu'aujourd'hui sont considérés, le passage d'une chaudière électrique avant rénovation à une PAC air-eau après rénovation peut mener à un bilan carbone de la rénovation supérieur à celui du statu quo (gap négatif) car le gain de performance lié à la rénovation ne compense pas l'impact associé à l'action de rénover ; alors qu'il apparaît positif lorsque l'on considère le mix électrique moyen d'aujourd'hui (qui a un facteur d'émission plus élevé).

Sensibilité des résultats aux types de données INIES utilisés pour les PCE

L'utilisation de DED corrigées et de FDES collectives, plutôt que de FDES individuelles, a tendance à réduire le gap entre rénovation et statu quo de 13% en moyenne (i.e. la rénovation apparaît comme encore plus performante).

Ce choix de données est estimé pertinent pour l'étude PIM car cela a permis d'être plus efficace dans la modélisation sans que les enseignements de l'étude ne soient modifiés.

Temps de retour en énergie primaire non renouvelable

Pour 94% de l'échantillon, l'énergie primaire non renouvelable consommée pour les travaux est compensée sur 30 ans par le gain en énergie primaire non renouvelable réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour en énergie primaire non renouvelable est presque toujours inférieur à 30 ans pour l'ensemble des MI analysées.

La performance en énergie primaire non renouvelable est moins importante pour les MI rénovées consommant beaucoup d'électricité. Cela n'est pas préjudiciable néanmoins sur les MI ayant installées une PAC air-eau car la consommation en électricité reste faible après rénovation grâce au COP élevé de ce type de PAC.

Coût des travaux de rénovation

La part des travaux de rénovation²⁰ (i.e. à l'année 0) dans le coût global (i.e. incluant en plus 30 ans d'exploitation) perçu par le propriétaire est très variable, ce quelle que soit l'ambition de rénovation : 33% en moyenne avec des valeurs allant de 5 % à 81 %, toutes ambitions confondues. Dans une vision dite « sociétale » (dans laquelle on ignore les aides reçues par le propriétaire) la part travaux de rénovation correspond à peu près à 50% du coût global.

Lorsqu'il y a mise en place d'une PAC air-eau, les équipements CVC sont plus visibles et représentent 30 à 40% du coût des travaux à l'année 0 (exclusion des aides). Attention, cela ne dit rien sur le bénéfice global des rénovations avec PAC car il faut le mettre en regard des gains à l'usage (voir plus loin). Mis à part les équipements, c'est l'isolation des murs et le remplacement des menuiseries qui représentent le coût le plus important, devant les équipements de ventilation et l'isolation du sol et du toit. Il existe une exception cependant à ce dernier point où, en cas d'isolation sarking, l'isolation de la toiture peut être aussi importante que l'isolation des murs ou que le remplacement des menuiseries.

Le coût moyen des travaux de la rénovation la plus ambitieuse, c'est à dire "BBC Rénovation", est le plus élevé. Il reste cependant bien inférieur au coût moyen des travaux des MI "première étape" plus celui des "dernière étape BBC rénovation". Bien que ce calcul ne soit pas rigoureusement pertinent car les "première" et "dernière étape" ne s'additionnent pas nécessairement (il ne s'agit pas des mêmes MI), cela donne tout de même une idée de l'économie d'échelle à réaliser la rénovation en une seule fois.

Temps de retour en coût global

Avec un taux d'actualisation (arbitraire) de 3%, pour 73% de l'échantillon, le coût des travaux est compensé sur 30 ans par le bénéfice réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, le temps de retour coût global est inférieur à 30 ans pour 73% des MI analysées. Les économies les plus importantes sont réalisées lorsque le montant des travaux n'excède pas le montant des consommations énergétiques annuelles actualisées, pendant 30 ans. L'équation à vérifier pour remplir cette condition est indiquée ci-dessous :

$$\text{Coût des travaux [€TTC]} < \sum_{i=0}^{30} \text{Coût consommation annuelle} \left[\frac{\text{€TTC}}{\text{an}} \right] \times \frac{1}{(1,03)^i}$$

Le second paramètre clé pour maximiser les économies est de viser le plus gros gain possible en énergie finale, notamment en s'attaquant aux passoires thermiques en priorité (MI de DPE de niveau E voire F) et en favorisant la mise en place d'une PAC air-eau à COP maximal.

Les paramètres clés de la rénovation à faible coût global sont donc le coût des travaux et l'ampleur du gain à l'usage. Le prix relatif de chaque énergie (i.e. le fait de passer à une énergie plus chère après rénovation, par ex du gaz vers l'électricité) et la valeur verte (i.e. le bénéfice à la revente d'avoir augmenté

²⁰ Les rénovations sont avant tout énergétiques mais sont inclus dans le périmètre les coûts induits, ceux des études et ceux des travaux hors énergie engagés à l'occasion de la rénovation énergétique.

la classe de DPE) appliquée en fin de période d'analyse ne sont pas ressortis comme paramètres déterminants. Sur ce dernier point, on précise bien « appliquée en fin de période d'analyse » car dans une vision « rénover pour revendre » la valeur verte doit être introduite à l'année 1 après les travaux, ou encore en prenant en compte la durée moyenne de détention d'un bien d'environ 8 ans [source : Effinergie], elle est introduite à l'année 8. Cela engendre un temps de retour sur investissement plus rapide combiné à une valeur verte plus importante en valeur absolue (car l'actualisation est donc moins élevée que lorsqu'on la considère à l'année 30). Dans ce cas la valeur verte peut être un paramètre déterminant.

Effet des aides aux propriétaires sur le temps de retour en cout global

Les aides à la rénovation (prêts et financements) sont capitales pour espérer obtenir un temps de retour en coût global inférieur à 30 ans du point de vue du propriétaire, notamment pour les rénovations à ambition "BBC Rénovation". Si le montant des aides (financements + prêt) reçues à l'année zéro correspond au montant des travaux, et que le remboursement annuel du prêt (le cas échéant) ne dépasse pas le gain annuel en facture d'énergie, le temps de retour du point de vue du propriétaire est immédiat. Sans aller jusque-là, les aides publiques pourraient être calculées de manière à assurer un retour sur investissement en un délai limité, par exemple 10 ans.

Sensibilité des résultats à l'augmentation des prix de l'énergie

La prise en compte de l'augmentation des prix de l'énergie entraîne une augmentation du bénéfice en coût global liée à la meilleure performance énergétique des maisons rénovées, le différentiel du coût de l'exploitation avant / après rénovation s'en trouvant amplifié. L'introduction de scénarios prospectifs à la hausse pour l'ensemble des vecteurs favorise ainsi la rénovation dans l'ensemble des cas en multipliant au maximum par 8,5 le gap entre statu quo et rénovation.

Sensibilité des résultats au taux d'actualisation

Le coût global est fortement sensible au taux d'actualisation choisi. Avec un taux d'actualisation de 0%, pour 85% de l'échantillon, le coût des travaux est compensé sur 30 ans par le bénéfice réalisé en exploitation après rénovation. Exprimé autrement, avec un taux d'actualisation de 0%, le temps de retour coût global est inférieur à 30 ans pour 85% des MI analysées.

Ainsi, vu qu'il est impossible de connaître ce paramètre pour les 30 ans à venir, si le coût global d'un projet de rénovation est un critère d'aide à la décision, deux mesures, a minima, de ce coût global devraient être effectuées, avec un taux d'actualisation minimum et un maximum, afin de vérifier que les conclusions sont similaires dans les deux cas en amont de la prise de décision. Par exemple, dans le cas présent, il n'est pas possible de se prononcer sur le scénario présentant le meilleur cout global pour 3 MI dont le gap entre statu quo et rénovation change de signe avec le changement du taux d'actualisation.

11. Bibliographie

- « Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation ». 2021. Ministère de la transition écologique et du logement.
- « Cahier des charges Audit énergétique dans les bâtiments ». 2020. Expertises. ADEME. <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/cdc-ademe-audit-energetique-dans-les-batiments-17-12-2014.pdf>.
- Cycleco, et Enertech. 2017. « Rapport d'étude I3E Rénovation ». Livrable du projet I3E Rénovation. ADEME.
- « EN 15978 - Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method ». 2011. CEN.
- « EN 16627 - Évaluation de la performance économique des bâtiments - Méthodes de calcul ». 2015. CEN.
- Enertech, Effinergie, Médiéco, et Institut négaWatt. 2021. « Perf In Mind Rapport final - Analyse multicritère énergie, confort, santé, satisfaction, coût ». ADEME.
- « Guide méthodologique : Comment analyser les coûts associés à une rénovation énergétique ». 2021. Effinergie.
- « Guide pratique - Pour évaluer la performance environnementale des bâtiments rénovés et comparer leurs niveaux avec E+C- ». 2018. Alliance HQE-GBC France.
- IFPEB, et Carbone 4. 2025. « Comment transformer la rénovation énergétique en rénovation bas carbone ? En route vers la RE(no)2025 ». HUB des prescripteurs bas carbone.
- « NF EN 15804 + A2 - Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. » 2019. AFNOR.
- « NF EN15804 + A1 /CN - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la NF EN 15804+A1 ». 2016. AFNOR.
- Pouget Consultants. 2023. « Impact carbone des rénovations énergétiques - rapport d'étude ». ANAH.
- « prEN 17680 - Evaluation of the potential for sustainable refurbishment of buildings ». 2022. CEN.
- « Prise en compte du carbone dans les projets de rénovation - Etat des lieux et pratiques actuelles en France ». 2023. CEREMA.
- « Programme d'innovation collaborative NZC rénovation - Analyse du Cycle de Vie des cas génériques retenus (Phase II) ». 2021. Alliance HQE-GBC France.
- « Programme d'innovation collaborative NZC rénovation - Carnet des leviers bas-carbone pour la rénovation (Phase III) ». 2022. Alliance HQE-GBC France.
- « Prospective - Transitions 2050 - Rapport ». 2021. Horizons. ADEME.
- « Prospective de la consommation de matériaux pour la rénovation énergétique BBC des bâtiments résidentiels aux horizons 2035 et 2050 ». 2019. ADEME.
- « Règlement délégué No 244/2012 de la Commission du 16 janvier 2012 complétant la directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil sur la performance énergétique des bâtiments en établissant un cadre méthodologique comparatif de calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments et éléments de bâtiment + M1 ». 2013. UE.
- « Résultats du test HQE performance ACV rénovation ». 2019. Alliance HQE-GBC France.
- Roux, Charlotte. 2016. « Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis ». Paris Sciences et Lettres (ComUE).
- Sie, Marion, et Thierry Rieser. 2019. « Etude de rentabilité en coût global pour évaluer l'intérêt de la démarche « bâtiments durables méditerranéens » ». Envirobat BDM.

12. Annexe 1 : données utilisées pour l'ACV

12.1 DED et FDES collectives

	UF	DV	
Isolants sols			
Polystyrène expansé	1m ²	50	Isolant thermique et acoustique sous chape en PSE [R=2,5 à 5m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,3)
Polyuréthane	1m ²	50	Isolant thermique et acoustique sous chape en polyuréthane [R=2,5 à 5m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,3)
Laine de verre	1m ²	50	Isolants thermiques et acoustiques sous dalle en laine de verre [R=5 m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,2)
ouate de cellulose	1m ²	50	Isolant thermique et acoustiques en vrac en ouate de cellulose [R=5 à 10m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,3)
Laine de roche	1m ²	50	Isolant thermique et acoustique sous chape en laine de roche [R=2,5 à 5m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.4)
Isolants murs ITI			
Polystyrène expansé	1m ²	50	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITI) en polystyrène expansé [R=5m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,4)
Laine de verre	1m ²	50	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITI) en laine de verre [R=5 m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,3)
Laine de roche	1m ²	50	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITI) et cloisons en laine de roche [R=5m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,4)
Polyuréthane	1m ²	50	Isolant en polyuréthane projeté in situ, classe CCC4 (taux de cellules fermées ≥ 90%) (v,1,2)
plaque de plâtre	1m ²	50	Cloisonnement en plaque de plâtre [ép. entre 12,5 et 18 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Ossature	1ml	50	Ossature en acier pour cloisonnement et plafonds suspendus [46 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)
Par vapeur	1m ²	50	Pare-vapeur en polypropylène - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Isolants murs ITE			
Polystyrène expansé	1m ²	50	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITE) en polystyrène expansé [R entre 2,5 et 5 m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,3)
Laine de verre	1m ²	50	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITE) en laine de verre [R entre 2,5 et 5 m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,4)
Laine de roche	1m ²	50	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITE) en laine de roche [R entre 2,5 et 5m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,4)
Siporex	1m ²	50	Cloisonnement en béton cellulaire [ép. entre 15 et 20 cm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,2)
Fibre de bois	1m ²	50	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITE) en laine et fibre de bois [R=2,5 à 5 m ² .K/W] [Gestion durable] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)



Bardage	$1m^2$	50	Bardage en PVC [ép entre 8 et 20mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Bardage bois	$1m^2$	50	Bardage en bois massif [ép. entre 20 et 26 mm] [Gestion durable] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Ossature bois	$1m^3$	100	Élément d'ossature en bois de France, toutes essences (v.1.4)

Isolants toits

Polystyrène expansé	$1m^2$	50	Isolant thermique et acoustique pour toitures terrasses en polystyrène expansé [$R=5\text{ m}^2,\text{K/W}$] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Laine de verre	$1m^2$	50	Isolant thermique et acoustique pour combles en laine de verre [R entre 5 et $10\text{ m}^2,\text{K/W}$] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)
Laine de roche	$1m^2$	50	Isolant thermique et acoustique pour combles en laine de roche [R entre 5 et $10\text{ m}^2,\text{K/W}$] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)
Ouate de cellulose	$1m^2$	50	Isolant thermique et acoustiques en vrac en ouate de cellulose [$R=5$ à $10\text{ m}^2,\text{K/W}$] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)
Fibre de bois	$1m^2$	50	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITE) en laine et fibre de bois [$R=2,5$ à $5\text{ m}^2,\text{K/W}$] [Gestion durable] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
polyuréthane	$1m^2$	50	Isolant thermique et acoustique pour toitures terrasses en polyuréthane [$R=10\text{ m}^2,\text{K/W}$] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)
plaqué de platre	$1m^2$	50	Cloisonnement en plaque de plâtre [ép. entre 12,5 et 18 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Ossature	$1ml$	50	Ossature en acier pour cloisonnement et plafonds suspendus [46 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)
Tasseaux bois	$1m^3$	100	Élément d'ossature en bois de France, toutes essences (v.1.4)
Pare vapeur	$1m^2$	50	Pare-vapeur en polypropylène - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Pare pluie	$1m^2$	50	Pare-pluie en polyester - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.1)
isolant réfléchissant	$1m^2$	50	Isolant thermique à base de films réfléchissants pour combles [$R=5\text{ m}2,\text{K/W}$] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)

Menuiseries

DV bois	$1m^2$	30	Fenêtre et porte-fenêtre double vitrage, fabriquée en France, en Bois d'essence tempérée européen (v.1,3) (collectif)
TV bois	$1m^2$	30	Fenêtre et porte-fenêtre triple vitrage, fabriquée en France, en Bois d'essence tempérée européen (v.1,3) (collectif)
DV TV PVC	$1m^2$	30	Fenêtres et portes-fenêtres PVC, teintes claires ($L > 0,82$), avec vitrage d'épaisseur de verre cumulée supérieure à 12 mm (v.1,2) (collectif)
DV alu	$1m^2$	30	Fenêtre 2 vantaux en profilés aluminium $\leq 2,3\text{ m}^2$ (v.1,1) (collectif)
TV alu+bois	$1m^2$	25	Fenêtre triple vitrage en bois-aluminium [$Uw = 0,8\text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$] [Gestion durable] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)

Occultations

VR PVC	$1m^2$	30	Volet roulant PVC manuel (v.1.2)
VR/VB bois	$1m^2$	25	Volet battant ou coulissant en essence européenne traitée manuel (v.1.2)
VR alu	$1m^2$	30	Volet roulant aluminium manuel (v.1.2)
Volet persienne PVC	$1m^2$	30	Volet persienne en PVC - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.1)



Volet persienne en Acier	1m ²	25	Volet persienne en Acier - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Brise soleil	1m ²	50	Brise soleil en aluminium [profondeur 0,12m] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)

Chauffage

Chaudière gaz mixte	1u	17	Chaudière gaz à condensation mixte individuelle (chauffage et ECS) [P=24 kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.4)
PAC Air Eau chauffage	1u	17	Pompe à chaleur air eau assurant le chauffage en logement individuel [P = 6 à 10kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.4)
Poêle à bois granulé	1u	15	Poêle à bois granulés en acier (v.1,2) (collectif)
Pôle à bois buche	1u	20	Poêle à bois bûche en acier (v.1,2) (collectif)
Chaudière granulé	1u	17	Chaudière bois granulés assurant le chauffage seul [P=17 à 28kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Chaudière fioul	1u	16	Chaudière fioul [P=25kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT
Chaudière bois	1u	21	Chaudière biomasse individuelle [P=65kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Chaudière électrique	1u	15	Chaudière électrique [P=16kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.1)

ECS

Ballon thermodynamique 200l	1u	17	Chauffe-eau thermodynamique (sur air extérieur ou air ambiant non chauffé) avec appoint [Capacité entre 100 et 200L] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT
Ballon ECS 200l	1u	15	Chauffe-eau électrique [Capacité entre 50 et 200L] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT
Chauss eau solaire 200l	1u	15	Chauss eau solaire individuel [Capacité = 200L] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)

Emetteurs

Radiateur eau chaude	1u	50	Radiateur Eau Chaude Statique 1000 W (v.1,4) (collectif)
Convector électrique	1u	17	Convector [P=1kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Plancher chauffant	1m ²	50	Plancher Chauffant Rafraîchissant Basse Température (PCRBT) (v.1.4)
Multicouche	1ml	50	Tube multicouche en polyéthylène et aluminium [DN 20 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.1)

Ventilation

VMC SF Hygro B	1u	17	VMC simple flux Hygro B [Débit = 59m3/h] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
VMC DF	1u	17	Caisson de ventilation individuelle double flux [Débit compris entre 135 et 210 m3/h] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Gaines	1ml	30	Conduits flexibles [DN=200mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)



12.2 FDES individuelles

	UF	DV	
Isolants sols			
Polystyrène expansé	1m ²	50	Panneaux d'isolation thermique en polystyrène extrudé Thermogreen 500 [3,0 m ² .K/W] (v.1.2)
Polyuréthane	1m ²	50	Panneau d'isolation en mousse rigide de polyuréthane TMS® 100 mm d'épaisseur, R= 4,65 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.2)
Laine de verre	1m ²	50	KNAUF INSULATION Laine de Verre ECOSE TI 312 240 mm R=6,00 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.1)
Ouate de cellulose	1m ²	50	Ouate de cellulose PAVAFLOC / PAVACELL / VALOCELL / DOUCCELL par insufflation 220 mm R=5,2 (v.1.2)
Laine de roche	1m ²	50	KNAUF INSULATION Laine de roche SmartRoof B 170 mm (hors accessoires de pose) (v.1.1)
Isolants murs ITI			
Polystyrène expansé	1m ²	50	BILLECO2-6 épaisseur 130 mm - Isolant en polystyrène recyclé injecté en parois verticales (v.1.1)
Laine de verre	1m ²	50	KNAUF INSULATION Laine de Verre ECOSE Naturoll 032 160 mm R=5,00 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.1)
Laine de roche	1m ²	50	Panneau de laine de roche Acoustipan 80mm (v.1.1)
Polyuréthane	1m ²	50	Panneau d'isolation en mousse rigide de polyuréthane TMS® 120 mm d'épaisseur, R= 5,55 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.2)
Plaque de platre	1m ²	50	Plaque de plâtre Placoplatre® BA 13 (hors ossatures) (v.1.7)
Ossature	1ml	50	Ossatures pour cloisons et contre-cloisons : montants et rails (v.1.1) (collectif)
Par vapeur	1m ²	50	Pare-vapeur en polypropylène - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Isolants murs ITE			
Polystyrène expansé	1m ²	50	Sto-Panneau Polystyrène PS15SE 140 mm - Panneau d'isolation en polystyrène expansé (accessoires de pose exclus) (v.1.3)
Laine de verre	1m ²	50	KNAUF INSULATION Laine de Verre ECOSE SmartFaçade 32 BP 160mm R=5,00 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.1)
Laine de roche	1m ²	50	KNAUF INSULATION Laine de roche SmartRoof All-Fix B 160 mm (hors accessoires de pose) (v.1.1)
Siporex	1m ²	50	Siporex Carreau 10 (v.1.1)
Fibre de bois	1m ²	50	PARNATUR ISOLANT FIBRE DE BOIS 200 mm d'épaisseur, R = 5,10 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.2)
Bardage	1m ²	50	Bardage en PVC [ép entre 8 et 20mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Bardage bois	1m ²	50	Bardage, en douglas français, avec et sans finition, fabriqué en France. (v.1.2)
Ossature bois	1m3	100	Élément d'ossature en bois de France, toutes essences (v.1.4)



Isolants toits

Polystyrène expansé	1m ²	50	Isolant thermique et acoustique pour toitures terrasses en polystyrène expansé [R=5 m ² .K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1,2)
Laine de verre	1m ²	50	KNAUF INSULATION Laine de Verre ECOSE KI Fit 032 160 mm R=5,00 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.3)
Laine de roche	1m ²	50	KNAUF INSULATION Laine de roche SmartRoof All-Fix B 160 mm (hors accessoires de pose) (v.1.1)
Ouate de cellulose	1m ²	50	Ouate de cellulose PAVAFLOC / PAVACELL / VALOCELL / DOUCCELL par insufflation 220 mm R=5,2 (v.1.2)
Fibre de bois	1m ²	50	PARNATUR ISOLANT FIBRE DE BOIS 200 mm d'épaisseur, R = 5,10 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.2)
polyuréthane	1m ²	50	Panneau d'isolation en mousse rigide de polyuréthane Eurothane® Br-Bio (F) 100 mm d'épaisseur R= 4,50 m ² .K/W (hors accessoires de pose) (v.1.3)
plaqué de platre	1m ²	50	Plaque de plâtre Placoplatre® BA 13 (hors ossatures) (v.1.7)
Ossature	1ml	50	Ossatures pour cloisons et contre-cloisons : montants et rails (v.1.1) (collectif)
Tasseaux bois	1m3	100	Élément d'ossature en bois de France, toutes essences (v.1.4)
Pare vapeur	1m ²	50	Pare-vapeur en polypropylène - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Pare pluie	1m ²	50	Pare-pluie en polyester - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.1)
isolant réfléchissant	1m ²	50	Isolant alvéolaire réflecteur HYBRIS 33 140 mm (v.1.1)

Menuiseries

DV bois	1m ²	30	Fenêtre en bois Menuiserie Riche - double vitrage (v.1.1)
TV bois	1m ²	30	Fenêtre en bois Menuiserie Riche - triple vitrage (v.1.1)
DV TV PVC	1m ²	30	Fenêtres et Portes-fenêtres PVC IN ALPHA et vitrage d'épaisseur de verre cumulée maximum de 12 mm (v.1.3)
DV alu	1m ²	30	Fenêtre 2 vantaux en profilés aluminium ≤ 2,3 m ² (v.1,1) (collectif)
TV alu+bois	1m ²	25	Fenêtre triple vitrage en bois-aluminium [Uw = 0,8 W/(m ² .K)] [Gestion durable] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)

Occultations

VR PVC	1m ²	30	Volet roulant PVC manuel (v.1.2)
VR/VB bois	1m ²	25	Volet battant ou coulissant en essence européenne traitée manuel (v.1.2)
VR alu	1m ²	30	Volet roulant aluminium manuel (v.1.2)
Volet persienne PVC	1m ²	30	Volet persienne en PVC - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.1)
Volet persienne en Acier	1m ²	25	Volet persienne en Acier - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Brise soleil	1m ²	50	Brise soleil Aluminium SURYA et lames acoustiques (v.1.1)



Chauffage

chaudière gaz mixte	1u	17	Ariston Chaudière à condensation Alteas One+ Net 24 assurant le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire d'un logement individuel (v.1.1)
PAC Air Eau chauffage	1u	17	Ariston Nimbus compact 50 M net R32 Pompe à chaleur AIR/EAU monobloc assurant le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire pour le logement individuel (v.1.1)
Poêle à bois granulé	1u	15	Poêle à bois granulés en acier (v,1,2) (collectif)
Poêle à bois buche	1u	20	Poêle à bois bûche en acier (v,1,2) (collectif)
Chaudière granulé	1u	17	Chaudière bois granulés assurant le chauffage seul [P=17 à 28kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v,1,2)
Chaudière fioul	1u	16	Chaudière fioul [P=25kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT
Chaudière bois	1u	21	Chaudière biomasse individuelle [P=65kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Chaudière électrique	1u	15	Chaudière électrique [P=16kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.1)

ECS

Ballon thermodynamique 200l	1u	17	Chaffoteaux Aquanext Plus Link 200L R-513A Chauffe-eau thermodynamique assurant la production d'eau chaude sanitaire accumulée (v.1.3)
Ballon ECS 200l	1u	15	Chauffe-eau électrique [Capacité entre 50 et 200L] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT
Chauffe eau solaire 200l	1u	15	Chauffe-eau solaire individuel [Capacité = 200L] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)

Emetteurs

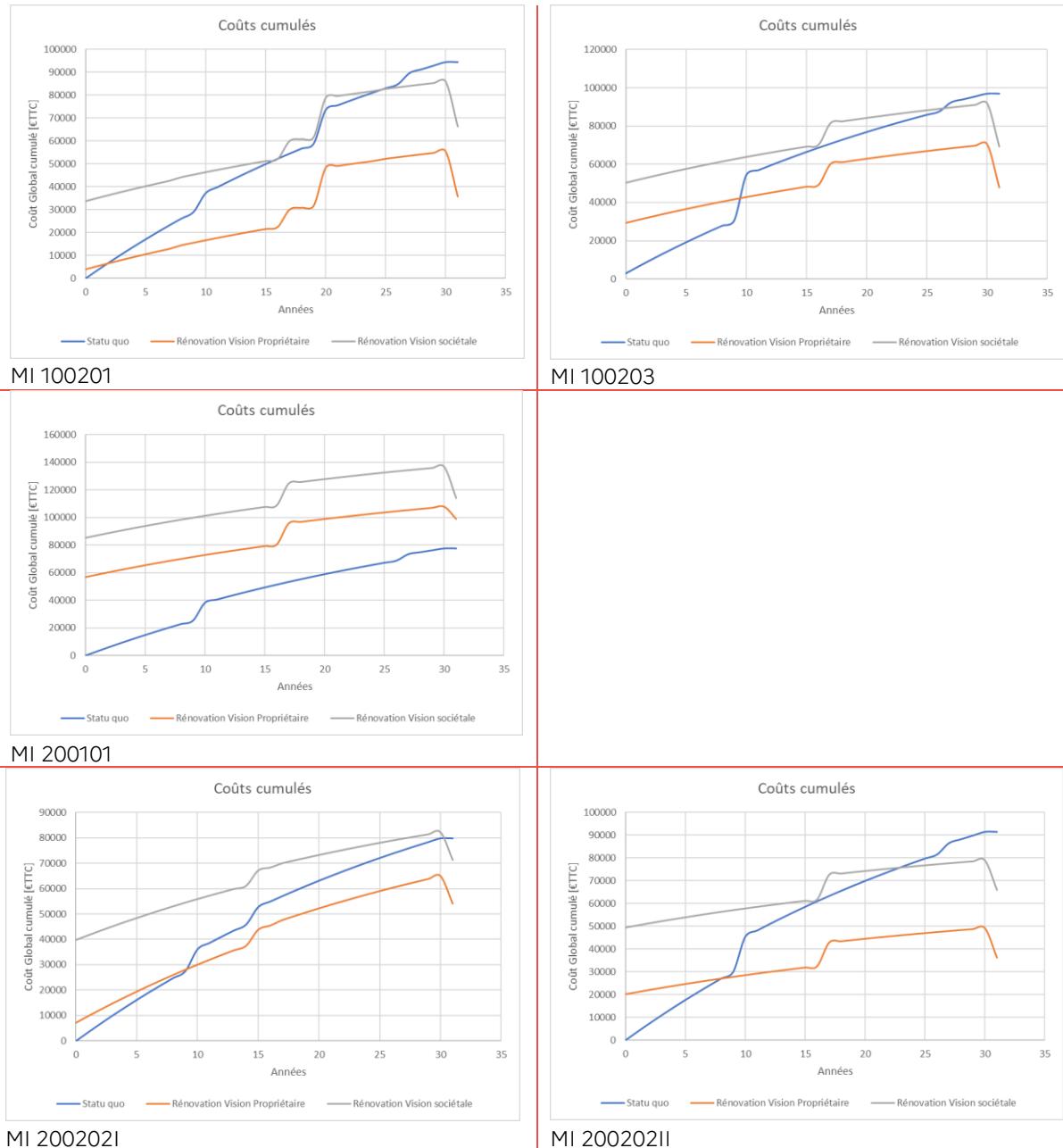
Radiateur eau chaude	1u	50	Gamme de radiateur eau chaude CLASSIC (v.1.1)
Convector électrique	1u	17	NEOMITIS - Optalys /Aloé Digital - Radiateurs - RFLD100AMSE14 (v.1.3)
Plancher chauffant	1ml	50	CANALISATIONS D'HYDRODISTRIBUTION MULTICOUCHEs (v.1.2) (collectif)
Multicouche	1ml	50	CANALISATIONS D'HYDRODISTRIBUTION MULTICOUCHEs (v.1.4) (collectif)

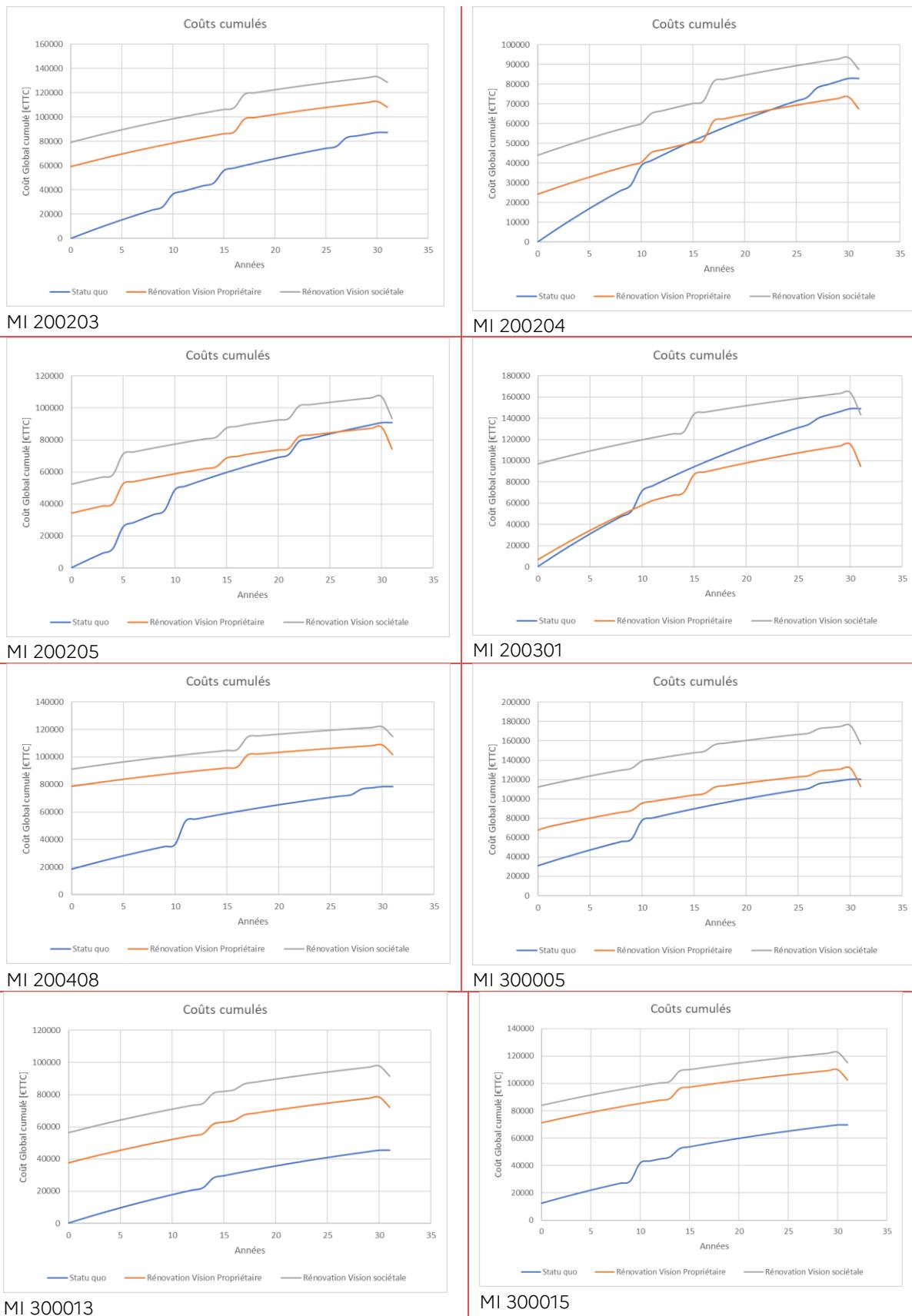
Ventilation

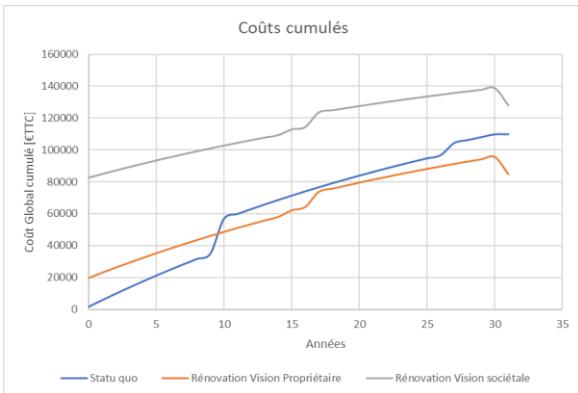
VMC SF Hygro B	1u	17	Sirius X ECM : caisson VMC C4 (v.1.1)
VMC DF	1u	17	Caisson de ventilation individuelle double flux [Débit compris entre 135 et 210 m3/h] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)
Gaines	1ml	30	Conduits flexibles [DN=200mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.2)



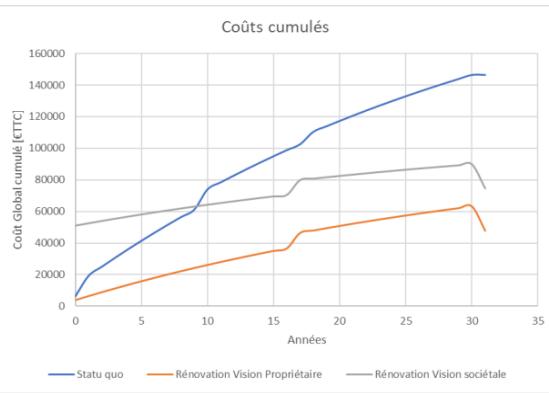
13. Annexe 2 : Graphe des coûts cumulés de chaque MI



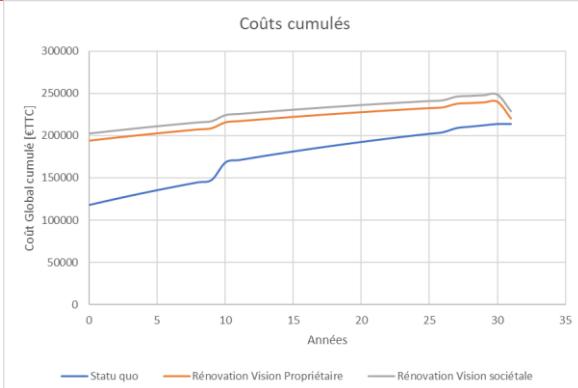




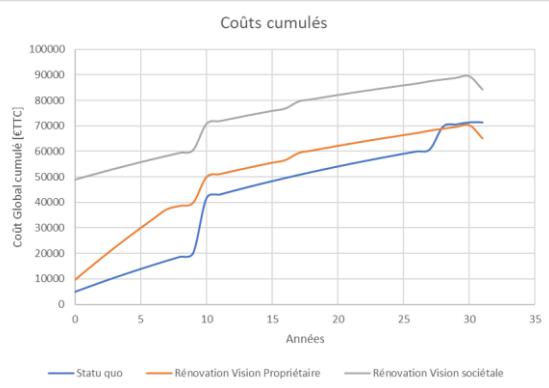
MI 300023



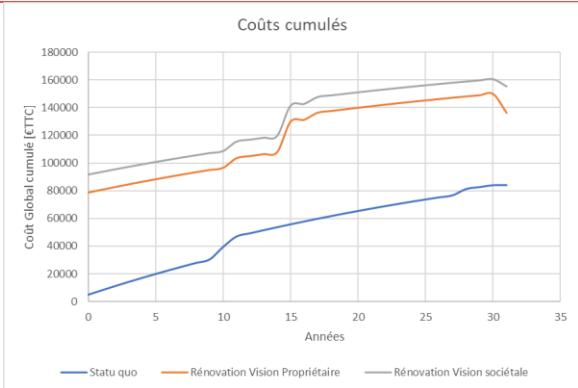
MI 300032



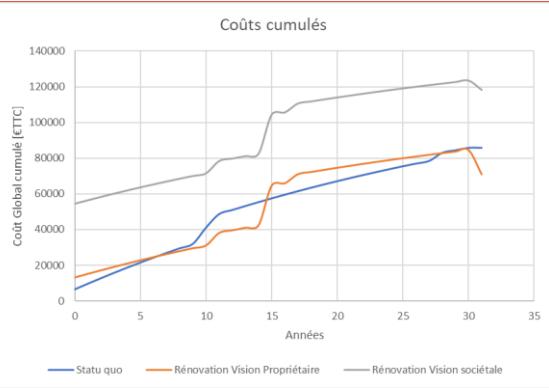
MI 300043



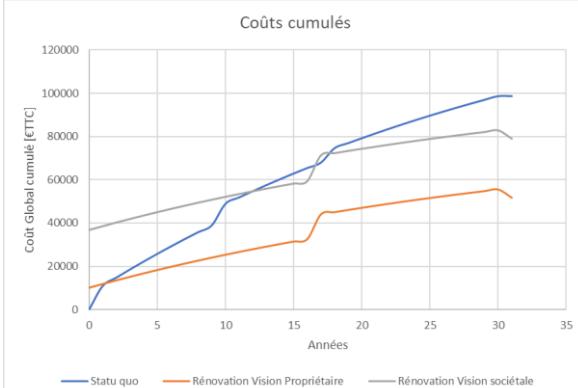
MI 300054



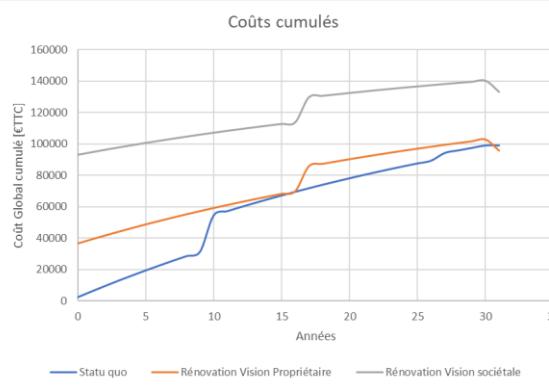
MI 300056



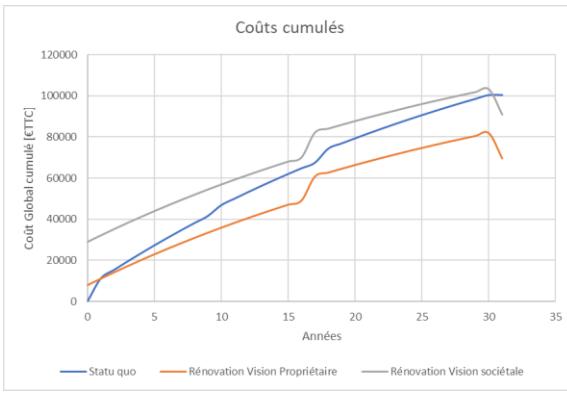
MI 300061



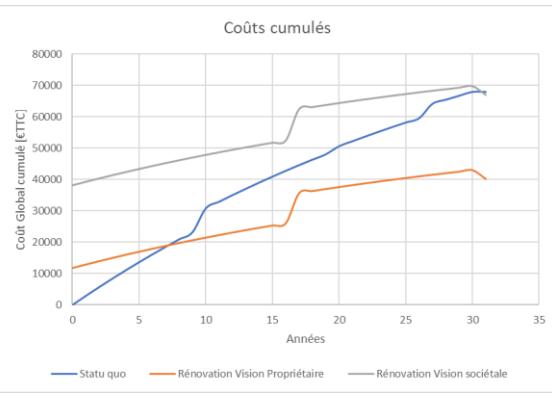
MI 300102



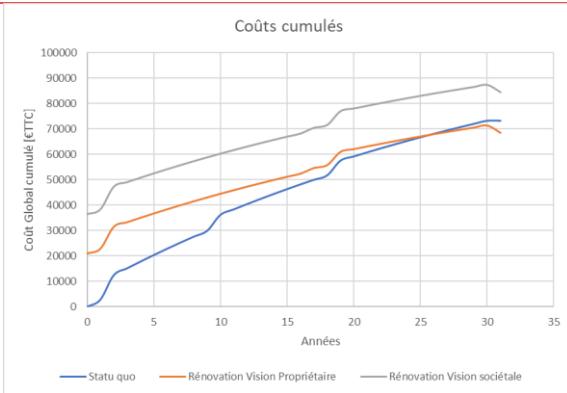
MI 300103



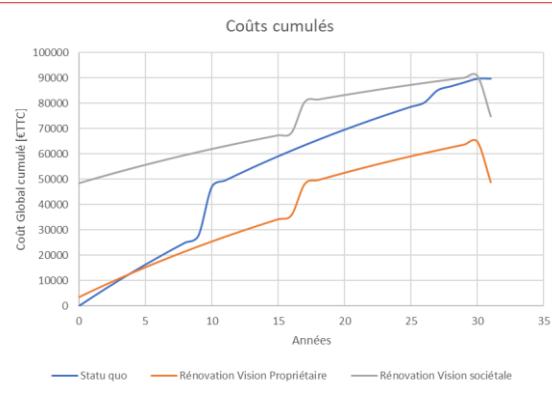
MI 300104



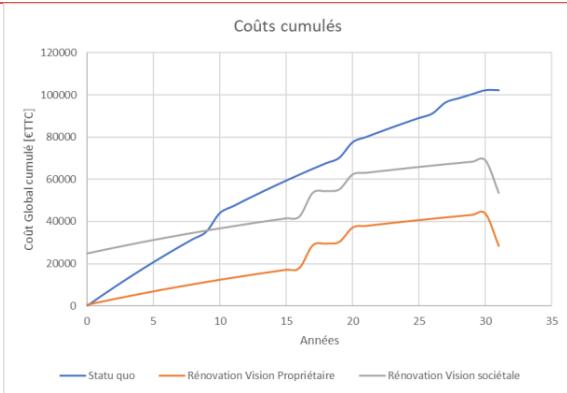
MI 500101



MI 500308



MI 600101



MI 700102

Le tableau suivant présente la synthèse des maisons classés selon 3 catégories de temps de retour en coût global :

- Celles avec un temps de retour en cout global en vision propriétaire faible mais fort en vision sociétales : projets sur lesquels les aides ont été utiles
- Celles avec un mauvais temps de retour (> 22 ans) selon les deux visions
- Celles avec un bon temps de retour (< 11 ans) selon les deux visions.

Tableau 39: Temps de retour en Coût Global des projets

Temps de retour en coût global	N°	Ambition de rénovation	Gain
Proprio < 10 ans ; Societal > 25 ans	100201	4. Coup de pouce	Très faible
	100203	4. Coup de pouce	Très faible
	200301	5. BBC Rénovation	Faible
	300023	5. BBC Rénovation	Faible

	300104	3. Première étape BBC Rénovation	Moyen
	500101	3. Première étape BBC Rénovation	Moyen
	600101	2. Dernière étape BBC Rénovation	Très faible
	200202I	5. BBC Rénovation	Faible
	200202II	4. Coup de pouce	Moyen
> 22 ans dans tous les cas	200101	5. BBC Rénovation	Très faible
	200203	2. Dernière étape BBC Rénovation	Très faible
	200204	4. Coup de pouce	Moyen
	200205	2. Dernière étape BBC Rénovation	Faible
	200408	5. BBC Rénovation	Très faible
	300005	5. BBC Rénovation	Très faible
	300013	2. Dernière étape BBC Rénovation	Très faible
	300015	2. Dernière étape BBC Rénovation	Très faible
	300043	5. BBC Rénovation	Faible
	300054	2. Dernière étape BBC Rénovation	Très faible
	300056	5. BBC Rénovation	Très faible
	300061	2. Dernière étape BBC Rénovation	Très faible
	300103	5. BBC Rénovation	Faible
	500308	3. Première étape BBC Rénovation	Très faible
< 11 ans dans tous les cas	300032	5. BBC Rénovation	Fort
	300102	3. Première étape BBC Rénovation	Très fort
	700102	4. Coup de pouce	Moyen

On note que toutes les ambitions sont représentées dans les différentes catégories de temps de retour en coût global. On note aussi que dans la catégorie temps de retour < 11 ans dans tous les cas on retrouve les projets au gain de consommation à l'usage qualifié de fort et très fort.

L'ADEME EN BREF

Au cœur des missions qui lui sont confiées par le ministère de la Transition écologique, le ministère en charge de l'Energie et le ministère en charge de la Recherche, l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - partage ses expertises, coordonne le financement et la mise en œuvre de projets de transformation dans plusieurs domaines : énergie, économie circulaire, décarbonation, industrie, mobilité, alimentation, adaptation et sols.

Elle mobilise les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, et leur donne les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Résolument engagée dans la lutte contre le changement climatique et la dégradation des ressources, l'ADEME conseille, facilite et aide au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. Elle met ses capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC).

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.

EXPERTISES



BILAN CARBONE PAR L'ACV ET COUT GLOBAL

Ce rapport du projet Perf in Mind II évalue la pertinence environnementale et économique de la rénovation énergétique de maisons individuelles via l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et le Coût Global (ACG). Sur un échantillon d'une trentaine de logements, l'étude compare la rénovation au statu quo sur une durée de 30 ans.

Les résultats environnementaux sont positifs : le temps de retour carbone est systématiquement inférieur à 30 ans, et sous les 5 ans pour 74 % des cas. Les leviers principaux identifiés sont la décarbonation du chauffage (bois, PAC) et le traitement des passoires thermiques. Économiquement, le coût global est favorable à la rénovation dans 73 % des cas. Toutefois, pour les rénovations ambitieuses type BBC, les aides financières restent indispensables pour assurer la rentabilité du point de vue du propriétaire face à l'investissement initial.

L'étude confirme que la rénovation performante est systématiquement bénéfique pour le climat, avec un retour sur investissement carbone souvent inférieur à 5 ans.

