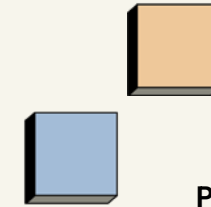


PROJET DE DÉFINITION D'UNE TRAJECTOIRE CARBONE DES MONUMENTS HISTORIQUES

RAPPORT FINAL



© Les Contamines - Montjoie, Église Trinité. Photo : archipat



PORTEUR PRINCIPAL DU PROJET

La compagnie des Architectes en chef des monuments historiques, représentée par Martin Bacot et Christophe Batard.

PORTEURS ASSOCIÉS

L'association des architectes du patrimoine, représentée Marie Jeanne Jouveau et Pauline Voisin.

Le Cerema, représenté par Louis Bourru, Marianne Villey et Anissa Ben Yahmed.
L'OPPIC, Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers du Ministère de la Culture, représenté par Daniela Miccolis et Hugues Wilhelem.

AUTEURS

Étude conduite et rédigée par Carbone 4 :

- Gabrielle Guidetti, manager responsable du projet
- Chloé Marzin, consultante contributrice principale
- Pierre Pallot-Lange, consultant contributeur principal
- Jeanne Callec, consultante contributrice principale

Avec la contribution de Victorine Daubies, Aïda Tazi, Martin Blondeel, Natan Leverrier, Paco Vadillo, Maylïs Portmann.

Mise en page : Jade Bégards et Matthieu Rey
Graphisme : Clothilde Carton et Charlotte Perrier Janitor
Relecture : Christine Hoarau-Beauval

PARTENAIRES PRINCIPAUX

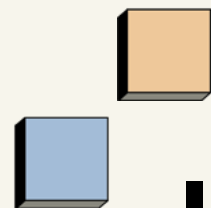
Le Groupement des entreprises de restauration de monuments historiques, représenté par Jean Christophe Mary, Marion Rogar puis Diana Anghel.
Le Centre des Monuments Nationaux, représenté par Jean Philippe Alloin, Adeline Rabaté et Gaëlle Chériaux.
L'École de Chaillot, représentée par Jean Marc Zuretti et Delphine Aboulker.

L'équipe remercie toutes les expert·es sollicité·es durant cette étude.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	6
Contexte de l'étude	7
État des lieux des connaissances	9
Le bâtiment, un secteur clé pour l'atteinte de la neutralité carbone en France	9
Une littérature émergente sur l'impact carbone des travaux de rénovation	10
Approche méthodologique générale.....	11
Périmètre de l'étude.....	11
Quelques principes clés pour le calcul de l'empreinte carbone.....	13
Construction d'une trajectoire de décarbonation propre aux MH	13
Création d'un outil de mesure de l'empreinte carbone d'une opération	13
LES CHIFFRES CLÉS	15
Une forte dépendance aux énergies fossiles	16
La restauration : une pratique intrinsèquement sobre	16
RÉSULTATS DU VOLET ÉNERGIE DE L'EMPREINTE CARBONE DES MH	18
Méthodologie de calcul.....	19
Provenance des données.....	19
Limite d'une approche méthodologique basée sur la BDNB	19
Calcul des émissions.....	20
Analyse des résultats	21
Principaux résultats énergie	21
Résultats à l'échelle du parc des monuments historiques (en absolu)	21
Résultats en intensité à l'échelle d'un bâtiment	22
Zoom sur les résultats du résidentiel.....	22
Zoom sur les résultats du culte	24
Les leviers de décarbonation de l'énergie d'exploitation des MH	26
Les leviers de sobriété	26
Les leviers d'efficacité	27
Les leviers de substitution.....	27
Le rôle des différentes parties prenantes	28
La trajectoire de décarbonation de l'énergie d'exploitation à horizon 2035 et 2050	28
Résultats de la trajectoire quantifiée.....	29
Conclusions et messages clés	32
RÉSULTATS DU VOLET TRAVAUX DE L'EMPREINTE CARBONE DES MH	33
Approche méthodologique	34
Approche de travail et collecte de données.....	34
Méthode de traitement et de calcul des données.....	35
Approche en analyse de cycle de vie	36
Extrapolation des résultats à l'ensemble des travaux réalisés sur une année.....	37

Résultats de l'empreinte carbone d'une opération de restauration	37
Résultats généraux	37
Focus et détails sur les émissions	39
Résultats extrapolés au parc des MH	40
Conclusion et principaux apprentissages sur l'empreinte carbone des travaux	40
Les leviers de décarbonation des opérations de travaux	41
Les leviers de décarbonation des chantiers	42
Vers une trajectoire quantifiée	45
Création d'un outil de calcul de l'empreinte carbone d'une opération de restauration	45
Objectif de l'outil.....	45
Méthodologie de construction de l'outil.....	45
Exemple de création de FE – Cas du nettoyage par micro-abrasion	46
Principes d'utilisation de l'outil.....	47
Conclusions et messages clés	48
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	49
Principaux enseignements.....	50
Limites de l'étude	50
Pistes pour aller plus loin	51
ANNEXE I : GLOSSAIRE	52
Glossaire	53
ANNEXE II : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
Références Bibliographiques.....	55
Sources de données.....	55
Autres références	55
ANNEXE III : ÉTUDES DE CAS SUR 3 OPÉRATIONS DE RESTAURATION	57
Présentation de l'étude de cas de l'Église d'Étretat.....	58
Présentation du projet	58
Présentation de l'étude de cas de la Cour d'Appel de Dijon	60
Présentation du projet	60
Présentation de l'étude de cas de l'Hôtel de Ville de Vincennes	62
Présentation du projet	62
ANNEXE IV : DÉTAILS SUR LE VOLET ÉNERGIE DE L'EMPREINTE ET DE LA TRAJECTOIRE CARBONE DES MH	64
ANNEXE V : DÉTAILS SUR LE VOLET TRAVAUX DE L'EMPREINTE ET DE LA TRAJECTOIRE CARBONE DES MH	65
OUTIL EMPREINTE PATRIMOINE	66



INTRODUCTION

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Ce projet est porté par les Architectes en Chef des Monuments Historiques (ACMH), l'Association des Architectes du Patrimoine (AAP), l'Oppic (Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers du Ministère de la Culture) et le Cerema, en partenariat avec l'École de Chaillot, le GMH (Groupement des entreprises de restauration des monuments) et le Centre des Monuments Nationaux (CMN). Il est soutenu financièrement par l'État dans le cadre du dispositif « Soutenir les alternatives vertes 2 » de France 2030, opéré par la Banque des territoires (Caisse des Dépôts) et par la Direction générale des patrimoines et de l'architecture (DGPA) du ministère de la Culture.

Dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas Carbone et des réglementations visant à réduire l'impact carbone du secteur du bâtiment en France, le bâti existant est, pour l'instant, soumis à une approche strictement énergétique (à travers le DPE et le Décret Tertiaire par exemple). A contrario, la construction neuve est soumise à des objectifs carbone couvrant l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, proposant ainsi une vision plus globale de l'impact carbone.

Dans ce cadre, le secteur ne dispose pas de connaissances quantitatives fiables sur l'impact carbone de l'ensemble du cycle de vie d'une opération de restauration du bâti patrimonial, les études s'étant jusqu'à présent concentrées sur l'amélioration de la performance énergétique ou le poids carbone d'opérations de rénovation d'ampleur. Il existe des outils et méthodes d'évaluation de l'impact carbone des interventions sur l'existant, mais celles-ci évaluent principalement des actions de remplacement à neuf dans une logique de rénovation, basés sur la bibliothèque des FDES établie par les fabricants de matériaux neufs. L'impact carbone de l'action spécifique de conservation-restauration du matériau ancien n'est ainsi pas quantifiable faute d'outil adapté, et ne peut être mise en regard des stratégies énergétiques pour éclairer les choix d'intervention.

L'étude vise à combler le manque de connaissances en établissant un état des

lieux des émissions de GES de la filière des monuments historiques et à identifier les leviers de décarbonation propres au secteur. En apportant des éléments quantitatifs sur le poids carbone actuel, cette étude cherche à contribuer au débat public en apportant des axes de travail pour que les monuments historiques (MH), et plus généralement les bâtiments anciens, puissent faire leur part dans la transition écologique de la France. L'étude a également pour ambition de vérifier certaines intuitions, notamment celle selon laquelle la restauration patrimoniale serait intrinsèquement sobre en carbone.

En première approche, le patrimoine apparaît porteur d'atouts en matière de carbone. La construction traditionnelle ayant recours à des matériaux peu ou pas transformés et locaux, sa restauration maintient des filières à faible impact carbone. Le caractère peu transformé des matériaux de dépose permet leur emploi après tri ou leur recyclage pour favoriser la circularité du chantier, vecteur d'économie carbone. Aussi, la conservation raisonnée de la matière ancienne repose sur la maîtrise technique de la substitution sélective et de la réparation. Les savoir-faire de la restauration ouvrent ainsi un champ considérable pour le développement d'une approche plus économe en carbone pour l'ensemble du secteur de la construction. L'évaluation de ce gain reste toutefois à quantifier : quantification des émissions des actions propres à la restauration ; évaluation de la part relative de l'impact carbone lié à l'usage des bâtiments (la consommation énergétique) et celle liée aux matériaux mis en œuvre, sur un cycle de vie (par convention établi à 50 ans) en tenant compte des durabilités réelles des matériaux.

Les acteurs de la conservation du patrimoine bâti font l'hypothèse que le secteur dispose de leviers importants pour la maîtrise de l'impact carbone, l'économie des ressources, et la réduction des dépenses énergétiques. Cette ambition a conduit un groupe transversal d'acteurs du secteur des MH à engager un projet de bilan et trajectoire carbone du secteur, et la création d'un outil de quantification carbone adapté à la restauration.

En raison de la disponibilité des données sectorielles de la Direction Générale des Patrimoine et de l’Architecture du ministère de la Culture, le parc d’étude retenu est celui du patrimoine bâti protégé au titre des monuments historiques, soit 45 000 monuments. Mais les réponses techniques apportées par l’étude pourront s’étendre au bâti traditionnel dont sont constitués les centres urbains de la plupart des communes françaises.

En calculant la première empreinte carbone de la filière, l’étude permettra d’évaluer le niveau de dépendance aux énergies fossiles du secteur et ainsi identifier les risques de transitions auxquels les MH peuvent être confrontés dans le cadre de la décarbonation du secteur du bâtiment. L’objectif est ainsi de permettre aux acteurs de la filière de mettre en place un plan d’action permettant de réduire ces risques voir même de montrer l’exemple et d’ouvrir des perspectives d’action pour l’ensemble du secteur du bâti existant, au-delà des seuls édifices protégés.

L’étude s’articule autour de quatre principaux objectifs :

1. Caractériser et quantifier l’empreinte carbone du parc des MH et des travaux d’intervention par l’analyse des données disponibles,
2. Identifier les leviers d’action de décarbonation des MH et mettre en lumière les bonnes pratiques les plus sobres en carbone,
3. Outiller les architectes spécialisés dans l’intervention sur le patrimoine pour les aider à mieux prendre en compte les impacts carbone de leurs opérations de restauration dès la phase conception,
4. Diffuser largement les résultats de l’étude aux professionnels de la restauration du patrimoine bâti, via la publication et la transmission au sein de formation.

In fine, le projet doit permettre de construire une trajectoire de décarbonation propre aux MH, compatible avec les engagements climatiques de la France et avec la préservation patrimoniale. Ainsi, l’étude cherche à positionner le patrimoine comme un laboratoire de solutions durables pour l’ensemble du bâti existant. Son ambition

est d’accélérer la prise de conscience de tout l’écosystème du patrimoine bâti en France, en s’appuyant sur l’exemplarité et la reconnaissance des MH.

Ce rapport présent les résultats de l’étude qui a été conduite entre septembre 2024 et décembre 2025. Le rapport est organisé de la manière suivante :

- Introduction : pour présenter le contexte de l’étude et l’approche méthodologique générale suivie ;
- Chiffres clés : pour présenter les résultats généraux de l’empreinte globale du secteur ;
- Construction d’une trajectoire de décarbonation pour l’exploitation des MH : pour présenter les résultats de l’empreinte carbone liés à la consommation énergétique des monuments historiques et la trajectoire de décarbonation associée ;
- Évaluation de l’empreinte carbone d’une opération de restauration d’un MH : pour présenter les résultats de l’empreinte carbone liés aux travaux de restauration et identifier les bonnes pratiques de restauration bas carbone ;
- Conclusion : pour rappeler les principaux apprentissages de l’étude et identifier les pistes de travail pour poursuivre la réflexion.

ÉTAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES

Le bâtiment, un secteur clé pour l’atteinte de la neutralité carbone en France

Le secteur du bâtiment joue un rôle central dans l’atteinte de la neutralité carbone en France, étant le deuxième secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre (29 % des émissions territoriales) et un grand consommateur d’énergie¹. Pour respecter l’Accord de Paris et la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)², dont une version « projet » a été publié en décembre 2025, ce secteur doit réduire ses émissions d’exploitation de 60 % entre 1990 et 2030 et de 97 % à 2050. La rénovation énergétique du parc existant est identifiée comme un levier prioritaire pour atteindre les objectifs nationaux, à l’horizon 2050. Si la réglementation environnementale RE2020³ encadre la construction neuve, la rénovation elle fait l’objet de plusieurs mesures incitatives mais peine à atteindre le rythme attendu pour respecter les engagements de la France en termes de décarbonation.

En revanche, à date, aucune réglementation n’existe pour encadrer l’empreinte carbone de la rénovation, à l’instar de la RE2020 qui fixe des seuils de performance carbone pour le carbone embarqué dans les matériaux de construction. Cependant, les impacts matière de la rénovation sont non négligeables. D’après les premiers travaux sur le sujet⁴, l’empreinte carbone des matériaux peut aller de 50 % à 100 % de celui d’une construction neuve, soit environ entre 350 kgCO₂e/m² et 700 kgCO₂e/m² en fonction du type de travaux. En l’absence de cadre réglementaire, les acteurs de la rénovation font donc face à un manque de données sur l’impact carbone d’une opération de rénovation car ces opérations ne sont pas soumises à des analyses de cycle de vie (ACV) pour mesurer l’empreinte carbone des travaux, à l’inverse du neuf avec la RE2020.

Dans ce paysage réglementaire, le bâti ancien (construit avant 1948, et qui représente un tiers du parc existant) et patrimonial se trouve dans une situation délicate : il est au centre des objectifs de décarbonation de la France, mais il ne dispose pas encore des outils nécessaires pour accompagner sa décarbonation de manière efficace. Les méthodes de calcul actuelles, comme le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE), sont jugées inadaptées aux caractéristiques hygrothermiques du bâti ancien, risquant d’entraîner des travaux inappropriés qui détériorent le patrimoine. Massifier les travaux de rénovation, sans étudier précisément les caractéristiques hygrothermiques des bâtis anciens en amont, peut donc présenter des risques majeurs à la fois pour la durabilité des constructions (et donc pour les enjeux carbone associés), pour le confort des usagers et pour les valeurs patrimoniales. Face à ces risques, les acteurs du patrimoine demandent des approches plus adaptées, qualifiées de « réhabilitation responsable » plutôt que de simple rénovation énergétique.

Le patrimoine protégé au titre des Monuments Historiques (MH), qui compte plus de 45 000 monuments⁵, est au cœur de cet enjeu. Chaque monument ou site architectural protégé présente une valeur patrimoniale caractérisée par un intérêt historique, archéologique, artistique, scientifique, social, vernaculaire ou technique. Ce parc est riche et diversifié, composé majoritairement d’architecture domestique (maison, immeuble, château, représentant 40 % des MH) et religieuse (représentant 30 % du parc), le reste du parc est assez divers, allant d’hôpital à théâtre (voir *Figure 1*). La conservation et la restauration du patrimoine comporte un enjeu politique et social de transmission de ces caractéristiques passées aux générations présentes et futures. Au-delà du maintien physique des bâtiments, les travaux sur le patrimoine soutiennent et la transmission de savoir-faire spécialisés⁶.

¹ Feuille de route décarbonation du cycle de vie du bâtiment, CNTE,

² Version projet de la SNBC 3 est disponible en ligne, après la période de consultation elle doit être adoptée par décret au printemps 2026 : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/3e-strategie-nationale-bas-carbone-snbc-3>

³ Réglementation environnementale et énergétique de l’ensemble de la construction neuve, prévue dans le cadre de la loi ELAN de 2018 et mis en œuvre par décret à partir de 2021 pour une entrée en vigueur à partir de 2022 : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/reglementation-environnementale-re2020https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/3e-strategie-nationale-bas-carbone-snbc-3>

⁴ Retours d’expérience du Hub des prescripteurs bas carbone (IFPEB).

⁵ Ministère de la Culture. *Bilan de la protection au titre des MH - Les chiffres clés au 1er janvier 2024*.

⁶ Ministère de la culture. *Bilan 2023 des crédits consacrés à la conservation des MH*.

Bien que ces bâtiments bénéficient d'un statut de protection et fassent l'objet de prescriptions particulières pour leur surveillance, leur entretien et les travaux, sous la supervision d'experts (Architectes en chef des monuments historiques, Architectes du patrimoine), on peut craindre que des réglementations inadaptées nuisent à la préservation du patrimoine. Inversement, la non prise en compte des impératifs de décarbonation du parc de MH présente un risque important de transformant ces monuments en actifs échoués, c'est-à-dire des actifs qui ne sont plus en mesure de remplir leur fonction. Toutefois, par leur durabilité et les savoir-faire qu'ils mobilisent, les MH possèdent des atouts pour jouer un rôle d'exemplarité dans la transition bas carbone.

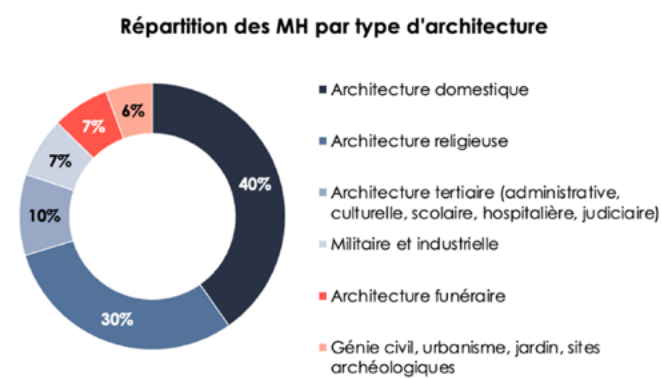


Figure 1 : Analyse et traitement par Carbone 4 à partir de la base Mérimée

Sur le territoire français, au 31 décembre 2023, sont dénombrés 14 317 immeubles classés et 30 763 Immeubles inscrits, soit un total de 45 080 immeubles protégés au titre des monuments historiques⁷.

Par leur protection, les bâtiments classés ou inscrits au titre des monuments historiques font figure d'exception dans le patrimoine français. Cette protection leur apporte de nombreux atouts spécifiques :

- Une reconnaissance officielle par l'État de leur intérêt patrimonial et des valeurs culturelles, d'image, sociale, d'usage, foncière et/ou refuge associées,
- Une reconnaissance par le grand public, grâce à leur mise en valeur,
- Une documentation détaillée sur leur histoire et leur conception fonctionnelle et technique,

- Des pratiques de restauration préventives et curatives, qui favorisent la réparation, le maintien des matériaux et la substitution sélective de matériaux qui sont pour le bâti traditionnel majoritairement géo-biosourcés locaux et réemployables,
- Un écosystème de professionnels experts sur les caractéristiques techniques des bâtis patrimoniaux (architectes, maîtres d'ouvrages et entreprises spécialisées en restauration et intervention sur le bâti patrimonial),
- Un régime dérogatoire vis-à-vis des réglementations existantes, afin de garantir la préservation des caractéristiques patrimoniales
- Un système d'aides financières spécifiques, visant à soutenir des pratiques d'intervention patrimoniales ne bénéficiant pas des effets de masse du secteur de la construction conventionnelle.

Ainsi, grâce à leur statut de protection et à leur rayonnement, les MH possèdent des réelles forces leur permettant de jouer un rôle d'exemplarité dans la transition bas carbone des bâtis anciens.

Une littérature émergente sur l'impact carbone des travaux de rénovation

Actuellement, les connaissances sur l'impact carbone des opérations de rénovation restent limitées bien que plusieurs acteurs se saisissent du sujet depuis quelques années. Contrairement à la construction neuve soumise à la RE2020, la rénovation ne fait pas l'objet d'Analyses de Cycle de Vie (ACV) réglementaires. Par conséquent, les données sur la rénovation sont lacunaires, alors même que l'impact matière d'une rénovation peut représenter 50 % à 100 % de celui d'une construction neuve (entre 350 et 700 kgCO₂e/m²). Des initiatives existent, portées par des organismes comme le Cerema, le Hub des prescripteurs bas carbone, l'Alliance HQE-GBC et AIA Environnement (à travers l'étude NZC Rénovation) ou le label BBKA, pour tenter de combler ce vide, mais elles se heurtent à un obstacle majeur : le manque de Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) pour les produits de construction anciens, traditionnels ou issus du réemploi. Aussi, il est difficile de

mener une analyse globale et comparative des travaux de rénovations car les résultats et méthodes dépendent fortement des caractéristiques de chaque bâtiment et des mesures de rénovation mises en œuvre.

Concernant spécifiquement le patrimoine, il existe à ce jour très peu de cas d'études mesurant l'empreinte carbone de l'énergie et des matériaux pour les Monuments Historiques. Il n'existe à ce jour aucune donnée consolidée sur la consommation énergétique globale ni sur l'empreinte carbone de ce parc. Seuls quelques cas isolés ont été étudiés ou sont en cours d'analyse via des acteurs tels que le Centre des monuments nationaux (CMN). Certaines initiatives se concentrent souvent sur la conciliation entre performance énergétique et préservation patrimoniale, comme le label expérimental « Effinergie Patrimoine ». Les retours d'expérience tendent à démontrer que si le niveau de performance énergétique BBC est atteignable, le diagnostic patrimonial reste souvent incomplet. Par ailleurs, le centre de ressources CREBA⁸ participe à la diffusion des connaissances sur la réhabilitation du bâti ancien en tenant notamment compte des valeurs architecturales et patrimoniales du bâti.

De plus, la filière fait face à une limite structurelle liée aux compétences. Les architectes et bureaux d'études formés aux spécificités patrimoniales sont minoritaires, et il est difficile de trouver des thermiciens et ingénieurs capables de proposer des solutions techniques sobres et respectueuses du bâti. Il apparaît nécessaire de former l'ensemble de la filière aux spécificités des interventions sur le bâti ancien et à la prise en compte de l'impact carbone des choix d'intervention, notamment vis-à-vis des lots techniques.

Cet état des lieux met en lumière un paradoxe : alors que la « rénovation » est un axe majeur de la stratégie nationale bas carbone (SNBC), la mesure réelle de ses impacts carbone, en particulier pour le bâti ancien et patrimonial, reste embryonnaire et se heurte à des limites méthodologiques et techniques.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE GÉNÉRALE

Périmètre de l'étude

Pour déterminer le périmètre de l'étude, nous nous sommes basés sur les principes suivants :

- **Représentativité** : respecter la répartition des MH par grande typologie d'architecture, et se concentrer sur les typologies les plus représentatives.
- **Pertinence** (par rapport au bâti existant) : s'assurer de la pertinence de l'étude par rapport au parc de bâtiment existant non protégé.
- **Significativité** par rapport aux enjeux carbone : se concentrer sur les typologies de bâtiment qui ont un poids carbone significatif.

Ainsi, l'étude couvre l'ensemble des monuments inscrits et classés, appartenant à des propriétaires privés ou publics, mais se concentre par souci de représentativité sur trois typologies principales : le logement (40 % du parc), le tertiaire (10 %) et les édifices de culte (30 %). Les typologies marginales ou peu consommatrices d'énergie (funéraire, militaire, ruines) sont exclues (voir Figure 2).

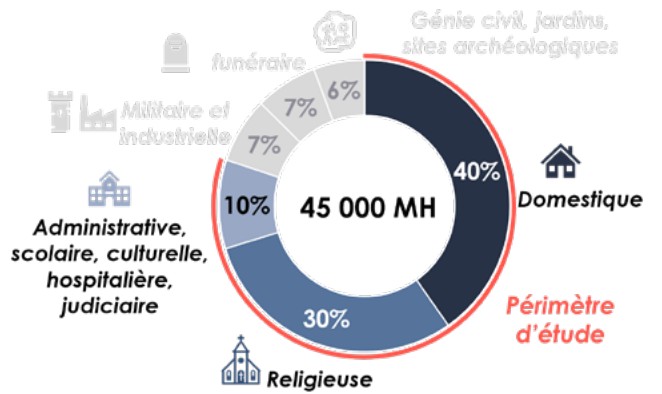


Figure 2 : Analyse de Carbone 4 à partir de la liste MH de la base Mérimée

Pour chaque catégorie de monuments étudiés, les architectes du groupe de travail ont proposé des typologies à cibler pour leur représentativité et pertinence (voir Figure 3).

S'agissant du périmètre fonctionnel de l'empreinte carbone, c'est-à-dire les postes d'émissions étudiés, l'étude se concentre sur les deux postes d'émissions principaux du bâtiment :

⁷ Ministère de la Culture. Bilan de la protection au titre des MH - Les chiffres clés au 1^{er} janvier 2024.

⁸ Centre de ressources pour la réhabilitation responsable du bâti ancien, piloté par le Cerema : <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/>

- **Les émissions liées aux consommations d'énergie du bâtiment.** Les usages concernés sont le chauffage, l'éclairage, la ventilation, la climatisation, l'eau chaude sanitaire, ainsi que les usages spécifiques ou mobiliers.
- **Les émissions liées aux interventions sur les MH, et en particulier les travaux de restauration.** Les travaux d'entretien ou de réhabilitation lourde avec changement d'usage sont exclus. À noter que les travaux de restauration (opérations avec un objectif de sauvegarde ou de rétablissement des valeurs patrimoniales de l'édifice) représentent 84 % des crédits attribués par les DRAC en 2023, donc loin devant les crédits d'entretien (ce qui comprend les nettoyages et renouvellement ponctuel à l'identique d'éléments d'usure).

Une approche en analyse de cycle de vie (ACV) est utilisée pour étudier l'impact des travaux de restauration, en considérant toutes les étapes du cycle de vie de l'opération de restauration (par souci de comparabilité, une durée de vie de 50 ans est retenue). Dans ce cadre, sont incluses les émissions liées :

- **À l'amont des matériaux** mis en œuvre : la fabrication, le transport des matériaux.
- **À leur mise en œuvre sur le chantier** : les consommations des engins et équipements sur le chantier.
- **À leur utilisation** : l'énergie consommée sur la durée de vie des équipements techniques installés pendant l'opération.

- **À la fin de vie** : la gestion des déchets générés et la fin de vie des matériaux.
- À noter que l'approche en cycle de vie porte sur l'opération de restauration et non pas sur le monument historique lui-même. À ce titre l'étude ne reconstituera pas l'éventuel impact carbone lié à la construction initiale du monument historique, ni aux autres travaux prévus sur le monument. En effet, s'il peut apparaître intéressant de quantifier la dépense carbone liée à la construction d'un édifice, cette dépense carbone initiale est négligeable soit par nature - par hypothèse, elle est quasiment nulle pour tous les édifices construits avant la révolution industrielle et l'avènement des énergies fossiles - soit par amortissement (les monuments étant conservés, ils ne relèvent pas des cycles théoriques de construction / usage / démolition sur 50 ans qui prévalent pour l'ACV des bâtiments neufs). L'impact carbone du monument historique sur une durée de 50 ans de vie est en revanche impacté essentiellement par sa dépense énergétique et par sa dépense en travaux, ce qui conduit à retenir ces deux postes d'émissions pour la construction d'un bilan et d'une trajectoire.
- Le périmètre d'émissions retenu pour cette étude exclue les émissions liées aux déplacements des visiteurs, bien qu'étant a priori significatives pour les monuments ouverts au public. Il serait souhaitable qu'elles fassent l'objet d'une prochaine étude à part entière, surtout si les MH continuent de

	Usage principal	Typologies ciblées	Exemple de type de construction
 LOGEMENT	Maisons	Logement individuel rural isolé	Construction vernaculaire en moellon ou en pan de bois
		Maison mitoyenne de tissus urbain ancien	
	Immeubles	Immeuble de Faubourg	Construction en moellon ou pierre de taille
		Immeuble du XX ^e	Construction en béton armé
 TERTIAIRE	Châteaux / manoirs	Châteaux et demeures de l'époque moderne (XVI ^e -XIX ^e)	Construction en maçonnerie avec combles charpentés
	Bureaux / enseignement / administration	Anciens hôtels particuliers ou édifices institutionnels reconvertis (XVII ^e -XIX ^e)	Construction en maçonnerie avec combles charpentés
	Commercial	Halle du XIX ^e	Construction métallique
 CULTE	Culture (musées / bibliothèques / archives)	Anciens hôtels particuliers ou anciens palais reconvertis (XVII ^e -XIX ^e)	Construction en maçonnerie avec combles charpentés
	Eglise / Chapelle	Eglise de taille moyenne (X ^e -XIX ^e)	Construction en maçonnerie, voutée

Figure 3 : Segmentation du parc de MH dans le cadre de l'étude

développer leur mise en valeur via l'ouverture touristique. Aussi, en se focalisant sur les résultats en émissions de CO₂e cette étude se limite à un axe d'analyse des impacts d'une opération de restauration ; en pratique il est indispensable de considérer de multiples facteurs (environnementaux, sociétaux, financiers et patrimoniaux) pour orienter les décisions d'intervention sur le parc.

Quelques principes clés pour le calcul de l'empreinte carbone

Le calcul d'empreinte carbone est un exercice pragmatique, dont les principes génériques sont les suivants :

- **Significativité** : une attention particulière est portée sur les postes a priori significatifs
- **Simplification** : des simplifications sont introduites pour les postes non-significatifs, avec une logique conservatrice (émissions plutôt surestimées que sous-estimées)
- **Extrapolations** : des extrapolations sont effectuées afin de parvenir à une couverture satisfaisante

Le calcul s'effectue sur une année de référence et le niveau de précision du calcul dépend de la granularité des données collectées qui diffèrent entre les émissions liées à l'énergie et les émissions liées aux matériaux. Ainsi, les méthodes de calculs de l'empreinte carbone de la filière des MH seront différentes selon la catégorie d'émissions (énergie ou matériaux).

Pour l'énergie, une approche macro a été suivie, consistant à estimer le poids carbone du parc des MH en s'appuyant sur des données et statistiques nationales (principalement la BDNB⁹ et la base Mérimée¹⁰).

Pour les matériaux, une approche micro a été suivie, qui s'appuie sur une collecte de données réelles sur un échantillon d'opérations de restauration, par grande typologies de MH. En raison d'une collecte de données difficile, l'étude porte sur onze opérations de restauration.

Une fois cette première étape réalisée, un travail de remise à l'échelle a été effectué, dans les deux sens :

- Pour l'énergie, de l'échelle macro vers l'échelle bâtiment : pour vérifier les données statistiques au regard de données spécifiques à l'échelle des bâtiments, collectées auprès d'exploitant des bâtiments ainsi que dans la littérature.
- Pour les matériaux, de l'échelle bâtiment à l'échelle macro : pour extrapoler les résultats obtenus sur un échantillon de MH à l'ensemble du parc et l'ensemble des opérations à l'aide d'hypothèses éclairées prises grâce aux données du ministère de la Culture (à travers son outil de pilotage et de gestion AgrEgée).

Concernant l'année de référence pour le calcul, l'année 2024 a été étudiée pour l'empreinte carbone liée à l'énergie, et pour le volet travaux des opérations de restauration de moins de 5 ans ont été retenues.

Construction d'une trajectoire de décarbonation propre aux MH

L'étude a pour objectif de construire une trajectoire de décarbonation propre aux monuments historiques en s'appuyant sur les résultats de l'empreinte carbone.

Pour le volet énergie au regard de la performance carbone des MH, la trajectoire de décarbonation vise à accélérer la transition du secteur des MH pour l'aligner avec les objectifs de la France. L'effort à fournir par les MH est étudié selon une modélisation du potentiel de réduction des leviers d'actions pertinents.

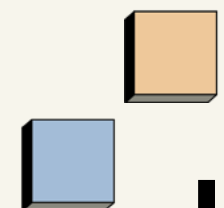
Pour le volet travaux de restauration, l'approche retenue vise à diffuser les bonnes pratiques identifiées et évaluées selon leur impact de décarbonation dans le cadre de l'étude.

Création d'un outil de mesure de l'empreinte carbone d'une opération

L'un des objectifs phare du projet est de créer un outil permettant d'estimer les émissions liées aux travaux de restauration, afin de servir d'outil d'aide à la décision à destination des maîtres d'œuvre lors de la conception de projets de restauration. Cette calcullette

⁹ Base de données nationale des bâtiments, opérée par le CSTB.
¹⁰ Base de données des monuments historiques, opérée par le ministère de la Culture.

carbone permet de modéliser l’empreinte carbone d’une opération de restauration en renseignant des données sur la nature de l’opération et les matériaux mis en œuvre. La création de fiches d’émissions spécifiques aux actes de la restauration-conservation constitue le volet le plus inédit de cet outil qui s’appuie par ailleurs sur les FDES de matériaux neufs existant pour constituer une base de données représentative du panel des actions, process et matériaux engagés dans la restauration. En revanche, l’outil ne permet pas de simuler la consommation énergétique du bâtiment, pour cela il faudra s’appuyer sur des études thermiques spécifiques.



LES CHIFFRES CLÉS

Cette étude, qui porte sur un périmètre représentatif de plus de 31 200 monuments historiques (MH) répertoriés dans la BNDB (voir p. 13) en France métropolitaine (couvrant les typologies résidentielles, tertiaires et cultuelles), permet pour la première fois de quantifier précisément le poids carbone du secteur. L’analyse a permis de mesurer pour la première fois les surfaces totales des MH en France, s’élevant à 33 millions de m².

UNE FORTE DÉPENDANCE AUX ÉNERGIES FOSSILES

L'enseignement majeur de l'empreinte carbone réalisée avec une approche en analyse en cycle de vie sur 50 ans est la prépondérance écrasante des émissions liées à l'énergie consommée par le parc : **l'exploitation énergétique représente de 73 % à 93 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'un monument** (voir *Figure 4*) contre seulement 7 % à 27 % pour les opérations de travaux et de restauration (incluant la fabrication des matériaux)¹¹. La variabilité des résultats dépend surtout de la donnée retenue pour les émissions liées à la consommation énergétique qui varie grandement entre les typologies de monuments et en fonction de leur taille.

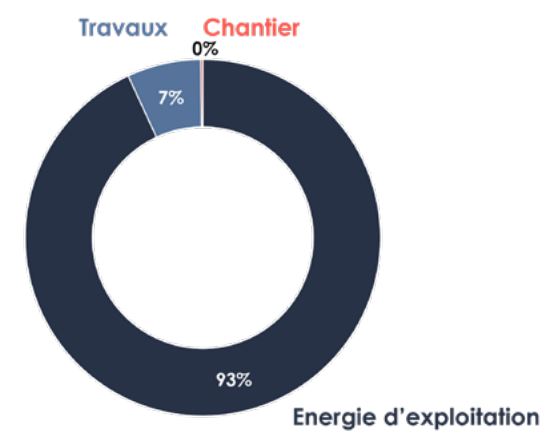


Figure 4 : Répartition des émissions entre travaux et exploitation pour une opération des restauration moyenne (sur 50 ans)

À l'échelle nationale, le parc étudié consomme environ 17,5 TWh par an et émet 3,4 MtCO₂e/an, ce qui représente environ 5,6 % des émissions totales du secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) en France¹².

L'analyse détaillée du volet énergie révèle deux facteurs critiques :

- **L'hégémonie des fossiles** : Les énergies fossiles sont responsables de 91 % des émissions d'exploitation. Le gaz naturel domine largement le mix, représentant 66 % de la consommation énergétique et 81 % des émissions totales.
- **Des volumes considérables** : Si la performance énergétique médiane au m²

(~215 kWh/m²/an) est comparable à la moyenne nationale, les consommations en absolues (en kWh totales pour l'ensemble du parc) sont élevées du fait de la taille des biens. La surface moyenne d'un logement MH est de 600 m² (contre 113 m² pour une maison standard)¹³, et celle d'un bâtiment tertiaire MH atteint 3 000 m². Ainsi, à l'échelle d'un monument de taille moyenne les consommations absolues peuvent être importantes et l'impact d'une amélioration de la performance énergétique peut donc être significative à l'échelle de la consommation totale du secteur.

LA RESTAURATION : UNE PRATIQUE INTRINSÈQUEMENT SOBRE

À l'échelle nationale, les opérations de travaux de restauration génèrent environ 200 ktCO₂e par an, soit seulement 2 % des émissions du secteur de la construction en France¹⁴. Cet ordre de grandeur permet a priori de situer le niveau d'incidence carbone qui pourrait être à consentir au nom de la préservation des valeurs patrimoniales au titre de l'exception culturelle, à supposer que la conservation des MH coûte particulièrement en carbone. On verra toutefois que l'étude confirme l'intuition d'une filière bas carbone par rapport aux autres types d'intervention sur le bâti.

À l'échelle d'une opération de restauration ne portant que sur les lots architecturaux, l'empreinte carbone moyenne se situe entre 110 et 220 kgCO₂e/m² (sur 50 ans), ce qui est nettement inférieur aux ratios observés dans la rénovation énergétique classique (environ 350 kgCO₂e/m² hors lots techniques). Pour comparer les opérations de restauration aux opérations de rénovations classiques, dont le poids carbone moyen est de 580 kgCO₂e/m², il est nécessaire de reconstituer une opération de restauration comparable, comprenant l'ensemble des lots de constructions, y compris les lots techniques. Cette opération théorique aurait un poids carbone de 450 kgCO₂e/m², soit 22 % plus faible qu'une opération de

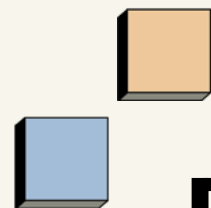


rénovation classique, et 40 à 54 % plus faible qu'une construction neuve (les seuils de la RE2020 allant de 740 à 980 kgCO₂e/m², pour les permis de construire déposés jusqu'en 2024 pour les logements collectifs et bureaux respectivement). Ces résultats sont toutefois à prendre avec précaution étant donné la taille très restreinte de ce premier échantillon, et invitent à étudier plus d'opération pour confirmer cette tendance.

Cette sobriété carbone peut s'expliquer par une conservation des matériaux existants plus poussée en restauration qu'en rénovation. En effet, le renouvellement est raisonné par partie d'ouvrage plutôt que par ouvrage entier, la substitution de matière est plus localisée avec entre autres des techniques de greffes, bouchons et patch-repair, et les matériaux sont plus souvent géosourcés et biosourcés (pierre, bois). Toutefois, la production des matériaux neufs reste le poste le plus impactant, représentant 60 % des émissions d'une opération de restauration.

En conclusion, si la pratique de la restauration s'avère vertueuse sur le plan matériel, l'urgence climatique pour la filière se situe massivement sur la sobriété des usages, la décarbonation des systèmes de chauffage et l'amélioration de la performance énergétique, leviers indispensables pour pérenniser ces édifices.

¹¹ La répartition entre émissions d'exploitation et de travaux varie en fonction de la prise en compte ou non des émissions liées au renouvellement sur 50 ans.
¹² Selon la version projet de la SNBC 3 : les émissions du secteur du bâtiment à 57 MtCO₂e/m² en 2023.
¹³ Moyenne de la surface des maisons individuelles (résidences principales) en France métropolitaine, 2023. CEREN.
¹⁴ Feuille de route décarbonation du secteur du bâtiment, 2024 : 50 MtCO₂e liée à la construction (neuve et rénovation).



RÉSULTATS DU VOLET ÉNERGIE DE L'EMPREINTE CARBONE DES MH

Cette section porte sur l'étude de la consommation énergétique du parc de monuments historiques et des émissions de GES associées à cette consommation. L'étude a été réalisée suivant une approche statistique et porte sur la consommation annuelle de l'ensemble des monuments historiques du parc français métropolitain. Tous les postes énergétiques sont pris en compte, notamment le chauffage, la ventilation, la climatisation, l'éclairage, l'eau chaude sanitaire, les équipements et les usages mobiliers. Les résultats permettent d'évaluer le poids carbone de l'exploitation des MH à l'échelle nationale dans l'optique de mesurer l'empreinte carbone du secteur. Aussi, cette analyse permet de comparer l'intensité énergétique et l'intensité carbone des MH à la moyenne du parc français.

MÉTHODOLOGIE DE CALCUL

Provenance des données

Les principales données utilisées pour réaliser les calculs proviennent de la Base de Données Nationale des Bâtiments (BDNB), une base de données nationale gérée par le CSTB¹⁵ qui recense l'ensemble des bâtiments sur le territoire métropolitain et compile des données clés sur chaque bâtiment. A l'aide de la base Mérimée¹⁶, il a été possible d'identifier et de récupérer les données des 31 200 monuments historiques présents dans la BDNB identifiés en France métropolitaine.

La BDNB fournit des données réelles comme la consommation énergétique ou la surface utile des bâtiments qui sont nécessaires pour le calcul des émissions de GES du parc. Pour le résidentiel, la BDNB utilise un modèle de prédiction afin d'évaluer le DPE des logements qui ne disposent pas d'un DPE récent, ainsi que la consommation énergétique associée. Pour cela, elle utilise différentes données réelles, y compris des métrés, des informations sur les enveloppes et les systèmes, qui sont utilisées, selon la précision des informations, pour prédire la performance énergétique du bâti¹⁷.

Carbone 4 a classifié les monuments historiques présents sur la BDNB à l'aide des informations fournies par la base, afin d'affiner l'analyse selon les typologies de MH. Trois types de classifications ont été réalisées :

- Une classification par typologie de MH (résidentiel, tertiaire et culte), puis par sous-typologie, cette analyse permet de raisonner sur des bâtiments avec des usages similaires :
 - Culte : église, chapelle et autres ;
 - Résidentiel : individuel et collectif ;
 - Tertiaire : bureaux, commercial, culture, enseignement, équipement sportif, établissement de santé, industriel ou agricole et autres.
- Une classification par zone climatique qui permet de mieux cerner les besoins énergétiques du monument,
- Des classifications par catégorie de surface, années de construction et type d'habitation (principale ou secondaire).

Après analyse des données issues de la BDNB, Carbone 4 a procédé à un contrôle de cohérence des résultats en les croisant avec des données réelles collectées auprès d'acteurs du patrimoine, dans le cadre de l'étude, notamment :

- du CMN, du ministère et de collectivités volontaires pour les bâtiments tertiaires ;
- des propriétaires privées via La Demeure Historique pour les bâtiments résidentiels ;
- de paroisses volontaires pour les bâtiments de culte.

Nota bene : Il n'existe aucune base de données des consommations énergétiques des MH, en particulier pour le résidentiel et le culte. Chaque propriétaire et chaque paroisse gère ses propres consommations, sans obligation de les suivre ou de les reporter.

Limite d'une approche méthodologique basée sur la BDNB

L'utilisation de la BDNB présente plusieurs limites qui peuvent avoir un impact sur le niveau de certitude ou la précision des résultats de l'étude. Cela dit, il est important de noter que l'utilisation de cette base de données était la meilleure option disponible au moment de conduire l'étude, puisqu'une collecte de données réelles, représentatives

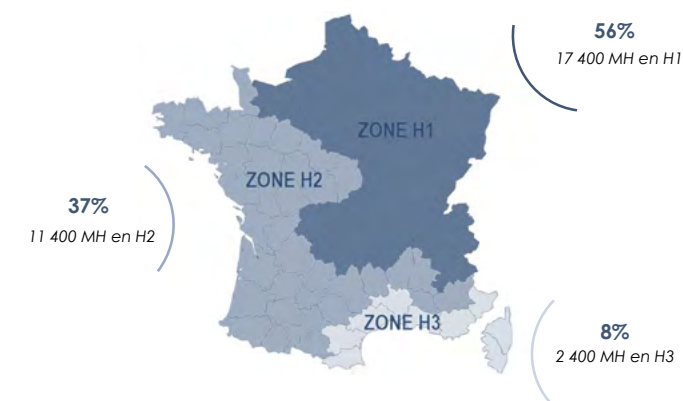


Figure 5 : Répartition des monuments historiques selon les zones climatiques H1, H2 et H3

¹⁵ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

¹⁶ Base de données sur le patrimoine architectural français, disponible sur la POP (Plateforme ouverte du Patrimoine), gérée par le Ministère de la Culture

¹⁷ Prédiction des performances énergétiques et environnementales du parc résidentiel de la BDNB

de l'ensemble du parc des MH, n'étaient pas envisageable dans le cadre de cette étude.

Les principales limites de l'utilisation de la BNBD sont les suivantes :

- La catégorisation des bâtiments par usage ou par typologie est incomplète et n'est pas fiabilisée : les catégorisations ne sont pas systématiquement à jour et ne correspondent pas toujours à celles de la base Mérimée. Aussi, un monument peut avoir plusieurs occupations (ex: Mairie, église et école primaire) : pour les besoins de l'étude, une seule catégorie a été appliquée par MH pour segmenter le parc
- La base est incomplète, à la fois sur les surfaces et les estimations du CSTB : les consommations énergétiques sont moins disponibles pour les MH tertiaire et de culte, l'incertitude est donc plus élevée pour ces derniers. Aussi, les données de consommation de fioul et de bois sont probablement sous-estimées, car leur suivi n'est pas **standardisé** via des contrats et réseaux nationaux.
- Le périmètre se limite à la France métropolitaine, les MH dans les DOMTOM ne sont pas inclus (560 MH d'après la liste Mérimée).

Calcul des émissions

Pour calculer les émissions associées à la consommation énergétique d'un bâtiment, Carbone 4 a utilisé trois données issues de la BDNB : la consommation énergétique par unité de surface¹⁸, la surface du bâtiment et le type de vecteur énergétique. Les deux premières données nous donnent la consommation

énergétique du bâtiment. Le vecteur énergétique du monument (i.e. électricité, gaz, fioul, bois...) permet de sélectionner un facteur d'émission adapté. Carbone 4 a réalisé deux traitements sur cette donnée afin de pouvoir l'exploiter et afin de fiabiliser les résultats :

- Carbone 4 a considéré que 24 % de la consommation énergétique affichée est électrique et correspond aux usages spécifiques i.e. hors chauffage et Eau Chaude Sanitaire (ECS)¹⁹.
- Si le vecteur énergétique du MH n'est pas disponible, une répartition moyenne de la consommation par vecteur, par typologie de bâtiments, a été attribuée²⁰.

Le calcul pour chaque monument historique et par vecteur énergétique est :

Émissions d'un vecteur énergétique (kgCO₂e)
= Consommation énergétique (kWh/m²) * Surface (m²) * Facteur d'émission du vecteur (kgCO₂e/kWh)

La liste des facteurs d'émissions par vecteur énergétique provient de la base Empreinte de l'ADEME (voir *Annexe IV – Section 5*).

Sur les 31 000 MH présents dans la BDNB, seuls 6 000 présentent à la fois une donnée de surface et une consommation énergétique, soit 19 % de l'extraction réalisée. Pour obtenir des résultats représentatifs de l'ensemble du parc de MH objets de cette étude (soit 31 200 monuments historiques), nous avons procédé à différentes extrapolations à partir de ces 19 % les plus complets (voir *Figure 6*).

L'extrapolation a été réalisée par typologie à l'aide des données disponibles. Le processus présenté ci-dessus pour le tertiaire a été répété pour le culte et le résidentiel. Cette

approche permet de garder une cohérence d'usage tout au long de l'extrapolation.

La première extrapolation se fait en surface, elle est réalisée sur les monuments historiques disposant d'une surface mais pas d'une consommation énergétique. C'est l'extrapolation la plus précise. La deuxième extrapolation se fait en unité, c'est-à-dire en nombre de monument historique, elle porte sur les bâtiments possédant uniquement une classification : Résidentiel, Tertiaire ou Culte. La dernière extrapolation porte sur les monuments historiques ne possédant ni surface, ni consommation énergétique, ni typologie, elle porte sur environ 2 700 bâtiments et se fait aussi en unité. Ces extrapolations successives permettent d'exploiter au maximum les données disponibles.

Analyse des résultats

Carbone 4 a classifié les différents monuments historiques pour affiner l'étude des résultats (par typologie, sous-typologie, zone climatique). Pour exploiter ces analyses, deux indicateurs sont calculés : les émissions de GES par unité de surface (kgCO₂e/m²) et la consommation énergétique par unité de surface (kWh/m²). Travailler par unité de surface permet de comparer les monuments historiques entre eux et ainsi identifier les plus consommateurs ou les plus émissifs. On peut ainsi raisonner par sous-typologie, taille et zone climatique pour expliquer les écarts observés.

Pour ces analyses, Carbone 4 a fait le choix de travailler par médiane plutôt que par moyenne. Ce choix a pour objectif de s'intéresser à un monument historique « classique » en évitant le biais induit par la présence de MH de très grande taille dans l'échantillon analysé. Ainsi, le choix de retenir la médiane comme indicateur principal permet de limiter le risque de

surestimer les consommations et les émissions en raison des grands monuments historique à très forte consommation énergétique. Cela dit, le poids de ces monuments est visible dans l'analyse en absolu qui permet d'estimer le poids carbone total du parc des MH.

PRINCIPAUX RÉSULTATS ÉNERGIE

Résultats à l'échelle du parc des monuments historiques (en absolu)

A l'échelle du parc, le gaz est encore majoritairement utilisé pour chauffer les MH (représentant 66% des consommations), ce qui pèse dans les émissions annuelles des MH dont 81% sont dues aux consommations de gaz. Par comparaison, à l'échelle de la France, le gaz représente un peu moins de la moitié des émissions liées à l'exploitation des bâtiments²¹. L'électricité représente un quart de la consommation énergétique des MH pour seulement 8 % des émissions du parc, ce qui est inférieur à l'impact des produits pétroliers (fioul, propane, butane et GPL) qui représentent 10 % des émissions du parc MH. Les émissions liées au bois et réseau de chaleur sont négligeables (1 %) selon les données disponibles, mais elles sont probablement sous-estimées en raison d'une sous-représentation de la consommation de bois dans la BDNB. Cela vaut également pour les consommations de fioul (voir *Figure 7*).

Les émissions totales du parc de MH s'élèvent à 3,4 MtCO₂e, correspondant à environ 5,6 % des émissions du secteur du bâtiment en France qui s'élèvent à 60 MtCO₂e en France en 2023 pour l'exploitation des bâtiments tertiaires et résidentiels.

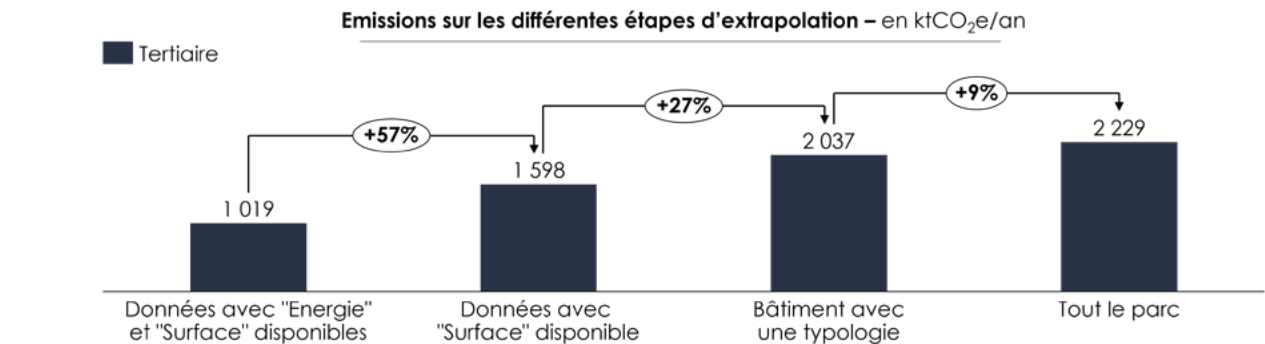


Figure 6 : Détails des émissions par étapes de l'extrapolation des monuments historiques tertiaires - ktCO₂e/an

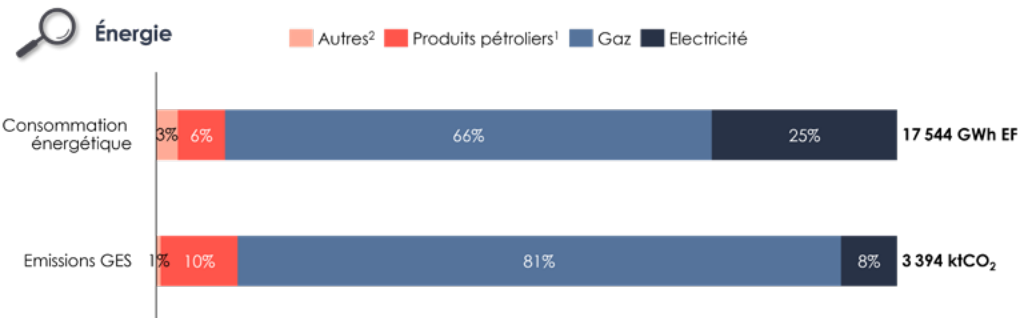


Figure 7 : Consommation énergétique et émissions de GES du parc des monuments historiques par vecteur énergétique. Source : données BDNB, calculs réalisés par Carbone 4.

²¹ Source : SGPE (Secrétariat général à la planification écologique), « Bâtiment : synthèse de la mise en œuvre du plan », 1er février 2024

Au total, le tertiaire est la typologie la plus émettrice avec 66 % des émissions du parc MH, du fait qu’il représente plus de la moitié des surfaces du parc MH. L’analyse détaillée par typologie est disponible à l’Annexe IV – Section 4.

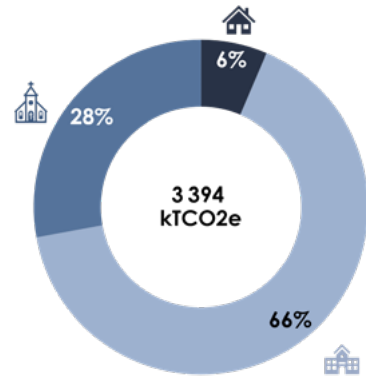


Figure 7 bis : Répartition des émissions de GES du parc des monuments historiques par typologie. Source : données BDNB, calculs réalisés par Carbone 4.

Résultats en intensité à l’échelle d’un bâtiment

L’analyse des résultats en termes d’intensité énergétique (kWh/m²), indique un faible écart entre les typologies : les trois typologies de MH ont une consommation de l’ordre de 215 kWh_EP/m²/an²². Pour le résidentiel, l’intensité énergétique médiane est légèrement inférieure à la consommation énergétique moyenne d’un logement en France²³ (voir Figure 8). En revanche, la consommation énergétique surfacique des MH est supérieure à la performance visée dans le cadre de la SNBC, qui correspond à une intensité de 110 kWhEP/m² pour un usage conventionnel (soit un DPE avec une étiquette B).

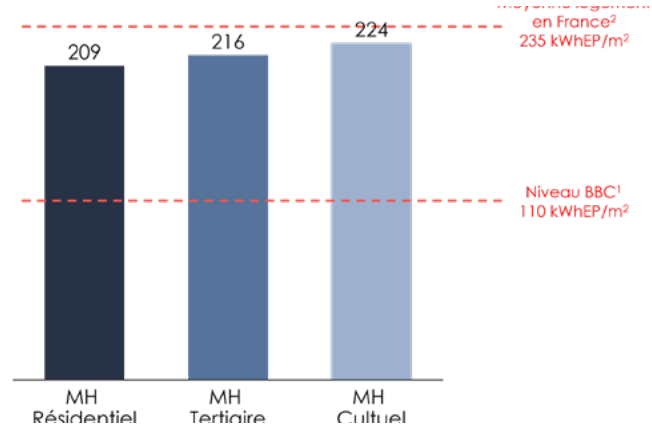


Figure 8 : Consommation surfacique par typologie d’usage – Médiane kWh/m²/an - Énergie primaire. Source : données BDNB, calculs réalisés par Carbone 4.

Nota bene : La comparaison avec la moyenne du résidentiel français est à nuancer : Les MH sont plutôt grands et souvent occupés partiellement (dans l’espace et le temps), ce qui donne une valeur en intensité (i.e. en kWh_EP/m²/an) plus faible. De plus, les modes de chauffage des MH sont souvent pluriels, or la BDNB ne suit que le mode principal de chauffage pouvant ainsi sous-estimer la consommation énergétique globale. Il est apparait que nombreux MH mettent déjà en œuvre des approches de sobriété énergétique en raison de la grande taille des bâtiments et des contraintes financières associées à la gestion de ce type d’actif.

Les résultats pour le culte paraissent très élevés et traduisent probablement un problème de fiabilité. En effet, les bâtiments de culte ne sont pas chauffés en continu pour des questions de coût et lorsqu’ils le sont, toutes les surfaces ne sont pas chauffées.

Zoom sur les résultats du résidentiel

Sur les 10 455 MH catégorisés en résidentiel dans la BDNB, près de la moitié sont classés comme des logements collectifs, représentant environ 80% des surfaces. Parmi les MH pour lesquels les données sont disponibles, 30 % sont des habitations secondaires, contre 10 % dans le parc national. Une partie significative des résidences n’est donc probablement occupée que partiellement dans l’année.

La surface moyenne des logements du parc est de 600 m², ce qui représente plus de 5 fois la surface moyenne d’un logement en France : 113 m² (données 2020 du CEREN). Les logements de plus de 600 m² représentant 25 % des logements du parc, cela traduit la présence de très grands logements (voir Annexe IV – Section 6).

Les logements individuels consomment 27 % de plus d’énergie que les logements collectifs, et émettent trois fois plus de GES, par m². Ces chiffres traduisent une meilleure efficacité énergétique des logements collectifs mais surtout que les logements individuels ont davantage recours à des vecteurs énergétiques carbonés comme le gaz et les produits pétroliers (voir Figure 9).

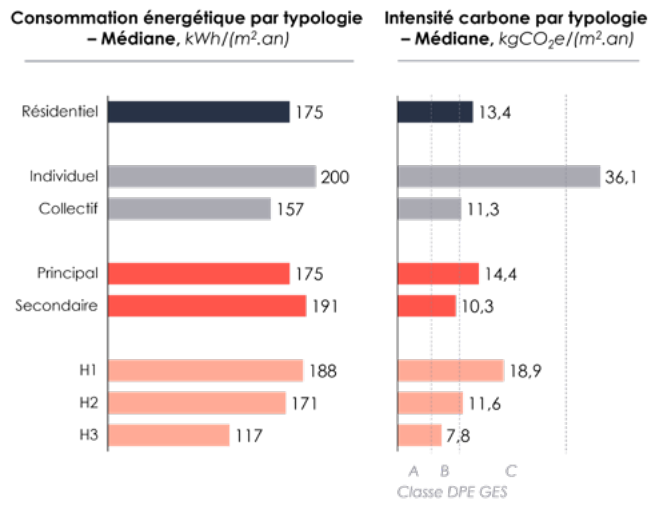


Figure 9 : Consommation énergétique du résidentiel – médiane, kWh/(m².an) et intensité carbone du résidentiel par typologie – médiane, kgCO2e/(m².an). Source : données BDNB, calculs réalisés par Carbone 4.

La comparaison entre logement principal et secondaire ne présente pas de différences notables en termes de consommation énergétique. Ce résultat est assez surprenant étant donné la différence de durée d’occupation. En revanche, les résidences principales ont recours à des vecteurs énergétiques plus carbonés que les résidences secondaires, augmentant leur intensité carbone de plus de 40 %. L’étude par zone climatique traduit deux points : les logements présents dans la zone climatique H3 ont une consommation énergétique plus faible et les logements de la zone climatique H1 ont un mix énergétique plus carboné (davantage de gaz et de produits pétroliers).

Pour vérifier la robustesse des résultats issus de la BDNB, des données réelles ont été recherchées. L’association La Demeure Historique (DH), qui représente et accompagne des propriétaires privés de monuments historiques, a fait un sondage en 2020 sur le chauffage récoltant 1150 réponses. Aucune donnée de consommations n’y est disponible, mais plusieurs éléments qualitatifs sur les modes de chauffage et les pratiques sont intéressants (voir Annexe IV – Section 7). Ce qui est à retenir c’est que 60 % sont des résidences secondaires et la majorité, même en incluant les résidences principales, sont chauffées partiellement. La plupart combinent plusieurs systèmes de chauffage : une chaudière centrale ou de relais (fioul, gaz, PAC) en complément de modes décentralisés

(cheminées ou poêles à biomasse, radiateurs électriques). 60 % des MH interrogés se chauffent à partir d’énergie fossiles : 44 % à partir de fioul et 16 % avec du gaz.

Les statistiques nationales du ministère du logement²⁴ confirment que les maisons de grandes surfaces situées en zone rurale peu dense, et occupées par des retraités, sont celles qui se chauffent le plus par le bois (28 %) et le fioul (23 %). Il reste à noter que les monuments de la DH ne sont pas représentatifs de l’entièreté du parc résidentiel MH, et semblent surreprésenter les logements individuels (alors qu’ils ne représentent que 20 % selon la BDNB), qui ont eux-mêmes tendance à plus recourir au fioul pour se chauffer (16 % vs. 11 % pour les logements collectifs selon le CEREN²⁵).

La part relative du fioul et du bois (inférieure à 15 % du mix énergétique final du résidentiel) apparait alors comme sous-estimée dans la BDNB (bien qu’elle ne soit probablement pas aussi haute que pour la DH). Les statistiques de la BDNB sont sûrement aveugles à une partie des consommations de fioul et de bois, qui sont des énergies « décentralisées », qui s’achètent ponctuellement pour faire un stock, et ne sont pas suivies par des contrats de réseau mensualisés (contrairement à l’électricité, au gaz ou aux réseaux de chaleur). Les statistiques nationales sur le chauffage au bois sont de leur côté faites à partir d’enquêtes téléphoniques, ce qui n’était pas envisageable durant cette étude.

Malgré l’incertitude des données d’entrée, les résultats indiquent une forte dépendance aux énergies fossiles du parc de MH résidentiel, et invitent ainsi à massifier les changements de chaudière, pour sortir autant que possible des énergies fossiles, et en priorité du fioul qui est 5 fois plus carboné que l’électricité en France métropolitaine.

Zoom sur les résultats du tertiaire

Au sein de l’échantillon de données analysées, 5 922 MH sont classés dans la catégorie tertiaire, dont environ 80 % ont une surface renseignée. Pour chacune des sous-catégories étudiées (culture, enseignement, bureaux, industriel et agricole, établissement de santé et équipement sportif), se trouve entre une et plusieurs centaines de MH. La sous-catégorie

²² L’énergie primaire (EP) prend en compte l’énergie qu’il a fallu dépenser pour aboutir à la consommation énergétique finale que les utilisateurs consomment. Elle va ainsi inclure les pertes pendant tous les processus de transformation de l’énergie.
²³ Shift Project, et données du CEREN pour le tertiaire

²⁴ SDES, enquête logement 2020, maisons résidences principales de France métropolitaine
²⁵ Données statistiques publiées par le CEREN (Centre d’études et de recherches économiques sur l’énergie) : « Données énergie 1990-2023 du secteur résidentiel »

la plus représentée sont les bâtiments commerciaux, avec plus de 1 000 MH.

La surface moyenne des bâtiments tertiaires du parc est de 3 000 m², ce qui représente plus de 4 fois la surface médiane des MH tertiaires de 700 m². Les logements de plus de 2 250 m² représentent 25 % des bâtiments du parc, ce qui traduit de nouveau la présence de très grands bâtiments dans le parc. (voir *Annexe IV – Section 8*).

Après analyse des résultats obtenus en consommation énergétique et émissions de GES associées, on observe que les établissements de santé et d'enseignement sont les plus émetteurs au m² (voir *Figure 10*). Pour l'enseignement (de l'école élémentaire aux lycées professionnels) et la santé, l'occupation intensive exerce une demande importante en chauffage et climatisation, en plus des nombreux équipements électriques spécialisés. Parmi les équipements sportifs, on retrouve les complexes sportifs et les piscines, souvent très consommatrices d'énergie. Les bureaux et les espaces culturels sont plus sobres, mais certains musées nécessitent toutefois une gestion des flux pour conserver les œuvres dans de bonnes conditions. À l'inverse les bâtiments industriels et agricoles peuvent contenir d'importantes zones non chauffées et présentent donc des intensités énergétiques relativement faibles.

Dans le cas du tertiaire, les intensités carbone par zone climatique sont assez proches. L'écart entre la zone H1 et la zone H3 est faible, d'environ 10 %. Le climat extérieur paraît donc être une variable peu significative dans l'intensité énergétique et carbone du tertiaire (voir *Annexe IV – Section 9*).

Afin de vérifier la cohérence des données de la BDNB, un appel a été fait auprès de collectivités, du CMN et du ministère, qui sont gestionnaires de monuments historiques pour obtenir des données de consommation énergétique. Après analyse des données réelles reçues et comparaison avec les résultats issus de la BDNB, on peut noter que les consommations énergétiques médianes par typologie sont du même ordre de grandeur. Certains écarts sont tout de même significatifs, notamment pour les équipements sportifs et les bâtiments d'enseignement. L'échantillon des données réelles est très

faible sur ces typologies (seulement 2 MH) et sont des cas particuliers identifiés par leur gestionnaire. Pour la majorité des catégories, les médianes issues des données réelles sont plus faibles que celles de la BDNB. La BDNB paraît donc conservatrice pour le tertiaire (voir *Annexe IV – Section 11*).

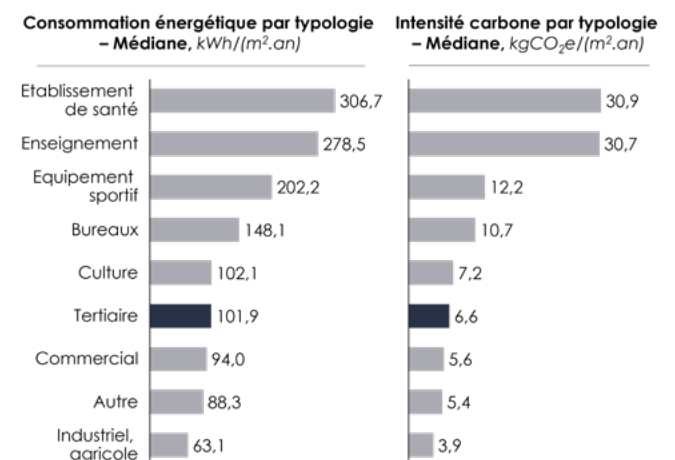


Figure 10 : Consommation énergétique du tertiaire – médiane, kWh/(m².an) et intensité carbone du tertiaire par typologie – médiane, kgCO₂e/(m².an). Source : données BDNB, calculs réalisés par Carbone 4.

Zoom sur les résultats du culte

Pour le culte, on retrouve 12 177 MH dans la base de données exploitées, dont seulement 25 % ont une surface renseignée. On retrouve majoritairement des églises, des chapelles et des bâtiments divers (abbaye, couvent, monastère, etc.). À noter qu'il est probable que les surfaces indiquées incluent des surfaces des bâtiments annexes (salle paroissiale, presbytères, etc.). L'analyse des données a fait apparaître que les données de surface ne sont pas cohérentes dans la BDNB, impactant la fiabilité des résultats sur cette typologie.

La surface moyenne des bâtiments de culte du parc est de 550 m², ce qui correspond à la surface d'une église paroissiale. 75 % des monuments de culte ont une surface inférieure à 375 m², ce qui correspond majoritairement à des églises rurales ou des chapelles. On retrouve également des bâtiments de culte avec une très grande surface (voir *Annexe IV – Section 12*).

Après analyse des résultats obtenus en consommation énergétique et émissions de GES associés, on observe que l'intensité carbone médiane des églises est plus faible

que celles des chapelles. Pourtant leur intensité énergétique est presque égale. On peut en déduire que les chapelles ont un mix énergétique généralement plus carboné (voir *Figure 11*).

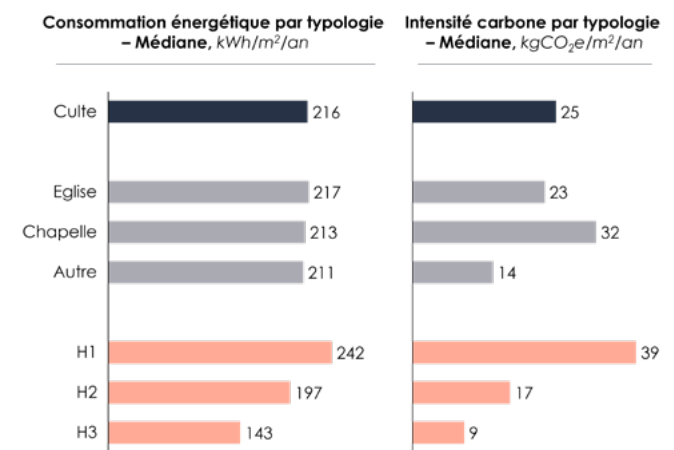


Figure 11 : Consommation énergétique du culte – médiane, kWh/(m².an) et intensité carbone du culte par typologie – médiane, kgCO₂e/(m².an). Source : données BDNB, calculs réalisés par Carbone 4.

On constate une forte sensibilité de la consommation énergétique en fonction des zones climatiques et encore davantage pour les émissions de GES, le mix énergétique de la zone H1 étant globalement plus carboné.

Afin de faire un contrôle de cohérence des données de la BDNB, Carbone 4 a essayé d'obtenir des données de consommation réel. Il est cependant difficile de collecter des données sur les bâtiments de culte car la donnée n'est pas consolidée à l'échelle territoriale ou nationale.

De manière générale, les résultats de la BDNB pour le culte sont plus hauts qu'attendus, en étant plus élevés que ceux du tertiaire et du résidentiel, alors que l'usage de bâtiments de culte est généralement moins intensif. Les trois données réelles récoltées montrent des variations allant de 2 kWhEF/(m².an) d'électricité pour une église non chauffée, à ~100 kWh/(m².an) pour une église chauffée au gaz ; loin des 224 kWhEF/(m².an) médian de la BDNB. Les consommations des édifices de culte dépendent de leur ouverture et usage qui varient grandement entre chaque paroisse (ouverture 1 fois par an vs. tous les jours). Les habitudes et température de chauffage dépendent également de chaque communauté (chauffer l'édifice vs. chauffer les corps).

Cela dit, ces données ne sont pas suffisantes pour tirer des conclusions fermes sur la fiabilité des données de la BDNB sur la catégorie culte, mais elles tendent à confirmer le haut niveau d'incertitude associée aux résultats de l'analyse pour la catégorie culte.

Principaux apprentissages

L'enjeu principal de décarbonation des monuments historiques est l'énergie d'exploitation, qui représente entre 76 % et 93 % des émissions liées à un MH selon les hypothèses considérées pour la partie travaux (sans ou avec renouvellement sur 50 ans) et énergie²⁶. Aujourd'hui, les énergies fossiles sont responsables pour 91 % des émissions d'exploitation des MH. Au total, le parc MH a davantage recours à des énergies fossiles que la moyenne bâtiminaire française : le mix énergétique final est largement dominé par le gaz. À noter que les données exploitées dans le cadre de cette étude sous-estiment sûrement la consommation de fioul et de bois, pour le résidentiel en particulier. Une enquête spécifique sur les propriétaires privés permettrait d'améliorer la robustesse des données.

Les médianes de consommation énergétique (en kWh/m²) des MH sont en ligne avec les moyennes françaises pour les bâtiment tertiaires et résidentiels. Cela étant dit, au regard des surfaces moyennes des MH qui sont nettement supérieures à la moyenne française (590 m² pour les MH vs. 113 m² pour le résidentiel), les consommations en absolues sont significatives et présentent donc un potentiel d'économie très intéressant. C'est principalement le cas pour le tertiaire qui est responsable de deux tiers des émissions absolues du parc. Aussi, les intensités de consommations par m² cachent une grande diversité de valeurs, notamment dans le tertiaire, et invitent à se concentrer sur les grands MH les plus consommateurs qui représentent la majorité de surfaces (70 % en résidentiel et 84 % en tertiaire).

Pour réduire efficacement les émissions, il faut jouer sur trois leviers d'action :

- **Repenser les usages et optimiser l'exploitation** pour réduire les besoins énergétiques.
- **Améliorer la performance énergétique** des MH à travers des travaux adaptés au bâtiment.
- **Décarboner les vecteurs énergétiques** : changer de source d'énergie pour éliminer les énergie fossiles (gaz et fioul).

LES LEVIERS DE DÉCARBONATION DE L'ÉNERGIE D'EXPLOITATION DES MH

L'analyse des émissions carbone des consommations énergétiques des MH a permis d'identifier les principaux enjeux de décarbonation du parc de MH dans l'objectif de construire une trajectoire de décarbonation propre aux monuments historiques. La première étape consiste à identifier les leviers d'actions adaptés aux MH afin d'en évaluer le potentiel de décarbonation. Un travail de recherche bibliographique, d'entretiens, d'analyses et d'ateliers ont permis d'approfondir et d'affiner les actions à mettre en œuvre pour réduire les émissions d'exploitation. Les actions ont été classées par type de levier : sobriété, efficacité, substitution

Les leviers de sobriété

Les leviers de sobriété visent à réduire les besoins en énergie en modifiant les usages, notamment pour le chauffage où le gaz et le fioul sont encore très présents. Les actions se résument alors à questionner les usages pour les adapter aux contraintes climatiques changeantes et aux performances intrinsèques des bâtis. La mise en œuvre de la sobriété énergétique à l'intérieur d'un bâtiment peut englober de nombreuses actions diverses qui impliquent toutes des changements de comportements des usagers, la plus commune étant de réduire la température de consigne l'hiver. Mais il s'agit aussi d'interroger les

usages possibles en période de canicule ou de grand froid, d'adapter les horaires, voire d'aller jusqu'à fermer certaines ou toutes les parties du monument lors de certains pics de température. Le chauffage et la climatisation de chaque espace est à penser en fonction des usages et périodes d'occupation. Par exemple, les couloirs et espaces de circulation n'ont pas besoin d'être autant chauffés que les espaces statiques comme les bureaux, et ces derniers n'ont pas besoin d'être autant chauffés la nuit et les week-end. La densité d'occupation est également un paramètre sur lequel agir : augmenter le nombre de personne au m² dans les parties chauffées ou climatisées peut permettre d'optimiser les consommations et de fermer les espaces moins performants. Pour conserver le mieux la chaleur ou le frais, la gestion des ouvertures et des fuites d'air est à penser, en veillant à garder le plus souvent les portes fermées ou à installer des sas d'entrée dans les lieux passants tels que les commerces ou les églises.

Réduire les besoins d'énergie des MH avec de grandes surfaces ou grands volumes nécessite avant tout de changer l'échelle et l'objet à chauffer : il s'agit d'isoler et chauffer les corps, plutôt que de tenter difficilement de chauffer des grands volumes. C'est particulièrement le cas pour les églises, qui sont occupées très partiellement dans le temps et dans leur volume. Il convient alors de jouer en priorité sur les modes passifs via l'isolation des corps (pulls, plaids) et l'effusivité²⁷ des surfaces (coussins, tapis, tentures murales, rideaux, planchers, enduits, etc.) pour améliorer le confort et la température ressentie sans chauffer l'air sous les voutes. L'action sur le confort ressenti est un levier pour lequel le patrimoine dispose de nombreux atouts. L'identification, le maintien et le rétablissement des nombreux dispositifs effusifs et isolant traditionnels (lambris, rideaux, voilages, volets intérieurs, contrevents, paravents, tapis et tentures, etc.) contribuent ainsi aux actions de sobriété en augmentant le confort corporel ressenti et diminuant ainsi les besoins en chauffage. Il faut ensuite sélectionner des modes de chauffage actifs à faible inertie qui émettent des

radiations à proximité des usagers uniquement lors de leur présence.

Les leviers d'efficacité

Le levier d'efficacité joue sur comment réduire les consommations d'énergie pour répondre au même besoin. Pour les MH, il s'articule principalement autour de deux questions : Comment améliorer la performance du bâti ? Comment améliorer les performances des équipements techniques ? En premier lieu, il convient de rappeler l'exigence d'un bon entretien des ouvrages de protection à l'eau (en toiture bien sûr, mais aussi en façade, notamment les enduits, trop souvent piqués). Cet entretien est essentiel à l'efficacité énergétique, en évitant l'introduction d'humidité qui augmente la quantité d'énergie nécessaire au maintien des températures. Le statut protégé des MH permet de préserver les éléments patrimoniaux importants, et limite ainsi certains gestes d'isolation sur les éléments inscrits ou classés. Cependant, de nombreuses parties des monuments peuvent être isolées sans incidence sur les ouvrages patrimoniaux, avec en particulier les combles, les planchers, et les tuyaux qui transportent de l'eau chaude. Ensuite, l'amélioration du niveau d'isolation des menuiseries et des murs non protégés peut être étudiée en fonction du potentiel gain en efficacité.

Un point d'attention est à porter sur la réduction des fuites d'air et ponts thermiques, qui est une source quantitative importante de déperdition qui peut être très facilement résorbée, notamment par le calfeutrement au niveau des jonctions entre les maçonneries et menuiseries. Ces actions peuvent améliorer significativement la performance thermique des pièces à chauffer. Avant toute opération de travaux, un diagnostic avec des tests d'étanchéité et recherche en déperdition est à réaliser au cas par cas pour s'assurer d'éviter tout risque pathologique (moisissures) ou de mal adaptations aux canicules, et d'échelonner dans le bon ordre les travaux s'ils doivent être étalés sur plusieurs années (en gardant en tête que pour être efficace, l'isolation est à réaliser avant de changer les équipements pour pouvoir les dimensionner au juste nécessaire).

En parallèle, les solutions de gestion intégrées et d'automatisation des systèmes

(GTB, détecteurs de présence, thermostats, économiseurs) peuvent aider à économiser de l'énergie là où la sensibilisation et le facteur humain ont leurs limites (effet de dilution de la responsabilité dans un groupe par exemple). Elles sont particulièrement utiles dans les MH tertiaires avec une forte intensité d'usage (MH culturels ouverts toute l'année au public, MH d'enseignements, hôpitaux, piscine, etc.). Le décret BACS²⁸ impose que tous les bâtiments tertiaires de plus de 70kW de puissance soient équipés d'une GTB d'ici 2027. Pour les MH, cela doit toujours s'étudier au cas par cas, en relation avec les autres leviers.

Le renouvellement des équipements en fin de vie est aussi une occasion d'améliorer les performances des systèmes énergétiques. Choisir des équipements avec les meilleurs rendements, comme remplacer les lampes halogènes par des LED, installer un insert dans une cheminée ouverte ou renouveler une chaudière sont autant de manières de réduire les quantités d'énergie nécessaire pour répondre aux mêmes besoins.

Les leviers de substitution

Lorsqu'un équipement CVC arrive en fin de vie, ou dans le cadre d'une opération de restauration, il est indispensable de questionner l'énergie utilisée, et s'il est possible de la substituer par une énergie plus bas carbone. Par exemple, lorsqu'une chaudière gaz arrive en fin de vie, il faut privilégier de la remplacer par un autre mode de chauffage. C'est le levier qui sera le plus significatif pour réduire efficacement les émissions de carbone du monument. Il s'agit alors d'étudier la situation pour savoir quelle nouvelle chaudière est compatible avec le réseau de chauffage et les émetteurs en place, en fonction des besoins et des disponibilités liées à la localisation. Un réseau de chaleur est-il disponible à proximité ? La géothermie est-elle envisageable avec la géologie locale ? Une pompe à chaleur air-eau pourrait-elle prendre le relais en partie ou totalité ? Des émetteurs radiants seraient-ils suffisants s'ils sont bien réglés et situés et que le MH n'est occupé que ponctuellement ? Des panneaux solaires thermiques ou des poêles à bois pourraient-ils subvenir aux besoins des MH résidentiels

²⁷ L'effusivité thermique d'un matériau est sa capacité à absorber et restituer la chaleur. Elle influe directement sur la sensation de froid ou de chaud. Il s'agit alors de recouvrir les parois froides par un matériau qui restitue plus rapidement la chaleur corporelle. Pour aller plus loin : Incub', « Chauffage des églises : comment faire ? », 2018. <https://www.incub.net/lab/blog/chauffage-des-eglises-comment-faire>

²⁸ Le décret BACS (Building Automation and Control Systems) est une réglementation française publiée avec une obligation de conformité graduelle entre 2025 et 2027

les plus isolés ? Il existe une multitude de solutions à combiner pour sortir des énergies fossiles, qui peuvent améliorer l'autonomie et la résilience énergétique des MH, notamment face à la volatilité des prix de l'énergie.

Il est par exemple possible de mettre en place des systèmes de production de chauffage en cascade, en combinant une PAC neuve et une chaudière gaz existante, de manière à utiliser 90 % de l'année la PAC et dans les rares moments où cela est nécessaire, la chaudière en relève. Ceci permet d'éviter de surdimensionner les PAC (et donc de ne pas multiplier les unités extérieures peu esthétiques), ni de les sous-dimensionner les PAC et risquer de créer une situation d'inconfort.

Afin de réduire au maximum les consommations et les émissions, il est important d'actionner en priorité les leviers de sobriété puis d'efficacité et enfin de substitution, afin que les nouveaux équipements ne soient pas surdimensionnés par rapport aux nouveaux usages et performances.

Le rôle des différentes parties prenantes

Les maîtrises d'ouvrage, qu'elles soient propriétaires ou uniquement gestionnaires, privées ou publiques, ont un rôle important à jouer pour décarboner les MH (voir Figure 12). Par leur vision globale du bâti, elles peuvent repenser et faire évoluer les usages des différents espaces. Elles peuvent commander et financer des travaux pour

restaurer les aspects patrimoniaux, tout en améliorant la performance de l'enveloppe et des équipements techniques. Elles peuvent se projeter et planifier sur le moyen terme la sortie des énergies fossiles. Par leur lien avec les occupants, elles peuvent sensibiliser aux pratiques de sobriété. La maîtrise d'œuvre spécialisée dans le patrimoine a elle aussi un rôle à prendre pour être force de proposition sur les travaux d'amélioration énergétiques adaptés aux spécificités de chaque MH. Pour mener à bien ses missions, elle doit s'accompagner de bureaux d'études techniques fluides compétents sur l'entrecroisement de ces enjeux (patrimoine-performance énergétique). Les MOE patrimoine peuvent aussi proposer des solutions de chauffage alternatives au fioul et au gaz. En parallèle, les collectivités, l'État et les producteurs d'énergie doivent tenir leur engagement de décarbonation des réseaux énergétiques et le déploiement des énergies décarbonées.

LA TRAJECTOIRE DE DÉCARBONATION DE L'ÉNERGIE D'EXPLOITATION À HORIZON 2035 ET 2050

Afin d'étudier les potentiels de décarbonation de chaque levier d'action à l'échelle du parc des MH, une analyse des opportunités de déploiement de chaque action a été menée par catégorie d'usage (résidentiel, tertiaire

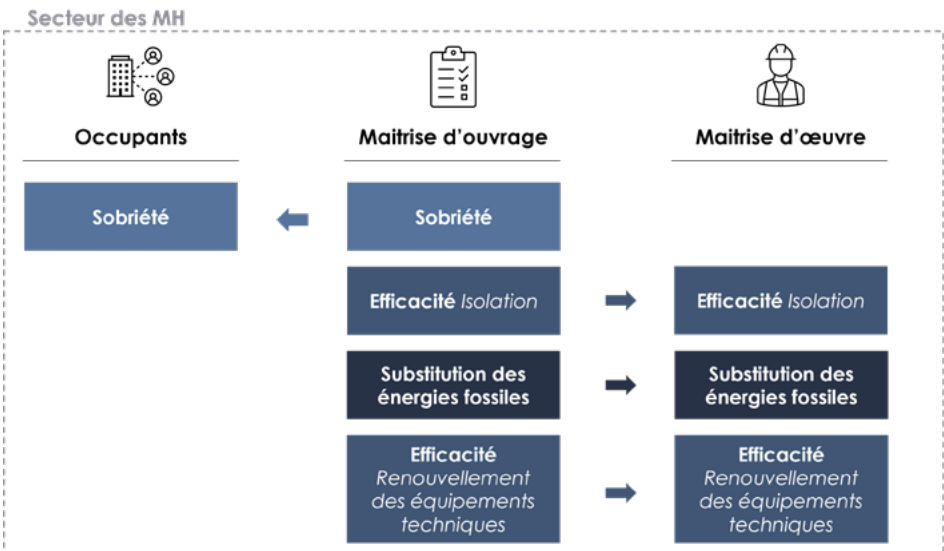


Figure 12 : Rôles des différents acteurs dans la décarbonation des MH

et culte). La modélisation a pris en compte plusieurs hypothèses structurantes, définies par Carbone 4 :

- La croissance du parc des MH, basée sur la projection de la tendance actuelle (+ 0,7 % par an),
- La vitesse de déploiement potentielle de chaque action sur le parc (définies à partir des retours d'expérience, des ambitions nationales, et des contraintes patrimoniales) : les hypothèses de déploiement de chaque action ont été défini en fonction de la typologie de MH (résidentiel, tertiaire, culte) et selon deux horizons temporels (2035 et 2050). Le détail des hypothèses est à retrouver à l'Annexe IV – Section 14 à 17,
- Les gains carbone liés aux économies d'énergie permis par chaque action, ou au changement de vecteur,
- Les gains exogènes au secteur MH, liés à la décarbonation des réseaux d'énergie (électricité, réseau de chaleur et gaz).

Les gains exogènes ont fait l'objet d'une analyse de sensibilité entre deux scénarios :

1. Le premier est aligné avec l'objectif de rester sous les 2°C à la fin du siècle, et reprend les hypothèses des stratégies et plans nationaux²⁹ (voir Annexe IV – Section 18).

2. Le second, plus modéré, vient tester la sensibilité des résultats des actions de décarbonation, par rapport à la décarbonation de ces facteurs extérieurs aux MH qui restent incertains. Les ambitions de décarbonation à horizon 2050 prises dans ce scénario sont trois fois plus faibles pour le gaz, deux fois faibles pour les réseaux de chaleur (voir Annexe IV – Section 18).

Résultats de la trajectoire quantifiée

En mettant en œuvre tous les leviers d'action selon les hypothèses de déploiement définies, les émissions carbone liées à l'exploitation énergétique des MH pourraient être réduites d'un tiers d'ici 2035, et jusqu'à la moitié en comptant la décarbonation exogène des réseaux. Les efforts de décarbonation sont portés principalement par la substitution des fossiles vers des énergies bas carbone (-21 %), mais également par les actions d'efficacité (-10 %) et de sobriété (-8 %). L'ensemble des hypothèses de gains permettant de modéliser une trajectoire de réduction sont disponibles en annexe IV section 15 ; à noter que l'hypothèse de gain associé aux actions de sobriété varie selon la typologie (avec des gains potentiels plus importants pour le culte). Si on ajoute à cela les gains exogènes

liés à la décarbonation des réseaux s'élevant à 16 % dans le scénario 2°C, on aboutit à une réduction par deux des émissions carbone associées à l'exploitation énergétique des MH.

Les gains sont principalement portés par le tertiaire, étant donné que les émissions de l'année de référence (2024) proviennent en grande partie du tertiaire (voir Figure 14). Les gains varient par catégorie : en relatif, les actions d'efficacité sont plus importantes pour le tertiaire et le résidentiel, tandis que les actions

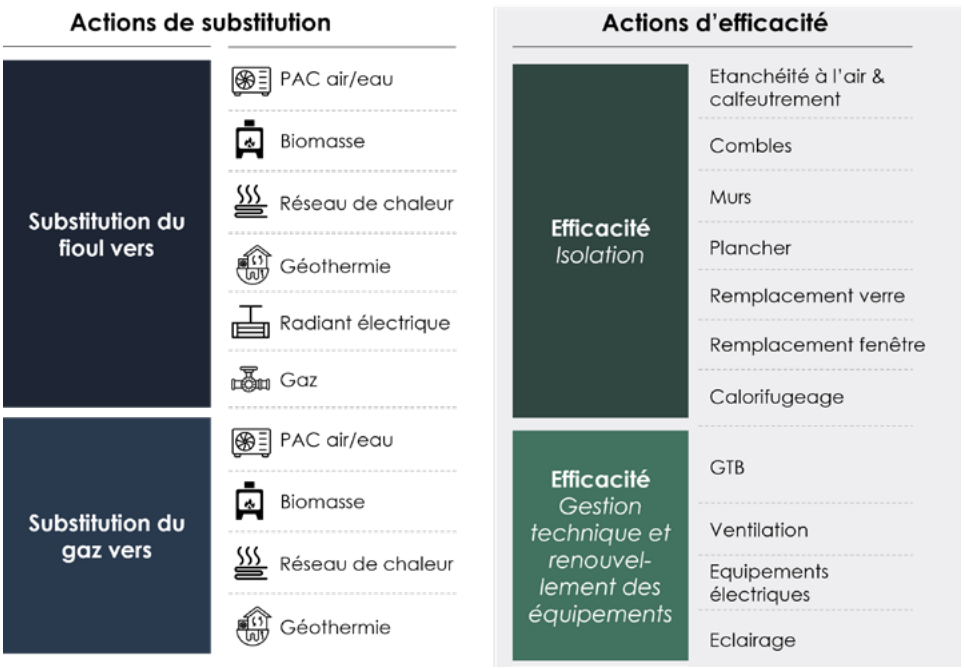


Figure 13 : Liste des actions prises en compte dans la trajectoire de décarbonation. Détail disponible en Annexe IV – Section 14.

²⁹ RTE. Futurs énergétiques 2050, Scénario N1. 2022. Ministère de la transition écologique. Plan national énergie climat. ²⁰²⁴ Ministère de la transition écologique. Stratégie nationale bas carbone. 2019. Scénario gaz haut.

de sobriété sont relativement plus importantes pour le culte (où les actions d'isolation sont limitées).

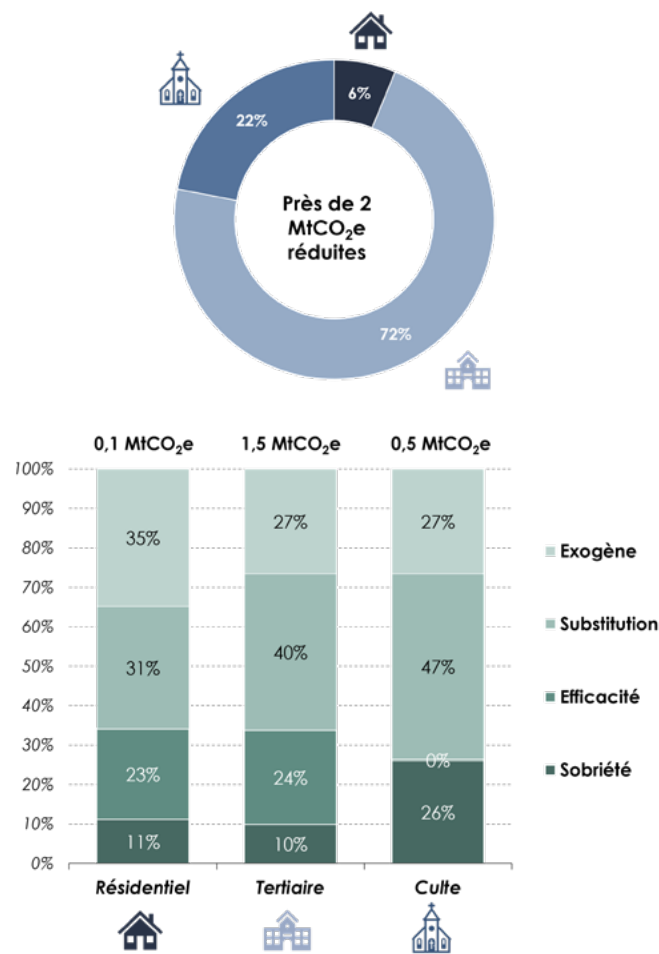


Figure 14 : Répartition des réductions d'émissions carbone à horizon 2035 par typologie de MH et par levier

Dans la mesure où le périmètre initial comporte de fortes incertitudes sur la typologie culte (en termes de consommations et de surfaces), et qu'il est difficile de prendre des hypothèses de déploiement des actions d'amélioration énergétique pour cette catégorie, il est préférable de présenter une trajectoire de décarbonation pour les

monuments historiques hors culte (voir Figure 15). En effet, la trajectoire limitée au périmètre résidentiel et tertiaire est bien plus fiable (voir Annexe IV – Section 20).

En dix ans, de nombreux efforts peuvent être fournis pour décarboner efficacement l'énergie consommée dans les MH. La substitution est clé : en remplaçant 50 % des chaudières fioul et 25 % des chaudières gaz à horizon 2035 par des pompes à chaleur (aéro ou géothermiques), des chaudières biomasse, des réseaux de chaleur, et plus ponctuellement par des systèmes radiants et solaires, les émissions peuvent baisser de 27 % (par rapport à la hausse prévue du parc de 8 %). L'efficacité est, elle aussi, essentielle : elle est à intégrer systématiquement lors de travaux de restauration. À horizon 2035, un tiers du parc pourrait avoir réduit les fuites d'air, isolé les combles, les tuyaux et une partie des planchers, murs et menuiseries, tout en ayant optimisé et renouvelé une partie des équipements. Cela réduirait de 16 % les émissions. La sobriété, indispensable, avec un gain moyen de 15 % par bâtiment (et qui peut monter jusqu'à 40 %)³⁰ serait déployée progressivement (40 % du parc en 2035) en repensant les espaces et en formant les occupants et gestionnaires.

À horizon 2050, ces mesures pourraient se généraliser à une part plus élargie du parc, en moyenne autour de 80 % des bâtiments concernés par chacune des mesures. Cela permettrait de réduire de 27 % les émissions du parc. Pour la sobriété, on prend en compte pour 2050, une part légèrement plus importante qui permet une réduction des émissions de 18 % par bâtiment. Ces mesures



© Menuiserie en restauration, École militaire - archipat

permettraient une réduction comprise entre 57 % (ou 63 %) et 91 % des émissions du parc d'ici 2050, selon la prise en compte ou non de la réduction exogène.

Pour enclencher efficacement cette feuille de route, il convient de se concentrer en premier sur les monuments les plus consommateurs, notamment du tertiaire. Par leur devoir d'exemplarité, les gestionnaires publics ont tout intérêt à montrer la voie.

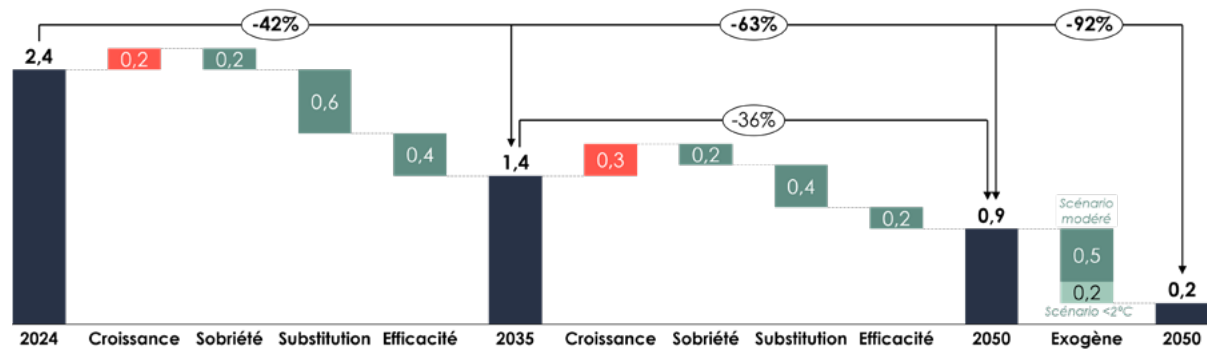


Figure 15 : Réduction des émissions par leviers d'actions, horizon 2035 et 2050, hors culte

³⁰ Selon les résultats constatés par le Concours Cube de l'IFPEB sur un parc de bâtiments tertiaires. Il s'agit ici d'une hypothèse conservatrice, notamment au regard des estimations prospectives du GIEC qui estiment à 29 % les gains potentiels du levier sobriété (Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz, Les Incidences économiques de l'action pour le climat, Mai 2023).

CONCLUSIONS ET MESSAGES CLÉS

Le calcul de l'empreinte carbone de l'exploitation des monuments historiques a permis de mettre en avant un constat majeur : le parc des MH est fortement dépendant des énergies fossiles, et notamment du gaz qui représente 66 % de la consommation énergétique et 81 % des émissions de GES du parc. Si les statistiques nationales affichent une part modérée pour le fioul et le bois, les enquêtes terrain (notamment auprès de la Demeure Historique) révèlent une réalité différente pour le résidentiel privé ; il est probable que la consommation réelle soit supérieure à celle estimée par la BDNB. Hormis cet écart, un contrôle de cohérence des résultats de l'étude permet d'affirmer la fiabilité des résultats pour les MH résidentiel et tertiaire. En revanche, les données et résultats des MH culturels ont un niveau d'incertitude élevé.

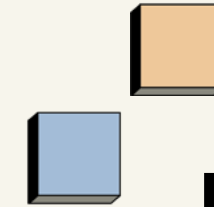
L'analyse de l'intensité énergétique révèle un paradoxe. D'une part, une performance apparente moyenne a été constatée avec la consommation médiane par m² (~215 kWhEP/m²/an) comparable à la moyenne nationale française. Il apparaît qu'en termes de performance énergétique globale, il n'y ait pas de spécificité des MH. D'autre part, l'analyse a révélé les très grands volumes des MH, mais les résultats en intensité surfacique masquent en effet la taille des bâtiments. Avec une surface moyenne de 600 m² pour les logements MH (contre 113 m² pour une habitation classique) et de 3 000 m² pour le tertiaire, les consommations en valeur absolue sont considérables.

En raison de la consommation importante d'énergie fossiles des MH de par leur grande taille, il est indéniable que les MH ont leur rôle à jouer dans la transition bas carbone avec un grand potentiel de réduction de la consommation d'énergie fossiles. L'objectif est donc d'identifier les leviers d'action permettant au secteur de se décarboner et de construire une trajectoire de réduction propre au secteur. En estimant l'impact de l'ensemble des actions pertinentes pour chaque catégorie de MH, il apparaît que le parc peut viser une

réduction de moitié de ses émissions de GES. Pour ce faire il s'agit de combiner les actions de sobriété, d'efficacité et de substitution des énergies pour permettre au secteur de sortir massivement du fioul et du gaz au profit de sources d'énergie décarbonées.

La modélisation de la trajectoire de décarbonation du secteur nous permet de conclure qu'une réduction drastique est possible rapidement, d'ici 2035 en activant l'ensemble des leviers à disposition. Cela nécessite un rythme soutenu de remplacement des systèmes de chauffage, visant la substitution de 50 % des chaudières fioul et 25 % des chaudières gaz d'ici 10 ans. Le remplacement des vecteurs énergétiques est le levier principal pour les MH étant donné la faisabilité accrue par rapport aux autres leviers, notamment d'isolation. Les gains les plus rapides et massifs sont attendus sur le parc tertiaire, qui doit jouer un rôle moteur.

Pour mettre en œuvre cette trajectoire de décarbonation, l'ensemble des acteurs et parties prenantes du secteur ont leur rôle à jouer, à commencer par les maîtrises d'ouvrage commanditaires de travaux. Les maîtres d'œuvre peuvent également exercer une forte influence sur la capacité de décarbonation du parc, notamment en systématisant l'étude et la réalisation de travaux d'amélioration de la performance énergétique lors de travaux de restauration.



RÉSULTATS DU VOLET TRAVAUX DE L'EMPREINTE CARBONE DES MH

L'objectif de cette section est de présenter les résultats du calcul des émissions carbone des opérations de travaux, puis d'identifier les bonnes pratiques et leviers de décarbonation propres aux professionnels de la restauration.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Approche de travail et collecte de données

L'étude des opérations de travaux des MH se concentre sur les travaux de restauration du bâti, et porte spécifiquement sur les opérations de restauration de MH résidentiel, cultuel et tertiaire. L'ensemble des lots de constructions d'une opération de restauration est pris en compte, des travaux de voieries ou de fondations, à la couverture.

Pour estimer l'empreinte carbone d'une opération de travaux de restauration, il est nécessaire de collecter des données physiques (en m³, kg, L, etc.) des matériaux mis en œuvre et des différentes interventions sur le bâti (par exemple de nettoyage) et leur associer des facteurs d'émission (FE) correspondants. Les facteurs d'émissions représentent l'intensité carbone d'un matériau ou d'une action (voir *Figure 16*).

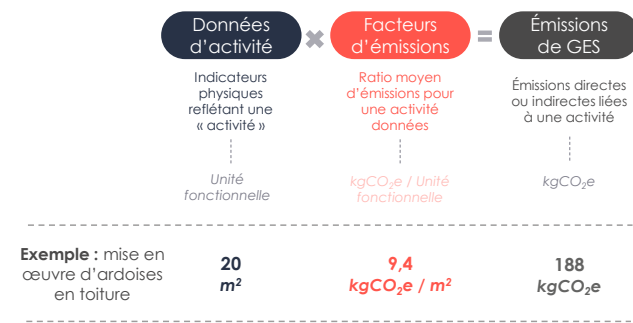


Figure 16 : Illustration du principe de calcul d'empreinte carbone

	Usage principal	Typologies de bâti ciblées	Opérations étudiées
LOGEMENT	Maisons	Rural isolé ou mitoyen urbain	/
	Immeubles	Immeuble du XX ^e	Ilôts v40&41, Le Havre, 1947
	Châteaux / manoirs	Châteaux et demeures de l'époque moderne (XVI ^e -XIX ^e)	Grange Missée, Chaillac, XV ^e
TERTIAIRE	Bureaux / enseignement / administration	Anciens hôtels particuliers ou édifices institutionnels reconvertis (XVII ^e -XIX ^e)	Hôtel de ville, Vincennes, 1880-1930 Cour d'appel, Dijon, 1878 Villa Mangini, S' Pierre la Palud, 1890
	Culture (musées / bibliothèques / archives)	Châteaux ouverts au public Anciens hôtels particuliers ou palais reconvertis (XVII ^e -XIX ^e)	Château de Carrouges, XIV ^e Château de Bussy-Rabutin, Bussy-le-Grand, XII ^e et XIV ^e Bibliothèque Fesch, Ajaccio, 1865
CULTE	Église / Chapelle	Église de taille moyenne (X ^e -XIX ^e)	Église N-D, Étretat, XII ^e au XIX ^e Cathédrale, Beauvais, XVI ^e Église S' Cannat, Marseille, XVII ^e

Figure 17 : Tableau de synthèse des 11 opérations étudiées dans le cadre de cette étude

En l'absence de données existantes sur les flux de matières et d'énergie d'une opération de restauration, un appel à collecte de données de travaux de restauration a été réalisé auprès des architectes du patrimoine dans le cadre de ce projet. Suite aux 33 propositions reçues, le groupe de travail a sélectionné les 18 opérations les plus pertinentes pour obtenir un panel représentatif des travaux de restauration. Le choix a croisé différents critères pour obtenir une diversité en termes de typologie d'usage (résidentiel, tertiaire, culte), de type de bâti et modes constructifs (pierre, colombages, béton), d'époque (moderne vs. après-guerre), de localisation (rural vs. urbain) et géographie, et d'ouvrages restaurés. L'un des critères limitants a été la disponibilité des données, les opérations devant être finies et disposer de tous les documents pour déterminer les flux physiques associés aux travaux.

Des grilles de collecte ont été envoyées aux architectes pour récolter les données des travaux, par lot (structure, façade, charpente, menuiseries, etc.). Finalement, onze opérations ont fait l'objet d'un calcul d'empreinte carbone car seules ces onze opérations présentaient suffisamment de données (voir *Figure 17*). Malheureusement certaines typologies de MH n'ont pu être étudiées, fautes de données, notamment pour les logements individuels isolés.

Méthode de traitement et de calcul des données

Pour chaque opération, Carbone 4 a traité les données brutes (DGD et DPGF³¹) pour remplir ligne à ligne les grilles de collecte avec les quantités de matériaux déposés, remplacés et posés. Dans ce cadre, certaines interventions non matérielles et avec un poids carbone nul ou négligeable, ont été écartés, par exemple le tri d'ardoise. Puis pour chaque élément de la liste d'intervention ainsi définie, Carbone 4 a associé un facteur d'émission selon deux cas de figure :

- Un facteur d'émission est disponible dans l'une des bases de données suivantes : la base INIES³², la base Empreinte de l'ADEME³³, la base Ecoinvent³⁴ ou la base EPD International³⁵. Par exemple, pour l'intervention : « remplacement à neuf de 20 fenêtres en bois de 1,2*1,2 m² », on peut associer un facteur d'émission de fenêtre en bois en kgCO₂e/m².
- Aucun facteur d'émission n'est disponible pour cette typologie d'intervention. Ce cas de figure est fréquent dans les monuments historiques pour deux raisons, les processus sont spécifiques à la restauration des MH et ils mettent en œuvre des matériaux peu communs dans la construction neuve. Dans ce cas, Carbone 4 a procédé à la construction de FE spécifiques.

Pour construire des FE spécifiques, Carbone 4 a conduit des entretiens avec des experts de la restauration afin de décomposer l'intervention en étape pour identifier les matériaux ou produits utilisés et les consommations énergétiques. Les FE spécifiques ont ensuite pu être reconstitués en utilisant les bases de données mentionnées ci-dessus pour déterminer les émissions de chacun des éléments décomposés.

Une fois que les FE ont été associés à chaque intervention, il est possible de calculer les émissions de l'opération dans son ensemble qui correspondent à la somme des émissions de chaque intervention. Les émissions ont été regroupées par lots (couverture, charpente, maçonnerie, menuiserie, etc.) et par phase du cycle de vie (production, mise en œuvre, utilisation et fin de vie) pour une analyse plus approfondie (voir : *Tableau 1*).

Pour faciliter l'extrapolation et l'analyse, les émissions ont été ramenées en intensité par opération pour aboutir à des émissions par surface de monument historique (kgCO₂e/m²) et par montant dépensé sur l'opération de restauration (kgCO₂e/k€).

Phase du cycle de vie					
Lots	Production	Mise en œuvre / construction	Utilisation	Fin de vie	Total
VRD					
Structure					
Façade	5	1	0	2	8
Charpente					
Couverture					
Menuiseries extérieures	5	1	0	2	8
Menuiseries intérieures					
Revêtements intérieurs					
Système de chauffage et de refroidissement					
Incendie et système électrique					
Autres					
Total	10	2	0	4	16

Tableau 1 : Matrice de décomposition des émissions par lots et par phase – exemple pour une opération contenant une restauration de sa façade et de ses menuiseries extérieures (tCO₂e)

³¹ Décompte général et définitif, Décomposition des prix globale et forfaitaire et Bordereau des prix unitaires – des marchés de travaux passés avec les entreprises.

³² La base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements de la construction

³³ La Base Empreinte est la base de données publique, française et officielle de facteurs d'émission et de jeux de données d'inventaire de l'agence de la transition écologique (ADEME)

³⁴ Base de données privée d'inventaires de cycle de vie

³⁵ EPD international est un programme mondial pour les déclarations environnementales (Environmental Product Declaration)

Approche en analyse de cycle de vie

Pour quantifier les émissions de GES des opérations de restauration, une approche par analyse en cycle de vie est utilisée. A l'échelle d'une intervention, nous considérons l'ensemble des phases de cycle de vie des matériaux apportés, de la phase de production à la fin de vie (i.e. de l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la phase de décharge) en passant par la mise en œuvre et l'utilisation³⁶. Ces informations proviennent de la base INIES (voir Figure 18). La fin de vie des matériaux déposés est également prise en compte.

À l'échelle de l'opération, on considère l'empreinte des travaux auxquels s'ajoute l'empreinte carbone du fonctionnement du chantier (installation, fonctionnement et énergie de la base vie, etc.). Les données de chantier étant souvent indisponibles, un ratio de 5 % des émissions travaux a été pris pour les estimer³⁷.

La durée de référence pour étudier les émissions d'un bâtiment est de 50 ans. Cette norme comptable a été reprise ici, afin de pouvoir comparer les résultats à d'autres études. Cette durée permet de comptabiliser le renouvellement théorique des matériaux sur 50 ans. Si un matériau a une durée de vie inférieure à 50 ans alors il sera compté plus d'une fois sur cette période. Par exemple, un produit qui a une durée de vie théorique de 10 ans selon sa FDES, sera compté 5 fois.

Cette méthodologie permet d'avoir une vue d'ensemble des émissions liée à l'opération sur 50 ans, et inciter à mettre en œuvre des matériaux durables. Elle est particulièrement adaptée pour le neuf, mais pose certaines limites pour la rénovation et la restauration. En effet, une opération de restauration peut être partielle (par exemple se concentrer sur la toiture), et il se peut qu'une autre opération soit nécessaire quelques années plus tard pour renouveler d'autres lots (par exemple les lots techniques). Ainsi les résultats sur 50 ans d'une opération sont dépendant de son programme et ne sont pas forcément représentatifs de l'ensemble des impacts de travaux du bâtiment existant.

De plus, les durées de vie sont théoriques et ne peuvent présumer des durées de vie effective des matériaux de chaque opération. Il semblerait qu'en opération MH, une attention particulière soit portée à la qualité, l'épaisseur et la durabilité des matériaux posés. D'ailleurs, certains matériaux peuvent même avoir des durées de vie qui dépassent 50 ans (comme les pierre, tuiles et ardoises par exemple). Dans ce cas-là, l'impact des matériaux sur 50 ans est tout de même pris à 100 %, l'amortissement n'ayant pas de sens physique (les émissions de production sont émises à 100 % lors de l'année de mise en œuvre) et n'étant pas pratiqué dans les référentiels et études d'ACV bâtiment.

Cependant cela amène à prendre encore plus de précaution dans la comparaison avec la rénovation ou le neuf, qui a priori mettent en œuvre des matériaux à durée de vie plus courte.

Extrapolation des résultats à l'ensemble des travaux réalisés sur une année

Grâce aux déclarations et demandes d'autorisation de travaux sur les monuments classés ou inscrits, le ministère de la Culture suit le nombre d'opération déclarée par an. Avec les outils de suivi des données du ministère³⁸, il a été possible d'estimer le nombre moyen d'opérations de travaux engagés chaque année en France. En multipliant ce nombre par la moyenne des émissions carbone en tCO₂e d'une opération, issue de l'échantillon de l'étude, il a été possible d'avoir un premier ordre de grandeur des émissions de travaux à l'échelle du parc des MH. Ce calcul simple comporte intrinsèquement des biais et une incertitude élevée, d'autant plus que l'échantillon initial est très faible, et que l'extrapolation n'a pas pu prendre en compte les paramètres liés à l'état sanitaire initial, le programme, la durée des travaux, le parti de restauration, les surfaces, ou encore les potentiels objectifs de performance, par manque de données. Il reste un premier ordre de grandeur.

RÉSULTATS DE L'EMPREINTE CARBONE D'UNE OPÉRATION DE RESTAURATION

Résultats généraux

Les résultats de l'empreinte carbone de chaque opération de rénovation étudiée varient fortement d'une opération à l'autre, allant de 7 à 400 kgCO₂e/m² (voir Figure 19). L'indicateur par intensité surfacique permet de représenter plus fidèlement des opérations sur des MH de surface variable, car les résultats en absolus sont très impactés par la taille du monument objet de la restauration. On observe que le poids relatif de chaque lot est dépendant des opérations étudiées, dont les programmes varient fortement. C'est en particulier vrai pour le résidentiel, où les deux opérations étudiées sont concentrées sur 1 ou 2 lots et ne sont pas représentatives de tout ce qu'il peut se faire en termes de restauration. Ces variations sont également perceptibles dans le tertiaire, où les besoins de mises aux normes et d'accessibilité peuvent influencer sur les résultats. En moyenne, dans l'échantillon étudié, une opération de restauration couvre 4 lots, et les lots les plus fréquemment inclus sont les menuiseries extérieures (dans 90 % des cas), la couverture (80 %), les façades (70 %) et la charpente (45 %).

La moyenne du poids carbone des onze opérations étudiées est de 130 kgCO₂e/(m².50ans). Cependant, la plupart de ces



Travaux = Composants = produits de construction et équipements

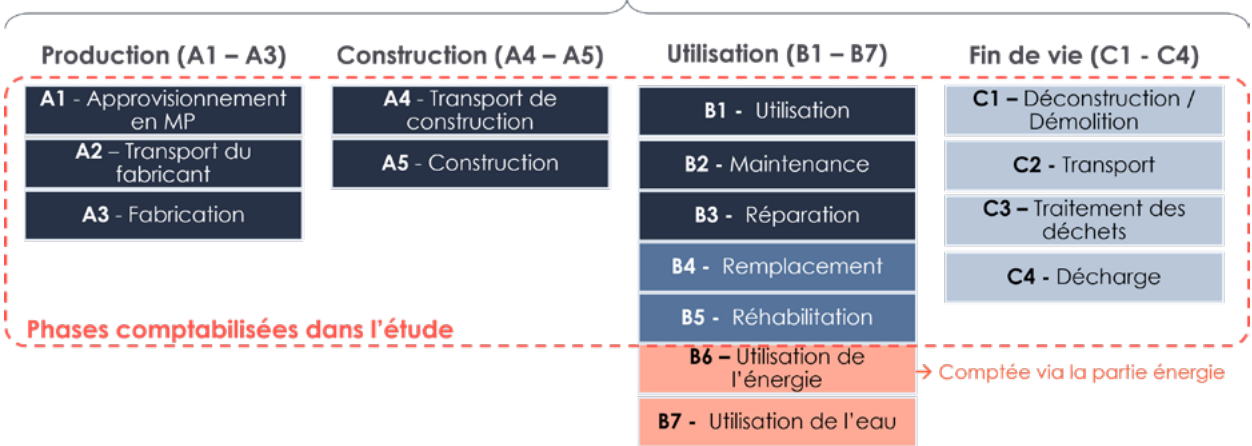


Figure 18 : Schéma expliquant les phases du cycle de vie considérées à l'échelle de l'opération et des travaux

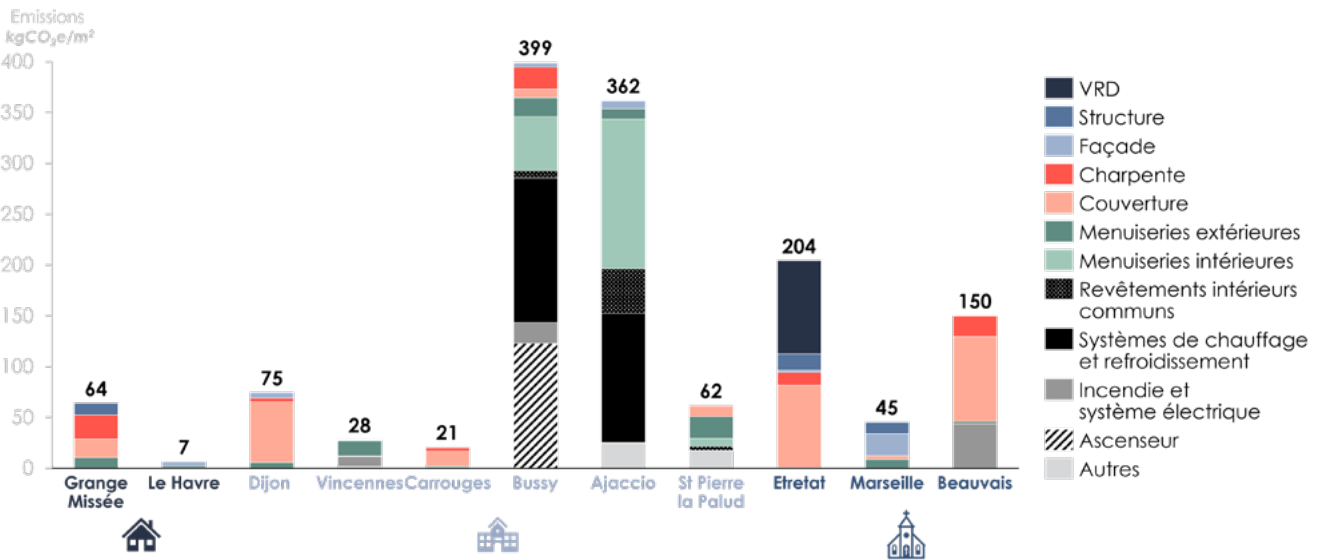


Figure 19 : Répartition des émissions de travaux par lots avec renouvellement (sur 50 ans)

³⁶ hors utilisation d'énergie et de l'eau – phase B6 et B7
³⁷ Ratio défini par Carbone 4 à partir des données disponibles sur les émissions de chantier connues, issues du Hub des prescripteurs bas carbone, non spécifiques aux chantiers de monuments historiques et donc avec une incertitude élevée.

³⁸ Outils AgrEgée et Vidoc du ministère. Analyse entre 2019 et 2023, en excluant les autorisations liées aux objets, aux panneaux publicitaires, aux études et aux travaux d'entretien.

opérations se concentrent sur un petit nombre de lots et leur moyenne paraît peu représentative. La fourchette haute se situe entre 350 et 400 kgCO₂e/(m².50ans), pour les opérations de Bussy et Ajaccio, dont les programmes comprenaient la mise en place d'équipements techniques nécessaires aux usages des sites. Dans ces deux cas particuliers, on voit l'impact carbone considérable d'un équipement programmatique, indispensable à la mise en accessibilité, mais sans rapport avec la conservation du MH, ni avec son amélioration énergétique.

Pour obtenir un ordre de grandeur du poids carbone d'une opération de restauration plus représentative et comparable à des opérations de rénovations classiques, la somme des moyennes de chaque lot couvert au moins trois fois dans notre échantillon (c'est-à-dire tous les lots, hors VRD et lots techniques) a été calculée. Celle-ci s'élève à 230 kgCO₂e/(m².50ans) (voir Figure 20).

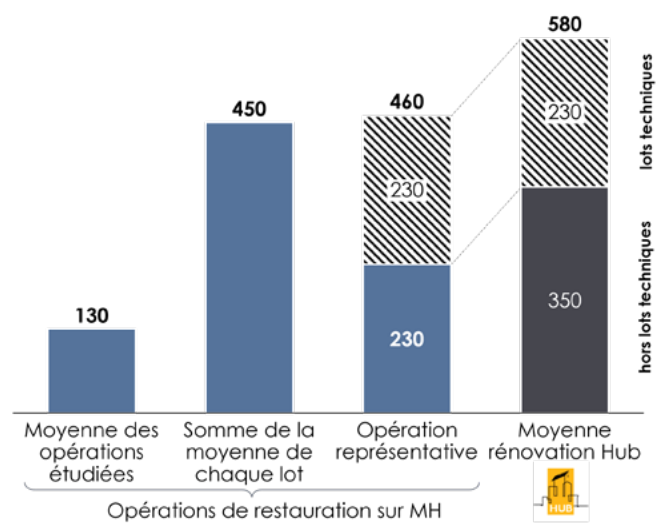


Figure 20 : Émissions moyennes des travaux de différentes typologies d'opération

Il n'est pas aisé de comparer les résultats des onze opérations de restauration de MH étudiées dans le cadre de cette étude avec des valeurs moyennes de rénovation classiques en France. En effet il s'agit toujours de cas particuliers, chaque opération ayant ses spécificités. De plus, pour cette étude, des facteurs d'émissions spécifiques aux gestes de restauration ont pu être créés, sans forcément

suivre les normes demandées pour créer des FDES. Cela étant dit, en moyenne les opérations sur MH issus de ce petit échantillon sont moins émissives que des opérations de rénovations classiques (toutes typologies confondues).

- L'étude NZC rénovation³⁹ montre des valeurs allant de 150 à 750 kgCO₂e/(m².50ans).
- L'OID⁴⁰ indique des valeurs moyennes de 200 kgCO₂e/(m².50ans) pour des rénovations légères à 900 kgCO₂e/(m².50ans) pour des rénovation lourdes.
- L'observatoire du Hub des prescripteurs bas carbone⁴¹ présente une valeur moyenne de 580 kgCO₂e/(m².50ans), ou 350 kgCO₂e/(m².50ans) hors lots techniques.

Les opérations de cette étude n'incluaient pas toutes de lots techniques. Cela est lié au faible échantillon, et probablement au fait que les exploitants n'ont pas besoin d'autorisations, et ne peuvent avoir de subventions des DRAC concernant le renouvellement de ces lots. Ces lots peuvent donc être changés par les exploitants, en dehors des opérations de travaux de restauration de l'enveloppe par exemple. Les données issues des opérations de restauration ne sont donc statistiquement pas représentatives des travaux sur lots techniques, que l'on peut considérer équivalent en MH à ceux qui sont déployés sur les autres bâtiments existants.

La moyenne des rénovations classiques est de 580 kgCO₂e/(m².50ans) selon le Hub des Prescripteurs Bas Carbone, dont 230 kgCO₂e/(m².50ans) correspond aux lots techniques. Le poids carbone des lots techniques est probablement similaire dans une opération MH que celui dans une rénovation classique. Si on ajoute le poids carbone moyen des lots techniques à celui d'une restauration moyenne représentative des MH (qui couvre uniquement les lots architecturaux), on peut estimer le poids d'une opération MH qui inclurait les lots techniques : celle-ci s'élèverait à 460 kgCO₂e/(m².50ans). Le poids relatif des lots techniques compterait pour plus de 50 % de l'impact total d'une opération MH vs. 40 % pour une rénovation classique, et pourrait

donc être le premier poste d'émissions de la partie « travaux ». Son absence dans cette étude invite donc à réaliser des recherches complémentaires spécifiques aux lots techniques dans les MH.

Focus et détails sur les émissions

Une analyse des résultats par lot (Figure 21) permet d'identifier les lots les plus émissifs selon l'échantillon étudié : les restaurations de menuiseries et de couverture représentent un poids carbone significatif dès lors que les éléments sont remplacés. Or ce sont des lots qui sont régulièrement restaurés (dans 90 % des opérations étudiées pour les menuiseries et dans 75 % pour la couverture) et ont donc un poids global important. Les travaux sur la voirie et les réseaux (VRD) peuvent également peser lourd dès qu'il y a une pose de matériaux conventionnels (béton, acier). À noter que les lots techniques pourraient sûrement peser

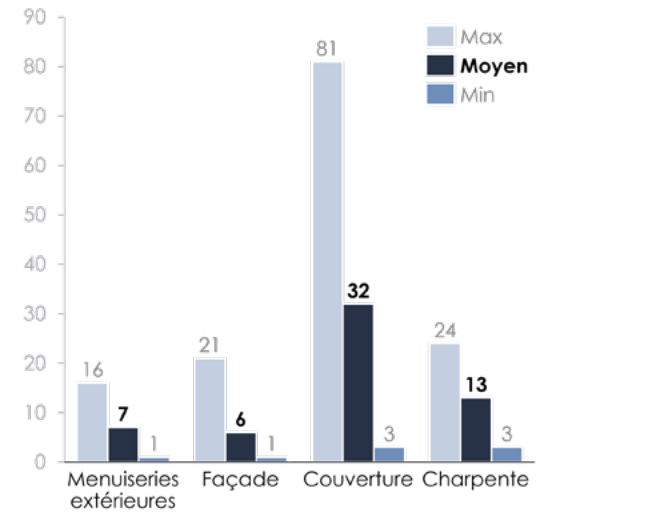
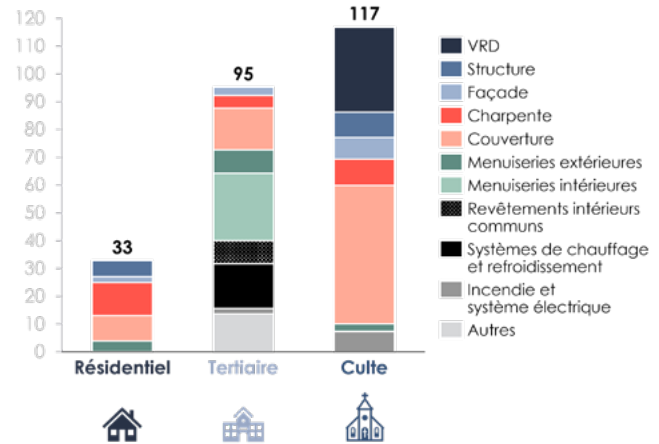


Figure 21 : Émissions moyennes des travaux répartis par lot et par typologie - kgCO₂e/m² sans renouvellement

fortement dans les résultats moyens s'ils étaient intégrés dans le périmètre des travaux. Sur les onze opérations étudiées, seules deux comprenaient le lot CVC par exemple.

Lorsque l'on regarde les résultats par opération (voir Figure 19), on constate que les équipements techniques liés à des besoins programmatiques peuvent peser fortement alors qu'ils sont sans lien avec la restauration du monument ou son amélioration énergétique. C'est le cas dans l'opération de Bussy, où la mise en accessibilité avec l'installation d'un ascenseur et de son système de refroidissement pèse pour les deux tiers de l'impact total de l'opération. Dans la bibliothèque d'Ajaccio, le besoin de renouvellement de la centrale de traitement de l'air à des fins de conservation des collections de livres anciens compte pour un tiers des émissions. Pour finir, dans le cas de la Cathédrale de Beauvais, un quart des émissions sont liés à la sécurisation incendie.

De plus, lorsqu'on compare les résultats avec et sans renouvellement (tous les résultats sont disponibles en Annexe V – Section 4)⁴², on constate que la durée de vie des matériaux et équipements joue fortement. Même s'il est difficile d'évaluer précisément la vitesse de renouvellement réelle des matériaux MH (qui varie selon leur nature, leur entretien et leur environnement), il paraît évident qu'elle soit moindre que celle des équipements, qui sont de leur côté renouvelés plusieurs fois sur 50 ans (leur durée de vie allant rarement au-delà de 20 ans). Ainsi, plus on se rapproche d'une prise en compte réelle du renouvellement, plus le poids carbone de la technique augmente relativement à celui de l'enveloppe architecturale. Ces constats viennent renforcer la nécessité de penser les usages de manière frugale et de les adapter aux performances intrinsèques du bâtiment, dès les phases de conception du programme.

Les résultats par phase montrent que c'est la fourniture des matériaux et des équipements (c'est-à-dire les émissions liées à leur extraction et fabrication) qui est la plus émissive :

- Pour les matières premières, c'est la phase d'extraction dans les mines et carrières,
- Pour les produits finis, c'est l'addition des

³⁹ NZC est un programme lancé en 2020 par l'Alliance HGE-GBC pour réduire les émissions de carbone dans les bâtiments existants. <https://www.hqegbc.org/ressources/probleme-nzc-renovation-rapport-optimisation-et-scenarios-des-cas-generiques-retenus/>

⁴⁰ Observatoire de l'immobilier durable, Poids carbone des logements : comment optimiser les actions de rénovations énergétiques ?, Juin 2021, <https://o-immobilierdurable.fr/poids-carbone-des-logements-comment-optimiser-les-actions-de-renovations-energetiques/>

⁴¹ Résultat des travaux effectués par le HUB sur la rénovation bas carbone, publié en janvier 2025, <https://www.ifpeb.fr/ressources/la-renovation-bas-carbone/>

⁴² Résultats disponibles sous plusieurs formats : avec ou sans renouvellement sur 50 ans, en absolu (tCO₂e) ou en intensité (kgCO₂e/m²).

émissions des matières premières et de la transformation et d’assemblage.

La phase de construction, c’est-à-dire la pose pendant le chantier des matériaux pèse autour de 13%. Les matériaux déposés sont souvent en quantité limitée et leur traitement pèse assez peu dans les émissions totales des opérations étudiées (voir Figure 22). Ceci traduit le fait que le renouvellement de matière ancienne par l’acte de restauration reste limité aux parties dégradées, plutôt qu’opéré par ouvrages entiers, voire par catégories d’ouvrages.

Résultats extrapolés au parc des MH

À l’échelle des 46 000 MH, environ 3 200 déclarations de travaux sur des immeubles ont été déposées par an entre 2019 et 2023⁴³. D’après les données croisées avec Vidoc⁴⁴, la moitié d’entre elles concernaient des études et des travaux d’entretien, et l’autre moitié des travaux de restauration ou réhabilitation. Cela correspond à environ 1 600 opérations de travaux de restauration par an. La moyenne des émissions des onze opérations de cette étude est autour de 125 tCO₂e. Si celle-ci s’avère représentative, alors les émissions annuelles associées aux travaux de restauration des MH en France s’élèveraient à 200 ktCO₂e, soit 2 % des émissions nationales du secteur de la construction⁴⁵.

Conclusion et principaux apprentissages sur l’empreinte carbone des travaux

En moyenne, sur l’échantillon de l’étude, une opération de restauration (toutes typologies confondues) couvre 4 lots de construction et pèse 130 kgCO₂e/m² avec renouvellement sur 50 ans. Cela dit, le poids carbone d’une opération de restauration est très variable, allant d’environ 5 à 400 kgCO₂e/(m².50 ans). Cette grande variabilité est principalement due :

- Au programme du MH et des travaux : ces derniers sont plus émissifs lorsqu’ils embarquent des systèmes techniques pour répondre à des besoins de mise aux normes de sécurité ou d’accessibilité du public par exemple ;
- À l’état de conservation du MH : s’il est

en péril, il y a plus de risque de devoir remplacer une grande quantité de matière que s’il a été bien entretenu au fil des ans ;

- À la surface à laquelle sont ramenées les émissions : cela peut influencer notamment lorsque l’on compare des travaux ciblés sur la façade ou la couverture à des travaux plus globaux.

Si on considère une opération représentative, qui couvrirait l’ensemble des principaux lots de construction (hors VRD et lots techniques) alors le poids carbone moyen s’élève à environ 230 kgCO₂e/(m².50 ans) avec renouvellement. Si on ajoute le poids carbone moyen des lots techniques en rénovation, alors on obtient une intensité carbone d’environ 460 kgCO₂e/(m².50 ans) pour une opération de restauration de MH comparable à une opération de rénovation classique. Il apparaît donc que l’approche en restauration, telle qu’évaluée sur un échantillon restreint d’opérations, est moins émissive qu’une rénovation classique (de l’ordre de 20 %). Au regard de l’échantillon de données, la généralisation de cette tendance à l’ensemble des opérations de restauration des MH n’est pas encore possible. Il est nécessaire d’élargir l’étude à un échantillon d’opérations plus complet afin de parvenir à une conclusion ferme. Cela dit, on observe une tendance dans le cadre de cette étude, qu’il serait intéressant de confirmer.

Les travaux de restauration étudiés dans le cadre de cette étude sont en moyenne moins émissifs que des travaux de rénovation classiques, selon les études récentes réalisées à ce sujet. Cela est permis grâce à la conservation des matériaux in situ, notamment du gros et second œuvre, aux pratiques de restauration à la main avec renouvellement sélectif, et pour le patrimoine traditionnel, le recours à des matériaux bio et géo sourcés.

LES LEVIERS DE DÉCARBONATION DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX

Les émissions des travaux de restauration sont faibles par rapport aux émissions d’exploitation énergétique. Le principal enjeu des travaux des MH est donc d’intégrer le volet énergétique pour réduire les consommations et changer les vecteurs. Toutefois, au vu des objectifs de neutralité carbone de la France, il est nécessaire de réduire les émissions partout où c’est possible, y compris des travaux.

C’est notamment lors de la conception du programme du MH, à la main des MOA, qu’il est possible de jouer sur l’impact carbone des travaux, en proposant des usages adaptés aux spécificités du bâti et en proposant une approche frugale et bioclimatique avec par exemple de la mutualisation d’espace ou des usages transitoires. Penser en amont la question des usages, en acceptant de remettre en question certaines normes de confort et de performance, permet d’éviter de surcompenser par des apports de technologie et de matériaux émissifs.

Étant donné que les émissions liées aux travaux sont principalement liées aux matériaux et équipements mis en œuvre, les leviers les plus importants se concentrent sur la réduction de la quantité et le choix de matériaux décarbonés.

Chaque levier d’action identifié dans le cadre de cette étude est présenté en détails dans les *Tableau 2* et *Tableau 3*, avec une évaluation du potentiel de décarbonation de chaque action. Les actions sont divisées en deux catégories, celles portant sur les matériaux et celles portant sur le chantier : les conditions de succès et les co-bénéfices identifiés sont précisés pour chaque action.

Les principaux leviers de décarbonation des matériaux

La logique sobriété-efficacité-substitution guide toujours le chemin vers la décarbonation. Pour décarboner les matériaux mis en œuvre durant les travaux, celle-ci peut se traduire par les grandes questions suivantes :

- Comment entretenir et restaurer pour maintenir au mieux les matériaux existants ?
- Comment assurer une résistance des matériaux dans le temps ? Quelle gamme, épaisseur ou type de matériaux choisir pour allonger la durée de vie ?
- Comment utiliser moins de matière première neuve ? Comment développer le réemploi des matériaux en place (*in situ*) ou des matériaux issus d’autres sites, ou l’utilisation de matériaux recyclés ? Comment favoriser le réemploi ex-situ des matériaux déposés ?
- Comment favoriser des matériaux bas carbone, c’est-à-dire issus de matières premières bio ou géo-sourcées, locales ou issus de la R&D des alternatives aux matériaux conventionnels ?

Ce sont les leviers qui permettent de réduire les quantités de matière neuve posées qui possèdent les potentiels de décarbonation les plus élevés. Par exemple, sur l’opération de restauration de la structure et de la toiture de la Grange Missée à Chaillac, le réemploi sur site des tuiles a permis d’éviter l’augmentation de 50 % des émissions des travaux. Le maintien des matériaux en place, par l’entretien régulier, la restauration ciblée et le réemploi notamment *in situ*, est clé pour éviter de fournir et poser des matériaux neufs. Lorsque le réemploi in-situ n’est pas possible, il est important de développer des filières régionales afin de rendre le réemploi ex-situ plus facile d’accès et effectif. Les savoir-faire détenus par les entreprises qualifiées en restauration sont le support des méthodologies à déployer pour le réemploi, dont l’assurabilité, base de viabilité en construction est fondée sur la traçabilité du matériau et des opérations qu’elles connaissent.

Lorsque le maintien et le réemploi ne sont pas possibles, choisir des matériaux biosourcés et/ou recyclés peut alors permettre une réduction significative des émissions. À noter que le patrimoine bâti traditionnel est déjà engagé dans un recours massif aux matériaux biosourcés dans les modes constructifs traditionnels. Les opérations de restauration ont donc, par nature, recours majoritairement à des matériaux biosourcés ; mais certaines opérations ou ouvrages peuvent parfois présenter un choix dans les matériaux à

⁴³ Données issues d’AgrÉgée. Moyenne hors année 2020 (COVID).
⁴⁴ Base de données et outil de gestion du ministère de la Culture.
⁴⁵ Feuille de route décarbonation du secteur du bâtiment, 2024 : 50 MtCO₂e liée à la construction (neuve et rénovation).

poser. C’est dans ces cas particuliers qu’il est pertinent d’explorer l’option biosourcée à la place d’un matériau conventionnel. À l’inverse des produits de construction conventionnels qui nécessitent une grande quantité d’énergie thermique pour leur fabrication, la production des matériaux biosourcés est souvent plus sobre en énergie et repose sur des matières végétales renouvelables qui peuvent aussi stocker du carbone.

Quand l’utilisation de matériaux conventionnels (acier, ciment, verre) est nécessaire dans une opération de travaux de restauration (notamment sur le patrimoine postérieur à la révolution industrielle), les émissions peuvent grimper rapidement. Le recours aux gammes dites « bas carbone », issues souvent du recyclage et de l’électrification des procédés, permet de limiter les impacts.

La provenance locale des matériaux est moins déterminante du côté des émissions, le transport pesant souvent assez peu dans l’empreinte matériaux. Ce levier peut être toutefois une condition de succès des autres actions : le développement de filières régionales permettant d’assurer la disponibilité de matériaux biosourcés et de réemploi sur un territoire. De nombreuses initiatives et centres de ressources autour des matériaux se développent et sont notamment recensés par le réseau Bâtiment Durable⁴⁶.

Les leviers de décarbonation des chantiers

Les émissions de chantier sont encore aujourd’hui souvent calculées avec des approches forfaitaires, même pour la construction neuve, ce qui rend difficile d’identifier et calculer les leviers les plus impactant. Les émissions de chantier sont a priori faibles par rapport aux poids des matériaux, mais elles n’ont pu être calculées dans cette étude pour le vérifier. Cependant, la même logique de décarbonation s’applique pour les chantiers MH, à savoir :

- Mettre en œuvre des actions pour réduire les consommations d’énergie et de matières premières : compactifier et isoler les bases vies, réduire l’usage des produits

- pétrochimiques, réduire la production des déchets ;
- Utiliser des énergies et matières bas carbone : électrifier les engins, utiliser des équipements de chantier à base de matières recyclées ou réemployés (échafaudage).

Les déplacements des professionnels peuvent également être une source importante d’émissions, bien qu’ils soient hors périmètre de cette étude (et de la plupart des référentiels carbone dont la RE2020). Une attention peut ainsi être portée sur la sélection des artisans en fonction de leur localisation et de leur mode de transport, et sur le fait de restaurer des parties amovibles en atelier vs sur le chantier. Le détail de chacun de ces leviers, avec les explications sur le potentiel, les conditions de succès et les co-bénéfices, se trouve sur le Tableau 3.

Leviers de réduction des émissions	Description	Potentiel de décarbonation	Explication sur le potentiel	Lots de travaux les plus concernés	Conditions de succès	Co-bénéfices
Bien entretenir	Bien entretenir les matériaux, produits et équipements pour maintenir en place l'existant et renouveler le moins possible.	Élevé	L'entretien régulier permet d'éviter de renouveler les matériaux trop rapidement. Par exemple, une toiture entretenue régulièrement évitera des infiltrations et/ou de la casse de certaines ardoises ou tuiles, et n'aura pas besoin d'être révisée tous les 50 ans (ou à la marge). Cela peut donc réduire les émissions de moitié.	Bâtiment dans son ensemble, mais en particulier l'enveloppe	Fourniture d'une notice d'entretien des matériaux posés (ou base de données accessible à tous). Engagement de l'occupant / MOA à faire l'entretien régulier (désignation de responsable de l'entretien, formation, etc.).	Réduction des coûts sur le long terme (mais investissement initial potentiellement plus important). Réduction des pressions sur les ressources.
Utiliser des matériaux résistants, à longue durée de vie	Choisir des matériaux qui vont résister dans le temps aux différents usages, vont bien vieillir et vont pouvoir être restaurés/réparés. Cela peut passer dans le choix de la gamme, de l'épaisseur ou du matériaux en lui-même.	Élevé	Le potentiel de décarbonation pourra se voir sur une durée longue (250ans). Exemple : une ardoise de 3mm sera renouvelée probablement avant qu'une ardoise de 5 mm. D'après la base Inies, les ardoises ont des durées de vie de 50 ans vs. 100 ans pour les tuiles.	extérieure qui est soumise aux éléments.	Intégration du potentiel surcoût dans le budget initial. Prescription de performance par la MOA.	Réduction des coûts sur le long terme. Réduction des pressions sur les ressources.
Utiliser des produits et matériaux issus du réemploi	Privilégier les produits et matériaux issus du réemploi in situ (sur un même site / opération) ou ex situ (provenant d'un autre chantier de déconstruction)	Élevé	Le réemploi permet d'éviter d'extraire des matériaux neufs et a donc un potentiel de décarbonation très important par rapport à un scénario dépose/pose neuve.	Structure, façade, toiture, isolants, revêtements, menuiseries	Structuration de filières pour créer un gisement de matériaux de réemploi et de professionnels formés à la dépose.	Réduction des pressions sur les ressources. Filière locale, souveraineté territoriale. Réduction des déchets.
Utiliser les matériaux bio et géosourcés	Privilégier les matériaux biosourcés (bois, paille, chanvre, laine, liège, lin, miscanthus, riz, roseau/chaume, algues, champignons, huiles, etc.) et géosourcés (pierre, terre crue).	Élevé	Les matériaux bio et géo sourcés ont en moyenne des intensités carbone plus faibles (< ~50 kgCO2e/tonne) que les matériaux conventionnels (entre 100 à 3000 kgCO2e/tonne). (Attention aux matériaux composites qui peuvent utiliser des liants à base de ciment)	Structure, façade, toiture, isolants, revêtements	Structuration de filières pour créer des gisements de matériaux et de professionnels formés à leur pose. Prescription de performance par la MOA.	Compatibilité bâti traditionnel. Filière locale, souveraineté territoriale. Performance et confort d'habitation (acoustique, hygrothermique). Filière sèche. Stockage carbone pour le biosourcé.
Utiliser des matériaux issus de filières locales	Privilégier les matériaux disponibles localement (éviter le transport longue distance de grande quantité de matériaux)	Faible	Joue uniquement sur le transport qui pèse peu (<5%) dans les émissions des matériaux conventionnels (mais la part du transport augmente pour les matériaux bas carbone, à l'instar du réemploi).	Pour les éléments lourds / en grande quantité : structure, toiture	Structuration de filières locales (dans chaque région). Intégration du potentiel surcoût dans le budget initial.	Réduction des coûts. Filière locale, souveraineté territoriale.
Utiliser des matériaux recyclés	Privilégier des matériaux issus de filières de recyclage (métaux, verre, isolants à partir de fibres recyclées)	Moyen	Le verre ou l'acier recyclé est en moyenne deux fois moins émissif que son homologue neuf.	Structure, façade, isolants, revêtements, menuiseries	Formation des professionnels sur leur mise en œuvre. Intégration du potentiel surcoût dans le budget initial. Prescription de performance par la MOA.	Réduction des pressions sur les ressources. Filière locale, souveraineté territoriale.
Utiliser les alternatives bas carbone des matériaux conventionnels	Lorsque des matériaux conventionnels sont nécessaires (ciment, acier, verre), choisir les gammes bas carbone issues de la R&D.	Moyen	Les intensités peuvent plus ou moins varier en choisissant la gamme "bas carbone". Les baisses de carbone annoncées par les fournisseurs de béton et de verre peuvent aller de -20% à -70% par rapport aux gammes standard.	Structure, menuiseries, isolants	Formation des professionnels sur leur mise en œuvre. Intégration du potentiel surcoût dans le budget initial. Prescription de performance par la MOA.	Filière locale, souveraineté territoriale.
Choisir des modes d'intervention bas carbone	Si pour une intervention, le choix existe entre différents procédés, privilégier celui bas carbone (avec le moins de matériaux émissifs ou de consommations d'énergies fossiles)	Faible	Exemple d'intervention : pour nettoyer une façade en maçonnerie, il existe plusieurs procédés au choix. Le laser ou cataplasme argileux est quatre fois moins émissif que l'hydrogommage avec du sable et 6 fois moins que du peeling.	Structure, façade, revêtements	Adapter les modes d'intervention au besoin. Disposer de l'expertise et de la main d'œuvre qualifiée.	

Tableau 2 : Détails sur les leviers de décarbonation des matériaux

⁴² Résultats disponibles sous plusieurs formats : avec ou sans renouvellement sur 50 ans, en absolu (tCO₂e) ou en intensité (kgCO₂e/m²).

Leviers de réduction des émissions	Description	Potentiel de décarbonation	Explication sur le potentiel	Conditions de succès	Co-bénéfices
Compacter et isoler les bases vie	Dans le cas de gros travaux impliquant l'installation de bases vie : porter une attention particulière aux consommations d'énergie associées	Faible	Avoir une base vie plus compacte et isolée permet de réduire les consommations de chauffage de la base (-10% à -50%).		Réduction des coûts du chantier
Electrifier les engins & équipements de chantier	Remplacer les équipements thermiques-fossiles par des équipements électriques (ou faire un retrofit pour les électrifier)	Faible	L'électrification de véhicule, engins et équipements permet de réduire drastiquement l'usage des énergies fossiles et donc de réduire significativement les émissions associées.	Chantier adapté pour la recharge des équipements. Signer des contrats cadres pour permettre aux entreprises d'investir.	Réduction des coûts du chantier Sécurité sur le chantier
Utiliser des équipements et échafaudages à base de métaux recyclés	Utiliser des équipements et échafaudages fabriqués en métaux recyclés	Faible	Les métaux recyclés/bas carbone pouvant être deux fois moins carbonés que des métaux neufs, cela peut réduire par deux le poids carbone de l'échafaudage. Celui-ci reste très peu significatif par rapport au poids total d'une opération.	Les filières d'approvisionnement des équipements de chantier doivent pour sourcer et proposer des gammes basses carbone.	
Réduire l'usage de produits chimiques	Si le choix est disponible entre plusieurs processus (ex : nettoyage, peinture, traitement), privilégier ceux mécaniques, ou à base d'eau et éviter l'usage des produits pétrochimiques	Faible	Les produits issus de la pétrochimie sont souvent émissifs, en plus d'être des potentiels polluants pour la santé humaine et des écosystèmes. Leur dose est souvent limitée (et ramenée à 1m2 de surface), mais peut représenter un potentiel d'économie carbone.	A étudier au cas par cas, pour s'assurer de l'efficacité sur le long terme.	Environnementaux / santé
Réduire les déchets de travaux	Réduire la production de déchets, en réparant, réemployant et en valorisant les matériaux déposés	Faible	Les émissions de fin de vie des matériaux déposés représentent environ 6% des émissions des opérations de travaux étudiées. Ce n'est pas le poste fin de vie qui va permettre de grandes économies de carbone, mais il peut en permettre ensuite sur le volet matériaux d'autres chantiers.	Disposer d'une filière locale de réemploi	Réduction des coûts du chantier
Réduire les déplacements des professionnels	Faire appel à des professionnels locaux et favoriser leur venue sur les chantiers en mobilité décarbonée (mise en place de bornes de recharge pour les véhicules, parking vélo, appli de covoiturage, etc.)	Faible	Les émissions de déplacements des professionnels ne sont aujourd'hui pas comptabilisées. Elles seraient a priori peu significatives à l'échelle d'une opération. Cependant les actions sur ce volet peuvent réduire significativement ces émissions.	Former, proposer des solutions concrètes	Filière locale, souveraineté territoriale

Tableau 3 : Détails sur les leviers de décarbonation du chantier

Vers une trajectoire quantifiée

Cette étude n'a pu calculer précisément les gains potentiels des leviers d'action sur le volet travaux ni quantifier une trajectoire globale (comme sur la partie énergie). Cela est liée aux limites rencontrées, notamment au fait que l'échantillon de départ était très faible et à la présence d'une variabilité particulièrement forte constatée entre les opérations sélectionnées, inévitable dans la mesure où les opérations ont été choisies pour couvrir le plus grand spectre typologique possible. Les gains sont intrinsèquement dépendants du programme et des lots de travaux concernés. Calculer des gains aurait été biaisé par l'échantillon de départ.

L'outil à destination des MOE permettra d'approfondir la maîtrise de l'empreinte carbone des opérations de restauration et donc d'aider les architectes du patrimoine à identifier et quantifier les leviers et gains pour chaque opération. Une fois que cet outil aura été suffisamment utilisé, il sera possible d'analyser et consolider les résultats pour estimer les gains carbone moyens de chaque levier et dessiner une trajectoire à l'échelle du parc des MH.

Une démarche extensible à l'ensemble du bâti existant

Cela étant dit, l'approche en restauration étant moins émissive qu'une opération de rénovation classique, l'intérêt principal de cette étude a été d'identifier les bonnes pratiques déjà mises en œuvre sur un chantier de restauration afin de les répliquer sur toute opération de restauration de bâti à caractère patrimonial ou non. L'approche en restauration, qui consiste à conserver un maximum de matière et choisir des matériaux à longue durée de vie, présente des atouts à valoriser dans le cadre de la décarbonation des filières de travaux en France.

CRÉATION D'UN OUTIL DE CALCUL DE L'EMPREINTE CARBONE D'UNE OPÉRATION DE RESTAURATION

Objectif de l'outil

Pour répondre au besoin de quantification des émissions de GES d'une opération de restauration, Carbone 4 a développé la « Calculette Carbone ». Elle est destinée principalement aux maîtres d'œuvre. Cet outil permet de calculer les émissions carbones d'une opération dès la phase de conception, et de comparer différents matériaux ou processus pour orienter des décisions de restauration. C'est un outil d'aide à la décision qui a pour objectif de réduire l'impact carbone d'une opération grâce à une mesure fine de l'impact de chaque élément. Cet outil mesure uniquement l'impact des travaux et du chantier de restauration ; il ne permet pas d'estimer la performance énergétique et carbone lié à l'exploitation du MH objet d'une restauration.

Pour fonctionner, l'outil utilise en entrée les données de matières de l'ensemble des interventions réalisées sur le monument historique, traduites par des quantités et des métrés de matériaux et processus. En sortie, l'outil permet d'obtenir les émissions détaillées de l'opération étudiée avec une vision sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux mis œuvre, sur une durée de vie de 50 ans.

Afin de comparer l'impact carbone de l'opération de restauration à celle de l'exploitation du monument dans son ensemble (à travers ses consommations énergétiques), des données de performance énergétique issue d'audits et d'études spécialisées peuvent être renseigné dans l'outil. La performance énergétique avant et après travaux sera traduite en performance carbone et comparée à l'empreinte carbone embarquée des travaux.

Méthodologie de construction de l'outil

La calculette carbone repose sur une méthodologie de calcul d'empreinte carbone. Carbone 4 s'est concentré sur les postes

d'émissions significatifs et a exclu les interventions non matérielles⁴⁷. Pour chaque intervention, l'utilisateur indique la quantité de matériaux apportées ou le métré concerné. Cette approche par flux physique permet d'assurer une robustesse et un niveau de précision important et ainsi de garantir la qualité des résultats. L'outil associe ensuite un facteur d'émission approprié à chaque flux physique. Puis par produit, on obtient les émissions de chaque étape de l'intervention. Par exemple pour une pose d'enduit :

$$\text{Émissions d'enduit (kgCO}_2\text{e)} = \text{Quantité d'enduit (m}^2\text{)} \times \text{Facteur d'émission de l'enduit (kgCO}_2\text{e/m}^2\text{)}$$

La construction de l'outil s'est faite en deux étapes principales :

- Définir une liste d'interventions représentatives des travaux de restauration, par lots de construction, et
- Identifier les facteurs d'émissions associés ou les construire lorsqu'ils ne sont pas disponibles.

La liste des interventions a été définie en concertation avec les architectes membres du groupe de travail avec une approche par lot de construction (ex : couverture, menuiserie...), puis divisé en sous-catégorie (ex : enduit, fenêtre). On compte ainsi un peu plus de 600 interventions réparties sur 16 lots⁴⁸ et 96 sous-catégories.

Une fois la liste d'interventions identifiée, Carbone 4 a associé à chaque intervention un facteur d'émission selon la méthodologie ci-dessous :

Catégorie	Valeur	Unité
Diesel	3,16 * 4/6 = 2,11	kgCO ₂ e/m ²
Consommation	4	L/h
Rendement	6	m ² /h
FE Diesel	3,16	kgCO ₂ e/L
Abrasif	0,043 * 4 = 0,172	kgCO ₂ e/m ²
Consommation	4	kg/m ²
FE Sable	0,043	kgCO ₂ e/kg
Total	2, 11 + 0, 172 = 2, 28	kgCO ₂ e

Tableau 4 : Décomposition du FE : «Nettoyage par micro-abrasiovn»

- Si l'intervention ou le matériau est disponible dans la base INIES⁴⁹, le FE est utilisé en l'état ou adapté, si nécessaire, pour modifier l'unité, à l'aide de la fiche technique fournie. Lorsque plusieurs fiches de déclaration environnementale sont disponibles, Carbone 4 privilégie les fiches collectives issues d'un consensus d'acteurs du secteur puis les déclarations environnementales par défaut du ministère chargé de la construction⁵⁰ et enfin les fiches d'entreprises individuelles.
- Si l'intervention n'est pas disponible dans la base INIES, Carbone 4 construit le facteur d'émissions en décomposant l'intervention en matériaux posés et en consommation énergétique. Puis pour chaque matériau et consommation Carbone 4 utilise un facteur d'émission provenant des bases de FEs suivantes : INIES, Base Empreinte, Ecoinvent ou EPD International. Ce cas de figure est assez fréquent pour les processus propres aux monuments historiques.

Exemple de création de FE – Cas du nettoyage par micro-abrasion :

Le nettoyage par micro-abrasion consiste à projeter un abrasif sur une surface dans le but de la nettoyer. Ce FE n'étant pas disponible dans la base INIES, il a été construit avec une unité adaptée aux MH, ici, par m² de surface nettoyée. On retrouve deux consommations principales : l'abrasif et le carburant⁵¹. A l'aide de recherches et contacts avec des experts, la quantité d'abrasif et la quantité de carburant consommée par m² de surface ont pu être estimés. Carbone 4 a ensuite récupéré les FE de ces 2 consommables sur la base Empreinte de l'ADEME et Ecoinvent, puis a calculé le FE de l'intervention « Nettoyage par micro-abrasion » (voir *Tableau 4*).

Les FEs utilisés sont au format Analyse de Cycle de vie et renseignent les émissions sur les différentes phases de vie du matériau : production, mise en œuvre/construction, utilisation et fin de vie. Cela a permis d'affiner l'outil en créant des natures d'intervention

spécifiques qui peuvent être sélectionnés pour chaque ligne. Les natures d'intervention disponibles dans l'outil sont les suivantes :

- **La pose et fourniture d'élément neuf** qui inclut toutes les phases du cycle de vie des matériaux
- **La pose et fourniture d'élément en réemploi** qui, elle, exclut la phase de production des matériaux
- **La dépose en démolition**, qui comprend la phase de fin de vie du produit
- **La dépose et pose pour restauration et nettoyage**, qui comprend la phase de construction, de transport et de mise en œuvre des matériaux. Cette nature d'intervention permet de décrire les éléments qui seront retirés du MH pour être restaurés en atelier puis réinstallés sur l'édifice.
- **Les processus**, spécifiques aux opérations de MH, incluent toutes les phases du cycle de vie des matériaux et des consommables utilisés.

Pour chaque fiche INIES, la durée de vie du produit est renseignée, cela permet d'évaluer le nombre de fois où un produit devra être renouvelé sur la durée de vie de l'opération qui est, elle fixée à 50. Si la durée de vie du produit est supérieure à cette valeur seuil, le produit ne devra pas être renouvelé et ne sera compté qu'une seule fois. Si la durée de vie est inférieure, on comptera le produit autant de fois que le nombre de renouvellement nécessaire pour atteindre la durée de vie de l'opération.

Principes d'utilisation de l'outil

L'outil se décompose en deux volets. Le volet utilisateur comprend un guide d'utilisation, un onglet de saisie des interventions et des onglets d'affichage des résultats. Le volet fonctionnement comprend une BDD des facteurs d'émissions et des onglets de calculs et de traitement. Il est attendu de l'utilisateur de lire attentivement le guide de fonctionnement puis il peut interagir avec l'outil à 3 niveaux :

1. Le calcul de l'empreinte carbone de l'opération

- Il doit renseigner les différentes interventions de son opération à l'aide des menus déroulant prévus pour aider la prise en main. Pour cela, il doit sélectionner le lot concerné par l'intervention, la sous-catégorie associée et enfin le matériau et/ou le processus réalisé. S'il ne trouve pas son intervention dans la liste, il peut utiliser un matériau générique proche de son intervention.
- Il peut ensuite choisir la nature de l'intervention et fournir la quantité apportée selon l'unité indiquée. Si votre unité n'est pas disponible parmi le choix proposé il est nécessaire de réaliser des conversions, sans cela le résultat obtenu sera très éloigné des émissions réelles.
- La durée de vie renseignée correspond aux fiches de la base INIES. Si les experts des MH estiment que cette durée de vie n'est pas représentative du produit (cf. les limites présentées dans la partie méthodologie « Approche en analyse de cycle de vie »), ils ont la possibilité de la renseigner eux-mêmes. On retrouvera alors 2 versions pour les résultats (durée de vie INIES seul et une durée de vie revue par des experts).

2. L'analyse des résultats

Une fois les interventions renseignées, l'utilisateur a accès aux émissions de GES de son opération dans l'onglet résultat. S'il le souhaite, il peut regarder la décomposition des émissions par phase de cycle de vie du produit et par lots considérés.

Une liste des 20 interventions les plus émissives est également disponible pour faciliter l'analyse.

3. L'exploration de solutions alternatives afin de réduire les impacts

Grace à l'analyse des résultats, l'utilisateur a pu identifier les interventions les plus émissives. Il peut en premier lieu vérifier si les coûts carbone consentis sont liés à des exigences impératives de conservation du monument, ou s'ils peuvent faire l'objet d'alternatives moins carbonées. Dans ce cas, tenter de remplacer dans l'outil l'intervention émissive par une intervention alternative cohérente avec son monument historique,

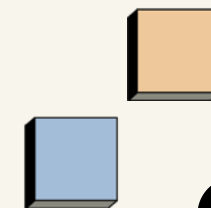
⁴⁷ Ces interventions ont une empreinte carbone nulle ou négligeable dans le cadre des MH

⁴⁸ Les lots considérés sont les suivants : Installation de chantier ; Désamiantage, démolition et déplombage ; Gros œuvre et fondations spéciales ; Maçonnerie et pierre de taille ; Charpente en bois ; Charpente métallique ; Couverture ; Façade ; Cloisonnement et revêtement ; Menuiserie en bois traditionnelle ; Serrurerie, ferronnerie d'art, menuiserie métallique et quincaillerie ; Décors ; Vitraux ; Sécurité, incendie, électricité et production locale d'énergie ; Ascenseur et monte-charge ; CVC et équipements sanitaires ; Voiries et Réseaux divers.

⁴⁹ La base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements de la construction

⁵⁰ Ainsi que du ministère de la Transition écologique

⁵¹ Carbone 4 ne prend pas en compte l'amortissement de l'équipement.



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

et moins carbonée. L'utilisateur peut répéter cette opération plusieurs fois pour aboutir à un scénario alternatif et ainsi réduire l'empreinte carbone totale de son projet de restauration.

Enfin, l'utilisateur peut comparer plusieurs scénarios d'intervention en termes de dépense carbone en les corrélant aux gains en carbone lié à l'énergie de fonctionnement pour chacun des scénarios, établis par simulations énergétiques. Il peut s'avérer que l'investissement carbone de l'opération ne soit pas justifié par un gain énergétique net, ou bien par un gain suffisant au regard de l'impact patrimonial.

L'outil participe ainsi d'une stratégie de conception globale intégrant la dimension patrimoniale, la dimension carbone-énergie et la dimension carbone-matériau.

CONCLUSIONS ET MESSAGES CLÉS

Le calcul de l'empreinte carbone des travaux démontre que la restauration des monuments historiques constitue une pratique intrinsèquement sobre en carbone, affichant une empreinte carbone moyenne estimée entre 230 hors lots techniques et 460 kgCO₂e/m² avec lots techniques, un niveau nettement inférieur à celui observé dans la rénovation énergétique classique. Cette conclusion s'appuyant sur une étude qui porte sur un faible échantillon, il serait nécessaire d'approfondir l'étude en l'élargissant à un échantillon plus large afin de fiabiliser la conclusion. La performance environnementale de la restauration s'explique structurellement par la conservation maximale du bâti existant, l'usage prédominant de matériaux géo-sourcés ou bio-sourcés peu transformés (pierre, bois) et un périmètre d'intervention qui inclut plus rarement le remplacement complet d'équipements ou d'ouvrages.

Si ces opérations ne pèsent en fine qu'environ 2 % des émissions nationales du secteur de la construction, leur impact reste dominé à 60 % par la phase de fabrication des matériaux neufs, notamment pour les lots de couverture et de menuiserie qui nécessitent des renouvellements périodiques. Dès lors, la stratégie de décarbonation identifiée repose prioritairement sur la limitation de l'apport de matière neuve par l'entretien préventif et le renouvellement raisonné et ciblé de la matière dégradée, et le réemploi in situ, positionnant la restauration patrimoniale comme un modèle de sobriété matière pour l'ensemble du secteur.

PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Cette étude inédite a permis de quantifier pour la première fois l’empreinte carbone du secteur des monuments historiques. Ce travail a permis de mettre en lumière la prépondérance de l’énergie d’exploitation dans l’empreinte globale d’un monument historique, qui représente environ plus des trois quarts des émissions totales sur le cycle de vie d’un monument, contre seulement 10 % à 25 % pour les travaux de restauration. Le parc se révèle fortement dépendant aux énergies fossiles, responsables de 91 % des émissions d’exploitation, avec une hégémonie du gaz naturel, malgré une sous-estimation probable du fioul dans les bases de données nationales. Le calcul de l’empreinte carbone a permis de modéliser une trajectoire de décarbonation propre aux monuments historiques : celle-ci démontre qu’une réduction de moitié des émissions est atteignable d’ici 2035, principalement par la substitution des systèmes de chauffage fossiles.

En parallèle, l’étude de onze opérations de restauration suggère que la restauration patrimoniale est une pratique sobre en carbone par rapport aux travaux de rénovation classique, grâce à la conservation de l’existant et l’emploi de matériaux peu transformés. Avec une empreinte carbone moyenne estimée autour de 230 kgCO₂e/m² sur 50 ans, et s’élevant jusqu’à 460 kgCO₂e/m² si on considère les lots techniques, elle s’avère moins émissive d’environ 22 % que la rénovation énergétique classique et 40 à 54 % que la construction neuve (selon les seuils de la RE2020).

LIMITES DE L’ÉTUDE

Ces résultats doivent être interprétés en tenant compte de certaines contraintes méthodologiques. Sur le volet énergie, l’approche statistique basée sur la BDNB présente des incertitudes, notamment pour le patrimoine religieux (données de surfaces et de consommations peu fiables) et le résidentiel privé, où la consommation de fioul et de bois échappe en partie aux radars statistiques. La

marge d’incertitude qui en résulte ne modifie toutefois pas les ordres de grandeur relatifs dégagés par l’étude, notamment la nette prépondérance de l’énergie d’exploitation sur l’empreinte globale.

Sur le volet travaux, l’échantillon restreint de onze opérations analysées ne permet pas de couvrir l’exhaustivité des typologies d’intervention. Cette limite a conduit à examiner l’impact moyen des opérations, mais n’a pas permis de dégager à ce stade des distinctions par typologie. Ce point est toutefois sans incidence sur la mise en place de l’outil de quantification carbone, dont l’utilisation répétée va permettre à l’avenir la constitution de bases de données carbone qui permettront à terme de constituer des approches typologiques fiables.

Par ailleurs, le manque de données carbone sur les matériaux traditionnels et procédés utilisés en restauration de bâti patrimonial constitue une limite supplémentaire. Toutefois, le travail effectué a permis de construire des facteurs d’émissions spécifiques pour les matériaux et procédés les plus fréquents : ce travail serait à continuer pour avoir une couverture plus exhaustive des matériaux et procédés. Dans ce cadre, il serait également intéressant d’étudier les durées de vie réelles des matériaux mis en œuvre dans des opérations de restauration de bâti patrimonial afin de fiabiliser les résultats calculés sur un cycle de vie complet d’une opération.

Aussi, les lots techniques (CVC), souvent exclus des campagnes de restauration pure, n’ont pu être comptabilisés systématiquement, bien qu’ils constituent un levier de performance clé. Toutefois, la considération d’un poids carbone identique des lots techniques pour les monuments historiques et pour le bâti en rénovation apparaît une approche valable en moyenne, la variable technique n’étant pas celle de la protection patrimoniale, mais bien plus celle du programme et de la typologie constructive. Il s’agit pourtant d’un enjeu clé puisque l’impact des lots techniques peut représenter plus de deux tiers de l’empreinte carbone d’une opération de restauration, notamment en raison des faibles durées de vie de équipements techniques qui doivent donc être renouvelés. Souvent, des objectifs

programmatisés, tels que la mise en accessibilité, sont à l’origine des interventions sur les lots techniques, sans rapport avec la conservation du MH ou sa performance énergétique. Cela permet de souligner l’impact des décisions de programme sur l’empreinte carbone d’une opération, et l’importance de définir de privilégier des usages adaptés au bâtiment en considérant les enjeux de frugalité et de mutualisation.

Dernièrement, les méthodes de calcul en analyse de cycle de vie (ACV), conçues initialement pour évaluer l’impact d’un produit et déclinées pour les constructions neuves, présentent des limites lorsqu’elles sont appliquées aux opérations de restauration. La limite principale étant la nécessité de définir une durée de vie a priori, ici une durée de vie normative de 50 ans, qui ne reflète pas la réalité des opérations. Ceci dit, la méthode ACV demeure la méthode la plus précise et permet également une analyse comparative des résultats puisqu’il s’agit de la méthode la plus courante dans le secteur.

PISTES POUR ALLER PLUS LOIN

Au-delà de la mise en œuvre opérationnelle des actions identifiées dans le cadre de cette étude pour réduire l’impact carbone des MH, notamment sur le volet énergétique, il apparaît nécessaire d’approfondir davantage la connaissance et la maîtrise des données carbone de la filière afin de fiabiliser les résultats issus de cette étude exploratoire.

Afin d’affiner ces premières quantifications et suivre l’évolution des pratiques, la création d’un Observatoire carbone des monuments historiques serait bienvenue pour fédérer les acteurs et continuer d’avancer vers la décarbonation du secteur.

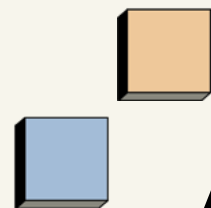
Sur le volet travaux, l’outil « Calculette Carbone » développé dans le cadre de ce projet peut désormais être déployé massivement auprès des maîtres d’œuvre. Son utilisation permettra non seulement d’éclairer les choix de conception vers des variantes bas carbone (réemploi, matériaux biosourcés), mais aussi d’enrichir progressivement les connaissances grâce à la collecte de nouvelles

données réelles, fiabilisant ainsi les ratios présentés dans ce rapport et permettant de dégager des orientations carbone par typologie.

Étant donné que les durées de vie des FDES sont théoriques et paraissent plus courtes que ce qui est constaté dans la réalité des MH, il serait intéressant d’étudier le rythme de remplacement effectif des matériaux des monuments pour apporter de la nuance et de la précision sur l’impact réel des interventions.

Aussi, afin d’avoir une vision plus complète et de mieux valoriser d’un point de vue carbone les matériaux qui ont des longues durées de vie (et qui sont pénalisés d’une certaine manière avec la vision émissions induites sur 50 ans), il serait intéressant de les étudier sous le prisme des émissions évitées. Il serait ainsi possible d’étudier quels matériaux permettent d’éviter des émissions futures en évitant des remplacements successifs au-delà de la durée de vie théorique de 50 ans. Le concept d’émissions évitées permettrait ainsi d’apporter un axe d’analyse complémentaire à l’ACV pour étudier l’impact du choix de matériaux dont la durabilité dépasse l’horizon temporel d’une ACV classique.

Enfin, des travaux complémentaires seraient nécessaires pour affiner la connaissance du parc de MH, et notamment les consommations du patrimoine religieux. La création d’une base de données nationales des consommations énergétiques des monuments historiques permettrait de fiabiliser l’empreinte carbone du secteur et ainsi approfondir la trajectoire de décarbonation. Cette base de données permettrait aussi de piloter et mesurer le progrès du secteur par rapport à la mise en œuvre du plan de décarbonation.



ANNEXE I : GLOSSAIRE

GLOSSAIRE

AAP : Association des architectes du patrimoine

ACMH : Architecte en chef des monuments historiques

ACV : Analyse de cycle de vie

AIE : Agence internationale de l'énergie

BBC : Bâtiment basse consommation

BDNB : Base de données nationales du bâtiment

CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CEREN : Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie

CMN : Centre des monuments nationaux

CREBA : Centre de ressources pour la réhabilitation responsable du bâti ancien

CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment

CVC : Chauffage, ventilation et climatisation

DPE : Diagnostic de performance énergétique

DRAC : Direction régionale des affaires culturelles

FDES : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire

FE : Facteur d'émission

GES : Gaz à effet de serre

GMH : Groupement des entreprises de restauration des monuments historiques

IFPEB : Institut français pour la performance du bâtiment

LTECV : Loi de transition énergétique pour la croissance verte

MH : Monuments historiques

OPPIC : Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture

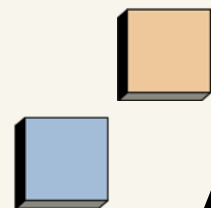
PAC : pompe à chaleur

RE2020 : Réglementation environnementale 2020

SNBC : Stratégie nationale bas carbone

TRC : temps de retour carbone

VRD : voirie et réseaux divers



ANNEXE II : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

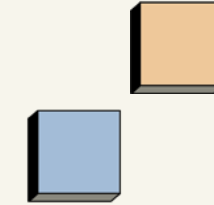
Sources de données

- Base Empreinte, ADEME, consulté entre mai et novembre 2025, <https://base-empreinte.ademe.fr/>
- Base INIES, consulté entre avril et novembre 2025, <https://www.inies.fr/>
- Ecoinvent, Version 3.12, <https://ecoinvent.org/>
- EPD International, consulté entre mai et novembre 2025, <https://www.environdec.com/home>
- Ceren, *Données énergie 1990-2023 du secteur résidentiel*, <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/>
- Ceren, *Données énergie 1990-2023 du secteur tertiaire*, <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/>
- Ceren, *L'énergie dans le bâtiment : les données chiffrées pour la France depuis 1950*, <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/>
- Base de données nationale des bâtiments, consultée en 2025, <https://bdnb.io/>
- Ministère de la Culture, *Outil AgrEgée*
- Ministère de la culture, *Outil Vidoc*, <https://spote.developpement-durable.gouv.fr/offre/explorer-et-visualiser-les-donnees>

Autres références

- Shift Project, *Le Chauffage*, consulté en novembre 2025, <https://theshifters.org/sobriete/le-chauffage/>
- BDNB, *Prédiction des performances énergétiques et environnementales du parc résidentiel*, consulté en novembre 2025, https://bdnb.io/documentation/predictions_dpe/
- Cerema, *Guide diagnostic de performance énergétique et audit énergétique dans les logements*, 2025 [https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/603133/guide-diagnostic-de-performance-e\[...\].tique-et-audit-energetique-dans-les-logements-travaux-d-amelio](https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/603133/guide-diagnostic-de-performance-e[...].tique-et-audit-energetique-dans-les-logements-travaux-d-amelio)
- Base Mérimée, consultée en 2025, <https://www.culture.gouv.fr/rechercher-une-publication-du-ministere-de-la-culture/bases-de-donnees/merimee-une-base-de-donnees-du-patrimoine-monumental-francais-de-la-prehistoire-a-nos-jours>
- Ministère de la transition écologique, *Guide RE 2020*, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/guide_re2020_version_janvier_2024.pdf
- Incub, *Chauffage des églises : comment faire ?*, consulté en novembre 2025, <https://www.incub.net/lab/blog/chauffage-des-eglises-comment-faire>
- Gouvernement, *Building Automation & Control Systems*, 20 juillet 2020, <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/presentation-et-guide-du-decret-bacs-a712.html>
- RTE, *Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050*, Scénario N1. 2022.
- Ministère de la transition écologique, *Plan national énergie climat*, 2024.
- Ministère de la transition écologique, *Stratégie nationale bas carbone*, 2019
- IFPEB, *Concours Cube*, consulté en novembre 2025, <https://cube-championnat.org/>
- Carbone 4 et l'IFPEB, *Hub des prescripteurs bas carbone*, <https://www.carbone4.com/expertises/innovation/hub>
- Réseau Bâtiment Durable, *24 centres de ressources & clusters régionaux & nationaux*, consulté en novembre 2025, <https://www.reseaubatimentdurable.fr>

- Secrétariat général à la planification écologique, *Mieux se loger - Bâtiment : synthèse de la mise en œuvre du plan, 1er février 2024*, <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/08/232c3bb60ee188ba93d91e2e5bfc6167365b430e.pdf>
- Alliance HGE-HBC, *Programme d'innovation collaborative NZC rénovation - Optimisation et scénario NZC des cas génériques retenus*, <https://www.hgegbc.org/wp-content/uploads/2022/01/NZC-Phase-3-OPTIMISATIONS-V06012022.pdf>
- Observatoire de l'immobilier durable, *Poids carbone des logements : comment optimiser les actions de rénovations énergétiques ?*, Juin 2021, <https://o-immobilierdurable.fr/poids-carbone-des-logements-comment-optimiser-les-actions-de-renovations-energetiques/>



ANNEXE III : ÉTUDES DE CAS SUR 3 OPÉRATIONS DE RESTAURATION

Parmi les 11 opérations étudiées dans le cadre du calcul de l'empreinte carbone, 4 ont fait l'objet d'une étude approfondie pour identifier des leviers d'actions de décarbonation. Sur les 4 études de cas, 3 ont pu faire être étudiés de manière quantitative pour estimer des gains carbone de scénarios alternatifs. Les résultats des études de cas sont présentés ci-dessous.

PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE CAS
DE L'ÉGLISE D'ÉTRETAT

Présentation du projet

Opération sur l'Église Notre Dame de l'Assomption d'Étretat

Église ND de l'Assomption
Étretat – XII^e et XIII^e

Surface
560 m²

Emprise au sol
870 m²

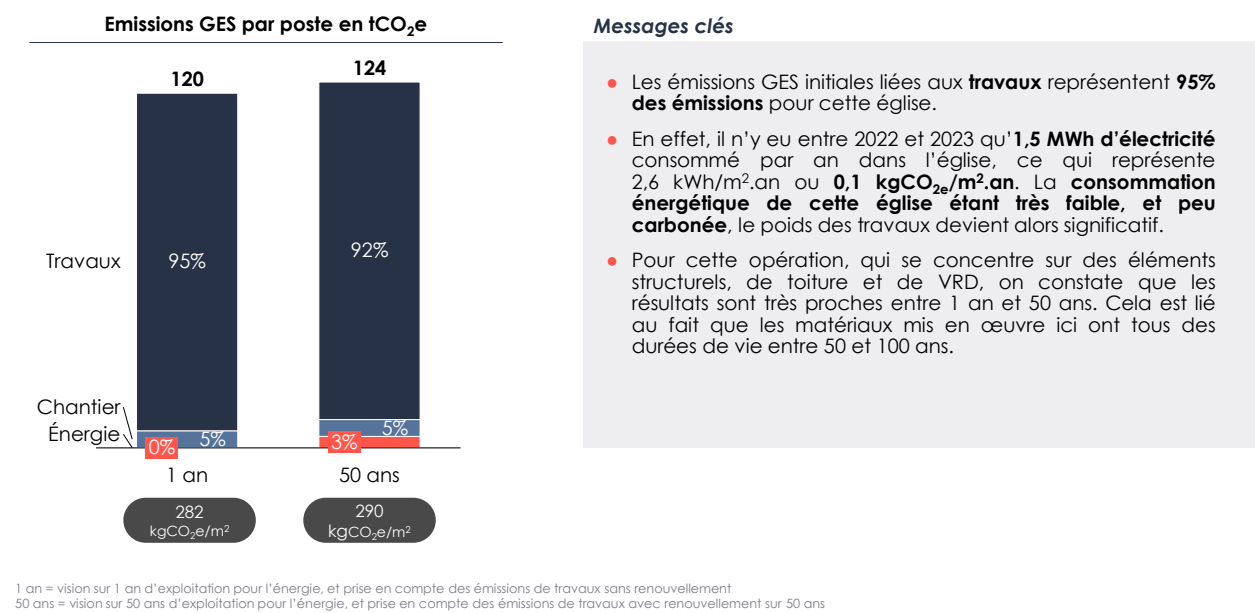
Montants des travaux (HT)
1 700 k€

Opération de restauration des :

- **Structure** : restauration maçonneries
- **Couverture** : restitution de la couverture en tuile (en remplacement des ardoises)
- **Charpente** : restauration de la charpente du XIV^e,
- **VRD** : réseaux enterrés d'évacuation des eaux pluviales

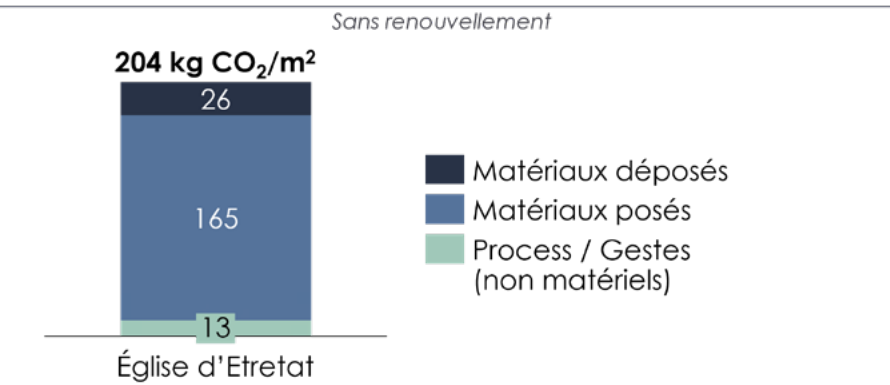
Résultats du calcul de l'empreinte carbone de l'état initial, en comprenant à la fois l'impact des travaux de restauration et d'exploitation du monument, avec une vision sur un an et sur 50 ans :

Impact carbone de l'opération de travaux sur l'église d'Étretat



Résultats complémentaires du calcul de l'empreinte carbone de l'état initial, avec un focus sur le volet travaux, décomposé par nature d'intervention (pose, dépose, gestes peu matériels) :

Répartition des émissions par type de prestations en kgCO₂e/m²



Explication des prestations :

- **Matériaux posés** : Pose de matériaux neufs
- **Matériaux déposés** : Dépose de matériaux vers leur fin de vie
- **Process / Gestes** : Toute opération entraînant une consommation énergétique ou de matériaux

Résultats de l'analyse d'un scénario de travaux alternatif, en se limitant sur l'impact carbone des travaux (hors consommation énergétique) :

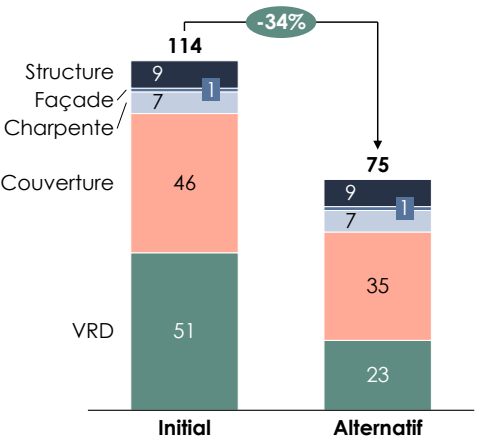
- Pour définir le scénario bas carbone, un entretien a été réalisé avec chaque architecte pour enquêter sur ce qui aurait pu être plus ambitieux sur les aspects carbone et de conservation.

Étant donné les très faibles consommations et émissions énergétiques, seuls les leviers sur les matériaux ont été questionnés.

Comment utiliser moins de matériaux, pousser plus loin le réemploi ou utiliser des matériaux bas carbone ?

- Il est choisi de modéliser :
- La réduction par 2 des quantités de regards et réhausse en béton :
- 10 tCO₂e
 - L'utilisation de **matériaux moins carbonés** pour la VRD (grave recyclée, regard en PE, remblais en argile les moins carbonés) :
- 19 tCO₂e
 - Un **réemploi ex situ des ardoises déposées** :
- 10 tCO₂e

Emissions GES par scénario en tCO₂e (sur 50 ans)



PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE CAS
DE LA COUR D'APPEL DE DIJON

Présentation du projet

Opération de restauration de la Cour d'Appel de Dijon

Map of France highlighting Cour d'Appel Dijon - 1879. Photo of the building. Stats: Surface (SDP) 1 665 m², Emprise au sol 657 m², Montants des travaux (HT) 896 k€ à 2 319 k€. List of restoration operations: Façade, Toiture, Menuiseries, Sculptures.

Résultats du calcul de l'empreinte carbone de l'état initial, en comprenant à la fois l'impact des travaux de restauration et d'exploitation du monument, avec une vision sur un an et sur 50 ans :

Impact carbone de l'opération de travaux sur la Cour d'Appel

Bar chart showing Emissions GES par poste en tCO2e for 1 an and 50 ans. Messages clés: Emissions liées aux travaux, consommation de gaz naturel, et impact sur 50 ans avec renouvellement.

Résultats (1/2) de l'analyse d'un scénario alternatif visant un réduire l'empreinte carbone du monument, vision limitée au poids carbone de l'opération de restauration :

Etude de cas Dijon | Scénario alternatif de travaux

Bar chart showing Emissions GES par scénario en tCO2e (sur 50 ans) for Initial and Alternatif scenarios across various building components. Messages clés: Réemploi ex-situ et/ou in-situ des ardoises, Isolation des combles, and Raccordement au réseau de chaleur.

Résultats (2/2) de l'analyse d'un scénario de travaux alternatif, en intégrant l'impact sur la consommation énergétique du monument :

Etude de cas Dijon | Scénario de travaux alternatifs

Two bar charts showing Emissions GES en tCO2e (sur 1 an) and (sur 50 ans) for Initial, Isolation, Réseau de chaleur, and Alternatif scenarios. Messages clés: Isolation des combles, passage du gaz au réseau de chaleur urbain, and combined impact of both solutions.

PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE CAS
DE L'HÔTEL DE VILLE DE VINCENNES

Présentation du projet

Opération de restauration de l'Hôtel de ville de Vincennes



Hôtel de ville
Vincennes – 1880 & 1930



Surface (SDP)

4 500 m²

Montants des travaux (HT)

3 000 k€

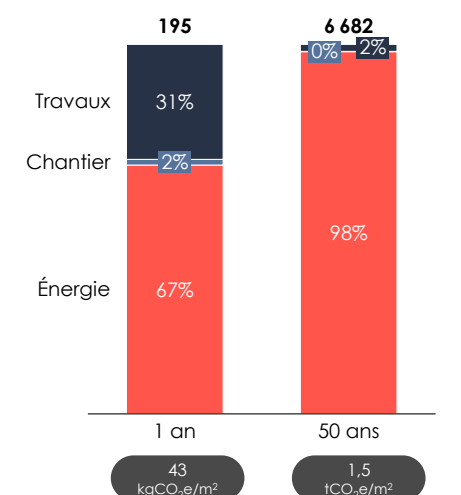
Opération de restauration des :

- **Façade** : nettoyage, bouchon, rejointement, badigeon
- **Menuiseries** : vitrage doublé ou changé par des plus performants
- **Stores et lambrequins** : neufs pour le confort d'été
- **Luminaires, câbles et espaces verts** : remplacement/ajout, pour la mise en valeur de la façade

Résultats du calcul de l'empreinte carbone de l'état initial, en comprenant à la fois l'impact des travaux de restauration et d'exploitation du monument, avec une vision sur un an et sur 50 ans :

Impact carbone de l'opération de travaux sur l'hôtel de ville de Vincennes

Emissions GES par poste en tCO₂e



Poste	1 an	50 ans
Travaux	195 (31%)	682 (0%)
Chantier	2 (2%)	2 (2%)
Énergie	43 (67%)	15 (98%)

1 an = vision sur 1 an d'exploitation pour l'énergie, et prise en compte des émissions de travaux sans renouvellement
50 ans = vision sur 50 ans d'exploitation pour l'énergie, et prise en compte des émissions de travaux avec renouvellement sur 50 ans

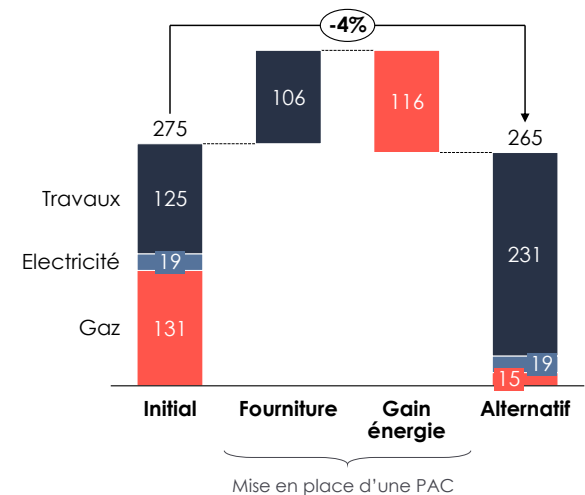
Messages clés

- Les émissions liées aux **travaux** (sans renouvellement) correspondent à une **demi-année d'émissions d'exploitation énergétique** du bâtiment, soit environ **60 tCO₂e** pour les travaux, et **130 tCO₂e** pour l'énergie.
- En moyenne, **470 MWh/an** de **gaz naturel** et **370 MWh d'électricité** ont été consommés entre 2022 et 2024 dans l'hôtel de ville (soit ~185 kWh/m².an).
- Sur une période de 50 ans :
 - En prenant en compte le **renouvellement** des produits et matériaux mis en œuvre qui auraient une vie inférieure à 50 ans (principalement les menuiseries, luminaires et câbles), **les émissions des travaux doublent** (125 tCO₂e).
 - En supposant que les consommations énergétiques et que les contenus carbone des réseaux de gaz et d'électricité restent stables, **l'énergie pourrait représenter 98% des émissions** du bâtiment. C'est l'enjeu principal à adresser.

Résultats de l'analyse d'un scénario de travaux alternatif, en intégrant l'impact sur la consommation énergétique du monument (pour une année de consommation) :

Etude de cas Vincennes | Scénario de travaux alternatifs

Emissions GES par scénario en tCO₂e (pour une année de consommation énergétique)

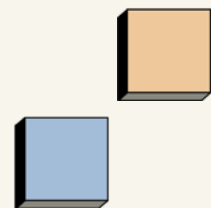


Scénario	Travaux	Electricité	Gaz	Total
Initial	275	19	131	425
Fourniture	106	-	-	106
Gain énergie	-	-	116	116
Alternatif	125	19	15	265

Mise en place d'une PAC

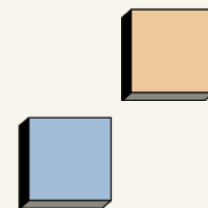
Messages clés

- Le **réemploi des pierres in situ** ne permettrait d'économiser que **0,4 tCO₂e** sur cette opération, ce qui n'est pas significatif.
- La fourniture et la pose d'une PAC ajouterait **106 tCO₂e** aux émissions de travaux (en prenant compte de son renouvellement sur 50 ans). Cependant, elle permettrait de passer de **131 tCO₂e/an à 15 tCO₂e/an** sur les consommations de chauffage, dès la première année de mise en place de la PAC. C'est un gain de 4% au total.
- Sur 50 ans d'exploitation, cela permettrait **d'économiser au moins 4,9 ktCO₂e**, soit une **réduction 74 % des émissions énergétiques** par rapport au projet initial (sans compter la décarbonation du réseau électrique).



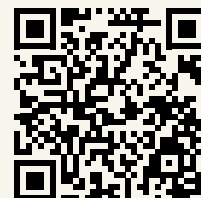
ANNEXE IV : DÉTAILS SUR LE VOLET ÉNERGIE DE L'EMPREINTE ET DE LA TRAJECTOIRE CARBONE DES MH

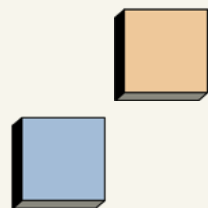
Cette annexe est consultable
en ligne *via* ce QR code :



ANNEXE V : DÉTAILS SUR LE VOLET TRAVAUX DE L'EMPREINTE ET DE LA TRAJECTOIRE CARBONE DES MH

Cette annexe est consultable
en ligne *via* ce QR code :





OUTIL EMPREINTE PATRIMOINE

Conserver Déposer Rapporter

Cet outil est téléchargeable
en ligne *via* ce QR code :





carbone4
conseil

www.carbone4.com



LA COMPAGNIE
DES ARCHITECTES
EN CHEF DES MONUMENTS
HISTORIQUES

www.compagnie-acmh.fr



ARCHITECTES
DU PATRIMOINE

www.architectes-du-patrimoine.org



www.oppic.fr



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

www.cerema.fr

CENTRE DES
MONUMENTS NATIONAUX

www.monuments-nationaux.fr



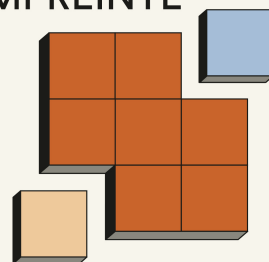
www.groupeement-mh.org



DE L'ARCHITECTURE & DU PATRIMOINE
Ecole de Chaillot

www.citedelarchitecture.fr

EMPREINTE



PATRIMOINE

Conserver

Déposer

Rapporter